

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ MENTOURI – CONSTANTINE-1



FACULTÉ DES SCIENCES DE LA TERRE, DE LA GÉOGRAPHIE ET  
DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE  
DÉPARTEMENT DES SCIENCES GÉOLOGIQUES

N° d'ordre : 248 / Ds / 2018  
Série : 17 / Am / 2018

## ***THESE***

Présentée pour l'obtention du diplôme de  
Doctorat en Sciences

Option:

## **HYDROGÉOLOGIE**

---

# **LES EAUX DES MINES DE LA REGION D'AÏN AZEL (SUD SETIFIEN), CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES, HYDROCHIMIQUES ET IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT**

---

Par

Mohamed Amokrane BELLOUCHE

(Décembre-2018)

Devant le jury:

Président	A.NEMOUCHI	Professeur	Université de Constantine 1
Directeur de thèse	R. MARM	Professeur	Université de Constantine 1
Examineurs	N.CHABOUR	Professeur	Université de Constantine 1
	A.DEMDOUM	Professeur	Université de Sétif
	A.BOUMEZBEUR	Professeur	Université de Tébessa
	C.FEHDI	Professeur	Université de Tébessa

## ملخص

تهتم دراستنا بالمشاكل الناجمة عن المناجم المهجورة وكذلك تلك التي تتمخض عن مجئ المياه الى المنشآت تحت أرضية.

مناجم جنوب مدينة سطيف منها منجم الشعبة الحمراء الذي دخل حيز التقييم سنة 1991 مباشرة بعد غلق وهجر منجم خرزت يوسف بعد غمره بالمياه الجوفية في جوان 1990.

هذه المناجم تقع على بعد 50 كلم جنوب مدينة سطيف بمنطقة عين أزال ضمن المركب الجيولوجي الأصلي (اوتوكتون) وشبه الأصلي (بارا اوتوكتون) الحضني.

حيث توقفت نظرا لمشاكل تسرب المياه دراسة منجم الشعبة الحمراء تظهر أن طبقة الدولوميت المتشققة والمتجوفة تحتوي . ولهذا السبب قمنا بدراسة الخصائص الهيدرودينامكية لطبقة المياه الجوفية . هذه الدراسة أعتمدت على بطارية من خمسة آبار والتي اقترحنا تعديل تصفئه و في توقعها لإقامة التوقعات لتخفيض منسوب المياه الجوفية تحت التمعدين ، والغرض منه هو استئناف استغلال وفتح المنجم مجددا . بالإضافة إلى ذلك ، أكدت الدراسة الهيدروكيميائية عدم تلوث طبقة المياه الجوفية هذه بالمعادن الثقيلة الناتجة عن معدن الزنك وبالتالي تأكيد صلاحيته للشرب من ناحية أخرى، أجريت تحاليل للمياه الجوفية و للتربة المحيطة بمنجم خرزت يوسف المهجور لتحديد أثر مخلفات النفايات والصخور المخزنة في جوار المنجم على البيئة والمياه الجوفية

الكلمات المفتاحية: المناجم ، الشاعبة الحمراء ، خرزت يوسف ، المياه ، الآثار البيئية

## Résumé:

Notre travail est motivé par la problématique des mines abandonnées ainsi que le problème des venues d'eau dans les ouvrages souterrains.

Les gisements Sud Sétifien dont Chaâbet El Hamra est entré en évaluation en 1991, juste après la fermeture et l'abondance de Kherzet Youssef suite à l'inondation survenue en juin 1990.

Ces deux gisements se situent à 50km au sud de Sétif, dans la région d'Ain Azel. Géologiquement ce secteur appartient à l'autochtone et para-autochtone Hodnéen.

L'étude de la mine de Chaâbet El Hamra montre que l'aquifère des dolomies hauteriviennes est de type fissuré et karstifié, a été arrêtée pour les problèmes des venues d'eau. Nous avons tenté une étude hydrodynamique pour déterminer les caractéristiques de la nappe. Cette étude est basée sur une batterie de cinq forages dont on a proposé un réajustement de leur alignement afin d'établir des simulations du rabattement de la nappe sous la minéralisation dans le but de la reprise de l'exploitation du gisement. Par ailleurs l'étude hydrochimique a confirmé la non-pollution de cet aquifère par des métaux lourds de la minéralisation zincifère du gisement. Et par conséquent confirmer sa potabilité

D'autre part, on a effectué des analyses des eaux souterraines et des sols environnants de la mine abandonnée de Kherzet Youssef afin de déterminer l'impact des haldes et des stériles stockés au voisinage de la mine sur l'environnement et les eaux souterraines.

**Mots Clés :** mines, Châabet El Hamra, Kherzet Youssef, eaux, impacts environnementaux

## Abstract

Our work is motivated by the problem of abandoned mines and the problem of water inflow in underground works.

The South Sétifien deposits of which Chaâbet El Hamra entered evaluation in 1991, just after the closure and the abundance of Kherzet Youssef following the flood that occurred in June 1990.

These two deposits are located 50km south of Setif chief town, in the region of Ain Azel. Geologically this area belongs to para-Autochthonous and Autochthonous Hodenian

The study of the Chââbet El Hamra mine shows that the aquifer of the Hauterivien dolomies is cracked and karstified type, was stopped for the problems of the inflow of water. We have attempted a hydrodynamic study to determine the characteristics of the aquifer. This study is based on a battery of five boreholes that have been proposed to readjust their alignment in order to establish simulations of the drawdown of the groundwater beneath the mineralization, the purpose of which is to resume exploitation of the deposit. In addition, the hydrochemical study confirmed the non-pollution of this aquifer by heavy metals from the zinciferous mineralization of the deposit. And therefore confirm his potability

On the other hand, groundwater and surrounding soil analyzes of the abandoned Kherzet Youssef mine were conducted to determine the impact of the dumps and waste rock stored in the vicinity of the mine on the environment and groundwater.

**Keywords:** Mines, Chââbet El Hamra, Kherzet Youssef, waters, environmental impacts

## *Dédicaces*

ربى علمني ما ينفعني

وأنفعي بما علمتني

وزدني علما

*L'eau, source de la vie, sang de la terre, tout le monde la connaît, ou croit la connaître.*

*Chacun de nous sait que sans eau on ne vivrait pas longtemps et que toute vie sur terre serait impossible*

*Elle peut être abondante dans certaines régions, très rares dans d'autre et une denrée précieuse de nos jours..*

*Elle peut être très bénéfiques pour les agriculteurs, mais un ennemi redoutable pour les miniers.*

*Pour ne pas oublier le 2 juin 1990 et les 19 victimes de la mine de Kherzet Youssef.*

*A mes parents, ma femme et mes enfants.*

*M.A.Bellouche*

# Remerciements

*Les remerciements sont aux individus un peu ce que la bibliographie est au travail présenté, on a toujours le sentiment d'avoir oublié quelqu'un.*

*Je remercie vivement Monsieur Abdelmalek Nemouchi Professeur à la Faculté des Sciences de la Terre. De la géographie et de l'aménagement du territoire pour l'honneur qu'il me fait d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.*

*Une thèse est souvent l'aboutissement de nombreuses années d'études et de travaux de recherches, à ce sujet je voudrais exprimer mes remerciements, à celui qui a participé amplement à l'élaboration de ce projet ; à mon directeur de thèse Pr. Ramdane Marmí, qui malgré les nombreuses charges qui sont les siennes, m'était toujours disponible et a accepté de continuer de diriger ma thèse de doctorat, qu'il trouve ici le témoignage d'un profond respect, reconnaissance et remerciements.*

*Je tiens également à remercier A. BOUMEZBEUR, Professeur, Département des Sciences de la Terre, Université Tébessa,, d'avoir accepté de participer au Jury de cette thèse en qualité d'Examinateur.*

*Je tiens également à remercier A. DEMDOUM, Professeur, Département des Sciences de la Terre, Université Ferhat Abbas setifi, d'avoir accepté de participer au Jury de cette thèse en qualité d'Examinateur*

*Je tiens à remercier Monsieur C. FEHDI, Professeur, Département des Sciences de la Terre, Université Tébessa,, d'avoir accepté de participer au Jury de cette thèse en qualité d'Examinateur.*

*Comme je tiens à remercier Monsieur N. CHABOUR, Professeur, Département des Sciences de la Terre, Université Mentouri Constantine, d'avoir accepté de participer au Jury de cette thèse en qualité d'Examinateur.*

*Une grande partie de mes travaux n'auraient jamais été possibles sans le soutien de la direction de l'ENOF d'Ain Azel, je voudrais à cette occasion remercier Mr S. Ouazouaz, pour ses encouragements et toute l'importance qu'il a porté à mon travail.*

# Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<b>CHAPITRE PREMIER : CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE.....</b>	<b>4</b>
I.CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE .....	5
I.1. INTRODUCTION.....	5
I.2.CADRE GEOGRAPHIQUE.....	6
I.3.CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL.....	7
I.3.1.DIFFERENTS DOMAINES PALEO GEOGRAPHIQUES.....	9
I.3.1.1. LES ZONES DU DOMAINE INTERNE .....	10
I.3.1.1.1. LE SOCLE KABYLE : .....	10
I.3.1.1.2. LA DORSALE KABYLE : .....	11
a). La dorsale interne .....	12
b). La dorsale médiane.....	13
c). La dorsale externe.....	13
I.3.1.1.3. LE DOMAINE DES FLYSCHS.....	13
a). Le flysch mauritanien :.....	14
b). Le flysch Massylien :.....	14
c). Le flysch numidien : .....	15
I.3.1.2. LES ZONES DU DOMAINE EXTERNE :.....	15
I.3.1.2.1. LES SERIES ULTRA-TELLIENNES :.....	15
I.3.1.2.2. LES SERIES TELLIENNES (SENSU STRICTO).....	15
I.3.1.2.3. LES SERIES PENI-TELLIENNES ET LEUR COUVERTURE EOCENE A NUMMULITES .....	16
I.3.1.2.4. L'ORGANISATION SETIFIENNE.....	16
I.3.1.2.5. L'ORGANISATION CONSTANTINOISE.....	16
a). Le môle néréitique.....	16
b). Le sillon écaillé de Sellaoua.....	16
I.3.1.2.6. L'AVANT PAYS AUTOCHTONE.....	17
I.3.2.LES DIFFERENTES PHASES TECTONIQUES.....	17
I.3.2.1.LES EVENEMENTS TECTONIQUES DURANT LE MEZOZOIQUE.....	17
I.3.2.1.1. AU TRIAS.....	17
I.3.2.1.2. AU LIAS .....	18
I.3.2.1.3. AU JURASSIQUE MOYEN ET SUPERIEUR : .....	18
I.3.2.1.4. AU CRETACE.....	18
a). Crétacé inférieur.....	18
b). Au Crétacé supérieur.....	19
I.3.2.2. LES EVENEMENTS TECTONIQUES DURANT LE TERTIAIRE.....	20
I.3.2.2.1. A L'EOCENE : <i>Phase priabonnaise</i> .....	20
I.3.2.2.2. AU MIOCENE : .....	20
a). <i>Phase compressive du Burdigalien</i> .....	20
b). <i>Phase tangentielle tortonienne – phase alpine</i> .....	21
I.3.2.3. LA TECTONIQUE RECENTE.....	21
I.3.3.GEOLOGIE DES MONTS DU HODNA .....	22
I.3.3.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE : .....	22
I.3.3.2. SITUATION GEOLOGIQUE :.....	23
I.3.3.2.1. APERÇU LITHOSTOGRAPHIQUE .....	24
a).Le Trias :.....	24
b).Le Jurassique:.....	24
c). le crétacé.....	25

d). Le Miocène.....	28
e).Le Pliocène : .....	28
f).Le Quaternaire.....	29
I.3.3.2.2. LA TECTONIQUE DES MONTS DU HODNA .....	29
a). Les failles .....	30
b). Les plis .....	30
c). Les Structures Diapiriques .....	30
I.3.3.3.CADRE GEOLOGIQUE LOCAL .....	30
I.3.3.3.1. LOCALISATION DU SECTEUR D'ETUDE .....	30
I.3.3.3.2. LE CADRE GEOLOGIQUE .....	31
a). Le crétacé .....	<b>31</b>
b). Le Miocène .....	32
c). Le Quaternaire .....	33
I.3.3.3.3. LA TECTONIQUE LOCALE.....	33
a). Les Accidents majeurs .....	33
b). Les accidents secondaires.....	34
I.3.3.3.4. LA MINERALISATION DE KHERZET YOUSSEF.....	35
I.3.4. CONCLUSION : .....	37
<b>CHAPITRE DEUX : CADRE MORPHOMETRIQUES ET HYDROLOGIQUE.....</b>	<b>39</b>
II.1. CARACTERES MORPHOMETRIQUES.....	40
II.1.1. INTRODUCTION.....	40
II-1.2. SITUATION DU BASSIN D'AÏN AZEL.....	40
II-1.3. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES.....	40
II-1.3.1. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE.....	40
II.1.3.2. LE COUVERT VEGETAL .....	42
II.1.3.3. LES PARAMETRES ALTIMETRIQUES.....	42
II.1.3.4. CARACTERISTIQUES DE FORME.....	44
II.1.4. LES PARAMETRES GEOMETRIQUES.....	44
II.1.5. CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES.....	46
II.1.6. MARQUES DE L'ENDOREISME.....	48
II.1.7.CONCLUSION.....	48
II.2.CARACTERISTIQUES HYDRO-CLIMATIQUES.....	49
II.2.1.INTRODUCTION.....	49
II.2.2. LES INFLUENCES CLIMATIQUES.....	49
II.2.3. LE CLIMAT ET ANALYSE DES PARAMETRES CLIMATIQUES .....	50
II.2.3.1. LES PRECIPITATIONS.....	50
II.2.3.1.1. VARIATIONS DES PRECIPITATIONS DANS LE TEMPS.....	52
a). Précipitations moyennes mensuelles (série 1990-2010).....	52
c). Précipitations moyennes annuelles (série 1990-2010).....	52
II.2.3.2. TEMPERATURES.....	54
II.2.3.2.1. VARIATIONS DES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES.....	55
II.2.3.2.2. LA COURBE OMBROTHERMIQUE.....	55
II.2.3.3. VARIATIONS DES PRECIPITATIONS DANS L'ESPACE.....	56
II.2.3.3.1. METHODE DES POLYGONES DE THIESSSEN .....	57
II.2.3.3.2. METHODE DES ISOHYETES .....	57
II.2. 3.4. VARIATION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR .....	58
II.2.3.5. INDICE CLIMATIQUE.....	59
II.2.4. BILAN HYDROLOGIQUE.....	60
II.2.4.1. EVAPOTRANSPIRATION REELLE ANNUELLE (ETR).....	60
II.2.4.1.1. FORMULE DE L. TURC.....	60

II.2.4.1.2. FORMULE DE COUTAGNE.....	60
II.2.4.1.3. DETERMINATION DE L'ETR PAR L'ABAQUE DE WUBDT.....	61
II.2.4.1.4. METHODE DE P. VERDEIL (1988).....	62
II.2.4.1.5. EVALUATION DE L'ETR PAR LE BILAN DE THORNTHWAITE.....	63
a). Calcul de l'évapotranspiration potentielle mensuelle non corrigée : EP.....	64
b). Calcul de l'évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée ETP.....	64
c). Calcul des réserves facilement utilisables RFU.....	65
d). Estimation du ruissellement annuel.....	67
II.2.5. CONCLUSION.....	68
<b>CHAPITRE TROIS : CADRE HYDROGEOLOGIQUE DU GISEMENT DE CHAABET EL HAMRA.....</b>	<b>69</b>
III. 1. ETUDE DU GISEMENT DE CHAABET EL HAMRA.....	70
III.1.1.INTRODUCTION.....	70
III.1.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE DU GISEMENT DE CHAABET EL HAMRA .....	70
III.1.3. HISTORIQUE DES TRAVAUX MINIERS.....	71
III.1.4. CONDITIONS GEOLOGIQUES DU GISEMENT.....	71
III.1.4.1. LA STRATIGRAPHIE.....	71
III.1.4.1.1. LE C R E T A C E .....	71
a). Le Valanginien.....	71
b). L'Hauterivien.....	72
c). Le Barrémien.....	72
d). L'aptien .....	74
III.1.4.1.2. LE MIOCENE .....	74
III.1.4.1.3. CONCLUSION.....	75
III.1.4.2. TECTONIQUE :.....	76
III.1.4.2.1. UN BLOC EST : .....	76
III.1.4.2.2. UN BLOC CENTRAL: .....	76
III.1.4.2.3. UN BLOC OUES.....	76
III.1.4.2.4. CONCLUSION : .....	77
III.1.5. CADRE HYDROGEOLOGIQUE.....	77
III.1.5.1. TRAVAUX DE L'EREM (Entreprise de la recherche minière).....	77
III.1.5.2. RESULTATS PRELIMINAIRES.....	77
III.1.5.2.1. DANS LA PARTIE CENTRALE DU GISEMENT.....	77
III.1.5.2.2 DANS LA PARTIE NORD-OUEST DU GISEMENT.....	78
III.1.5.2.3.DANS LA PARTIE EST DU GISEMENT.....	78
III.1.5.3. DISCUSSIONS DES RESULTATS ET CONCLUSIONS.....	78
III.1.5.4. TRAVAUX COMPLEMENTAIRES REALISES PAR ENOF.....	78
III.1.5.5. ETUDE DES CARACTERISTIQUES DE LA NAPPE HAUTERIVIENNE.....	79
III.1.5.5.1. PIEZOMETRIE.....	79
III.1.5.5.2. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES.....	81
III.1.5.5.3. ESSAIS DE POMPAGE .....	81
III.1.5.5.4.TRAITEMENT DES DONNEES.....	83
a). Calcul de la transmissivité T.....	83
b). Calcul du coefficient d'emmagasinement S.....	83
c). Les résultats .....	84
III.1.5.6. D I S C U S S I O N ET CONCLUSION.....	85
III.2. PROPOSITION D'ASSECHEMENT DU GISEMENT CHAABET EL HAMRA.....	86
III.2.1. INTRODUCTION.....	86

III.2.2. RESULTATS DES ETUDES HYDROGEOLOGIQUES ANTERIEURES.....	87
III.2.2.1. RAPPEL DES RESULTATS DES ESSAIS .....	90
III.2.2.2. REVISION DES DELAIS DU RABATTEMENT .....	90
III.2.3. PROPOSITION DE MISE A NIVEAU DU SYSTEME DE POMPAGE.....	90
III.2.3.1. IMPLANTATION DES FORAGES ET DESPIEZOMETRES.....	91
III.2.3.1.1. AMONT DE L'AXE DU POMPAGE .....	91
III.2.3.1.2. AXE DU POMPAGE.....	92
<b>CHAPITRE QUATRE : ETUDE HYDROCHIMIQUE DES EAUX DE LA MINE DE CHAABET EL HAMRA.....</b>	<b>96</b>
INTRODUCTION.....	97
IV.1. ETUDE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES.....	97
IV.1.1. ETUDE DES PARAMETRES PHYSIQUES.....	97
IV.1.1.1. LES TEMPERATURE (T°C).....	97
IV.1.1.2. POTENTIEL D'HYDROGENE (pH).....	98
IV.1.1.3. CONDUCTIVITE ( $\sigma$ ).....	99
IV.1.1.4. LE RESIDU SEC (Rs).....	100
IV.1.2. ETUDE DES PARAMETRES CHIMIQUES.....	101
IV.1.2.1. CATIONS.....	101
a). Calcium (Ca <sup>++</sup> ) : .....	101
b). Magnésium Mg <sup>++</sup> : .....	101
c). Sodium (Na <sup>+</sup> ) + Potassium (K <sup>+</sup> ).....	101
IV.1.2.2. ANIONS :.....	103
a). Les Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) :.....	103
b). Les Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ) .....	104
c). Les chlorures.....	105
d). Les nitrates.....	105
IV.2. CLASSIFICATION DES EAUX:.....	106
IV.2.1. FACIES DES EAUX: DIAGRAMME DE PIPER .....	107
IV.2.2. FACIES DES EAUX D'APRES LA FORMULE CARACTERISTIQUE DE STABLER.....	108
IV.2.3. FACIES DES EAUX: DIAGRAMME DE SCHOELLER-BERKALOFF.....	108
IV.2.4. CONCLUSION.....	109
IV.3. METAUX LOURDS.....	110
IV.4. POTABILITE DES EAUX DE LA MINE DE ZINC DE CHAABET-EL-HAMRA .....	110
IV.5. CONCLUSION.....	112
<b>CHAPITRE CINQ : ETUDE D'IMPACT DES DECHETS DE LA MINE DE KHERZET YOUSSEF.....</b>	<b>113</b>
V.1. DEVENIR DES METAUX LOURDS PROVENANT DES HALDES DE LA MINE DE KHERZET YOUSSEF.....	114
V.1.1. INTRODUCTION.....	114
V.1.3. ORIGINE DU PROBLEME DE LA POLLUTION.....	115
V.1.3.1. MODE D'EXTRACTION DU MINERAL.....	117
V.1.3.2. DRAINAGE MINIER ACIDE.....	118
V.1.4. POLLUTIONS INDUITES PAR LES DMA .....	119
V.6. CONCLUSION .....	121
V.2. DEVENIR DES METAUX LOURD PROVENANT DE LAMINE .....	121
V.2.1. INTRODUCTION.....	121
V.2.2. ECHANTILLONAGE.....	122
V.2.2. LES ANALYSES.....	123
V.2.2.1. ANALYSES DES EAUX.....	123
V.2.2.2. ANALYSES DES SOLS.....	125



V.3.LA GESTION DE L'EAU DES MINES ABONDONNE.....	128
IV.3.1. LA GESTION DE L'EAU PENDANT LA PERIOD D'EXPLOITATION :.....	129
V.3.2. LA GESTION DE L'EAU A L'ABANDON DE LA MINE : .....	129
V.3.3. LA QUALITE DE L'EAU DE LA MINE PENDANT L'EXPLOITATION.....	129
V.3.4. LA QUALITE DE L'EAU DE LA MINE A L'ARRET .....	130
V.3.5. LA GESTION DE L'EAU DES MINES ABANDONNEE :.....	131
V.3.6. CONCLUSION.....	131
CONCLUSION GENERALE.....	133
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>138</b>

# Liste de figures

Fig. I.1 Situation géographique de la mine Kherzet Youssef.....	7
Fig. I.2. Les grands domaines d'origine alpine de méditerranée occidentale .....	8
Fig. I.3.Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides .....	9
Fig. I.4. Contexte structural du domaine d'étude D'après Wildi .1983 Modifiée.....	10
Fig. I.5.Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la Chaîne des Maghrébides .....	14
Fig. I.6. localisation des monts du Hodna .....	23
Fig.I.7. carte géologique des environs de la mine de Kherzet Youssef et sa légende .....	25
Fig. I.8. Colonnes lithostratigraphiques synthétiques comparatifs des Monts du Hodna.....	29
Fig. I.9. Carte géologique du djebel Hadjar Labiod et de ses environs (modifiée).....	32
Fig. I.10. Schéma structural de la région d'Aïn Azel.....	34
Fig. I.11 : Bloc diagramme du gisement de Kherzet Youssef.....	38
Fig. II.1 : Situation du bassin versant des hautes plaines Sétifiennes et Constantinoises .....	41
Fig. II.2 : Carte du sous bassin versant N°07-01.....	41
Fig. II.3. Carte topographique du sous bassin versant 07/01. ....	43
Fig. II.4. Courbe hypsométrique.....	47
Fig. II.5. Courbes des variations des précipitations moyennes mensuelles.....	52
Fig. II.7. Histogrammes des précipitations moyennes annuelles.....	54
Fig. II.8. Variation des températures moyenne mensuelles.....	56
Fig. II.9. Courbe Ombrothermique.....	57
Fig. II.10. Droite de régression.....	58
Fig. II.11. Abaque donnant le déficit d'écoulement moyen annuel d'après Wundt .....	63
Fig. II.12. Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie (Verdeuil 1988).....	64
Fig.III.1. Situation géographique de la mine de Chaâbet El Hamra .....	71
.....	
Fig.III.2. Carte géologique des environs de la mine de Chaâbet El Hamra.....	74
Fig.III.3. Carte géologique détaillée du carré minier (in Kada 1994).....	75
Fig.III.4. Log stratigraphique du gisement de Chaâbet El Hamra et Kherzet Youssef.....	76
Fig.III.5 .Schéma structural de gisement de Chaâbet El Hamra, (source ENOF).....	77
Fig.III.6. Carte de situation des Ouvrages Hydrogéologiques (D'après ENOF).....	80
Fig.III.7. Situation initial du niveau hydrostatique.....	82
Fig.III.8. Carte piézométrique (D'après Contribution à l'étude des problèmes .....	83
Fig.III.9 : Courbe du rabattement (Pz13) $s=\log t/x^2$ .....	85
Fig.III.10. Courbe du rabattement (Pz10) $s=\log t/x^2$ .....	85
Fig.III.11. Courbe du rabattement (Pz10) $s=\log t/x^2$ .....	86
Fig.III.12. situation des ouvrages hydrogéologiques. (D'après l'ENOF).....	88
Fig.III.13. Cône de dépression au profil 15.....	89
Fig.III.14. Evolution du niveau d'eau dans le Piézomètre Pz3.....	90
Fig.III.15. Schéma illustrant l'implantations des forges du système de pompage .....	94
<b>Fig. IV.1.</b> Le cycle de l'azote dans le sol (Hill, 1991).....	107
Fig.IV.2.Classification des eaux de de Chaâbet El Hamra selon Piper (Avril 2012.....	108
Fig.IV.3. Classification des eaux de Chaâbet El Hamra selon le diagramme Schöller-Berkaloff .....	110
Fig. V.1. Carte géologique modifiée et complétée.....	115
Fig. V.2. Cercle des corrélations dans l'espace des variables (A.C.P.).....	116
Fig. V.3. Schéma hydrogéologique possible du gisement.....	117
Fig. V.4.. Situation des points de prélèvement des eaux et des sols.....	123
Fig. V.5. Graphique des teneurs en zinc dans les fouilles F4 et F5.....	125
Fig. V.6. Variations des teneurs en métaux lourds en fonction de la profondeur .....	126
Fig. V.7. Droite de regression entre les differents metaux lourds.....	127

## Liste des Tableaux

Tableau II.1 : valeur d'indice de compacité de gravelius .....	45
Tableau II.2 : Répartition des altitudes du sous bassin versant 07/01.....	46
Tableau II.3 : classification des reliefs de l'O.R.S.T.O.M .....	47
Tableau II.4. Précipitations mensuelles de la station d' Aïn Azel et de Sétif .....	51
Tableau II.5. Précipitations moyennes mensuelles de la station Aïn Azel et Sétif .....	52
Tableau II.6. Précipitations moyennes annuelles des stations Aïn Azel et Sétif .....	53
Tableau II.7. : Variations de températures moyennes mensuelles de la station Aïn Azel .....	54
Tableau II.8. Températures et précipitations moyennes mensuelles Station de Aïn Azel et Sétif.....	56
Tableau II.9. Caractéristiques des stations utilisées (Précipitation).....	57
Tableau II.10 : répartition par tranche d'altitudes (surface, précipitation).....	58
Tableau II.11. Caractéristiques des stations utilisées (Température).....	58
Tableau II.12. Calcul de l'E.T.R annuelle selon la formule de L. Turc.....	61
Tableau II.13. Estimation du bilan hydrologique selon Thornthwaite.....	66
Tableau II.14. Les valeurs de l'ETR selon les différentes méthodes.....	67
Tableau III.1. Evolution des niveaux d'eau dans les piézomètres.....	82
Tableau III.2. Résultats de Calcul .....	85
Tableau III.4. Rabattement prévisionnel au profil 13 .....	92
Tableau III.5. Récapitulatif des simulations.....	94
Tableau III.6. Délais de rabattement sous la minéralisation au Profil15.....	95
Tableau IV.1. Caractère de l'eau selon les valeurs des pH mesurés.....	99
Tableau IV.2. Les valeurs de la conductivité des différents forages dans la zone d'étude.....	100
Tableau IV.3. Valeurs des residus secs dans les differents forages.....	101
Tableau IV.4 Tableau Récapitulatif des caractéristiques physico-chimiques des eaux .....	102
Tableau IV.5. Classification des eaux de Châabet El Hamra selon Stabler .....	108
Tableau.IV.6. Les teneurs des métaux lourds dans les forages .....	110
Tableau.IV. 7. Comparaison des eaux souterraines du gisement de Chaâbet-El-Hamra .....	111
Tableau.V.1. Valeurs limites de concentration admise en éléments traces dans les sols .....	122
Tableau.V.2. Analyses des eaux souterraines : teneurs en métaux .....	123
Tableau. V.3. Analyses des eaux souterraines teneur anions.....	124
Tableau. V.4. Analyses des eaux souterraines teneur cations.....	124
Tableau .V.5. Teneur exprimée en mg/kg de matière sèche à 105°C.....	125

# Introduction

La région d'étude se trouve à la convergence de deux domaines structuraux : (i) au Nord le parautochtone Sud-Sétifien et (ii) au Sud l'autochtone hodnéen. Les accidents tectoniques affectant les formations géologiques, constituent par endroits des structures favorables à la circulation des eaux souterraines.

Le domaine hodnéen et particulièrement le Sud-Sétifien, se caractérise par la présence de minéralisations polymétalliques (Pb-ZN) où la mine de Chaâbet-El-Hamra (Aïn-Azel) est liée à un aquifère contrariant son exploitation. Les formations géologiques carbonatées encaissant les gisements de Chaâbet-El-Hamra (CEH) et de Kherzet Youssef (KY) et se rapportent respectivement à l'Hauterivien et au Barrémien.

L'industrie minière occupe une place importante dans le domaine hodnéen où les gisements susmentionnés ont été mis en exploitation puis arrêtés suite à leur ennoyage par les eaux souterraines.

L'exploitation minière et le traitement de minerais plombo-zincifères génèrent un important volume de rejets solides et liquides (résidus miniers, fines particules issues du traitement hydrométallurgique du minerai utile). Le matériel de déblai et les stériles sont entreposés sous forme de haldes au voisinage immédiat des mines. Quant aux résidus miniers, ils sont placés dans un bassin d'évaporation aménagé à l'aval de la mine. Ces rejets miniers sont les principaux instigateurs de drainage minier acide (DMA).

Lors des travaux souterrains ou d'exploitation minière, les eaux souterraines constituent souvent un risque pour les mineurs de fond et/ou une cause d'entrave à l'extraction par galeries du minerai.

Dans les terrains carbonatés, la circulation des eaux est souvent favorisée par la présence de fractures karstifiées. L'oxydo-réduction des minéraux sulfurés produit de l'acide sulfurique et les eaux souterraines deviennent agressives et ont une action destructrice aussi bien sur les matériaux métalliques (pompes, conduites...) que sur l'encaissant (dissolution des roches).

L'objectif principal de notre travail de recherche est d'essayer d'expliquer les causes des venues d'eau lors de l'exploitation et comment y remédier. Mais devant la complexité du phénomène nous avons dû nous résoudre de proposer à travers ce manuscrit, le fonctionnement hydrodynamique et d'établir un schéma hydrogéologique possible du gisement de CEH.

Pour atteindre notre but nous avons d'abord commencé par l'estimation des paramètres morphométriques du sous-bassin versant 07-01 incluant les deux gisements (CEH et KY), qui appartient à son tour au bassin versant des hautes plaines constantinoises (BV 07).

Ensuite, nous avons entrepris une étude hydrogéologique de la nappe souterraine de Chaâbet-El-Hamra afin de suivre le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère et assurer les observations de régime et l'exhaure de la mine. En collaboration avec l'ENOF, une méthode est proposée pour le rabattement artificiel aux moyens de forage d'exhaure traversant toute la couche aquifère pour maintenir le niveau hydrodynamique sous le mur des corps minéralisés.

Aussi, en traitant les données d'analyse des eaux de la nappe en question, nous avons établi une classification de ces eaux.

Sans oublier l'impact des déchets miniers sur l'environnement d'une manière générale et plus particulièrement évaluer le risque de contamination des eaux souterraines par les métaux lourds, nous nous sommes intéressés à l'analyse des sols du site de la mine de KY afin d'estimer les concentrations des métaux lourds.

Notre manuscrit de thèse s'articule en cinq chapitres :

- Le chapitre I concerne la situation des gisements de la région d'Aïn-Azel dans leur contexte géographique et géologique et la détermination des formations géologiques favorables au développement d'aquifères (Fissurés et karstifiés pour les massif et poreux pour la plaine)
- Le chapitre II est consacré essentiellement aux caractéristiques morphométriques du sous-bassin (SBV 07-01) de la région d'Aïn-Azel, aussi nous avons estimé les caractéristiques climatiques de la région ainsi que la détermination des éléments constituant le bilan hydrologique et en particulier l'infiltration.
- Le chapitre III est dédié à l'étude hydrodynamique : exploitant les données des essais de pompages.

Nous avons tenté de définir quelques paramètres hydrodynamiques (Transmissivité, coefficient d'emménagement...), pour le gisement de Chaâbet-El-Hamra. Ces résultats nous ont permis d'établir un schéma hydrogéologique ainsi que le fonctionnement hydrodynamique de cet aquifère. Nous avons également tenté des prévisions par simulation pour définir le temps de rabattement de la nappe et la réouverture du gisement de CEH.

Nous avons aussi proposé un système de pompage pour la mise à niveau du champ de captage du gisement de Chaâbet-El-Hamra. Ce système a été adopté par la direction générale de l'ENOF et qui a servi à l'ouverture de la mine.

- Au chapitre IV, nous nous sommes intéressés à l'étude hydrochimique des eaux du gisement de Chaâbet-El-Hamra et nous avons déterminé le faciès géochimique des eaux de l'aquifère et sa potabilité afin de subvenir aux besoins en eau potable de la ville d'Aïn-Azel et des communes environnantes.

- Le chapitre V est destiné au traitement des problèmes d'impact sur l'environnement par les stériles. Notre objectif majeur consiste à présenter les aspects théoriques nécessaires à la compréhension des mécanismes intervenant dans la production de drainage minier acide et les interactions chimiques se déroulant dans les milieux poreux. Pour se faire, nous avons réalisé des analyses chimiques des eaux souterraines de la partie de la plaine environnante à Kherzet Youssef pour déterminer l'impact des déchets miniers sur l'environnement.

Nous terminons enfin par « une conclusion générale » en rappelant les résultats obtenus et les recommandations qu'il est impératif d'observer afin d'anticiper de telles catastrophes dans l'avenir.

## *Chapitre Premier*

# CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

## **I.CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE**

### **I.1. INTRODUCTION**

La mine de Kherzet Youssef est située à 50 km au Sud de Sétif et à 7 km à l'Ouest de la commune d'Aïn-Azel.

Elle occupe une partie de la zone NE du massif de Hadjar Labiod. Ce dernier est un chaînon d'orientation globale Est-Ouest qui culmine à 1371m au Kef Labiod. Il est bordé à l'Ouest par les hautes plaines de Salah-Bey et à l'Est par celles d'Aïn- Azel dont la limite est marquée par une faille méridienne régionale (Fig. I.1).

Au Nord, l'alignement rectiligne des crêtes de Drâa El Ouast et Drâa El Maïz matérialise la limite septentrionale au-delà de laquelle, s'imposent les premiers reliefs de Djebel Sekrine. La mine de Kherzet Youssef correspond à l'une des principales zones potentielles de minerai en plomb et zinc puisqu'elle seconde le gisement d'El Abed (Oranie) avec un stock cumulé total évalué à un demi million de tonnes avec des teneurs de 3% en Pb et 18% en Zn.

Il s'agit d'un gisement stratiforme à structure monoclinale encaissé dans les formations à dominante carbonatée du Barrémien.

Du point de vue géologique, la région de Aïn-Azel fait partie des monts du Hodna et se trouve à la jonction des hautes plaines sétifiennes et de l'atlas saharien.

L'étude géologique des monts du Hodna a fait l'objet de travaux de plusieurs auteurs : J. Savornin (1920), J ; Glaçon (1952, 1955 et 1963), J. Bertraneu (1955), R. Guiraud (1973) et enfin J.M. VILA (1980).

Les monts du Hodna sont riches en gisements et en indices Plomb et Zinc. Actuellement, aucun gisement n'est en exploitation Chaâbet-El-Hamra pose le problème de l'eau dont la mise à niveau du système de dénoyage est en cours, tandis que Kherzet Youssef est à l'abandon suite à la catastrophe survenue en juin 1990.

La région d'étude appartient aux zones externes de la chaîne alpine d'Algérie orientale. La mine de Kherzet Youssef est caractérisée par les affleurements du secondaire allant du trias jusqu'au créacé. Les formations géologique du Jurassique sont représentées par des faciès calcaro-dolomitiques, le Néocomien par des apports gréseux qui se poursuit jusqu'à l'Albien. Ce n'est qu'à partir du Vraconien qu'on a un retour des carbonates.



Du point de vue tectonique, la région est le théâtre d'une intense tectonique qui a induit la formation de différentes structures se rapportant aux différentes phases tectoniques. Les déformations tertiaires sont les plus importantes et sont responsables du modelé structural actuel.

Le gisement de Kherzet Youssef est encaissé dans les formations barrémiennes à dominantes gréseuses alternant avec des carbonates, très puissantes de 650 à 700m et présentant de larges affleurements au niveau de la mine Kherzet Youssef.

## **I.2. CADRE GEOGRAPHIQUE**

La région de Aïn-Azel fait partie des monts du Hodna et se trouve à la jonction des hautes plaines Sétifiennes et de l'atlas saharien. Le secteur d'étude se situe à une cinquantaine de kilomètre au Sud de Sétif (Fig. I.1) Celui-ci qui s'étend sur une superficie de 160 km<sup>2</sup>, couvre une partie des feuilles au 1/50000 d'Aïn-Azel (ex Ampère) et d'Ain El Lahdjar (ex Behagle). La zone d'étude est globalement centrée sur la localité d'Aïn-Azel.: Les coordonnées géographiques approximatives du site sont :

X= 5°30'E et Y= 35°45'N

Ces coordonnées Lambert Algérie Nord sont :

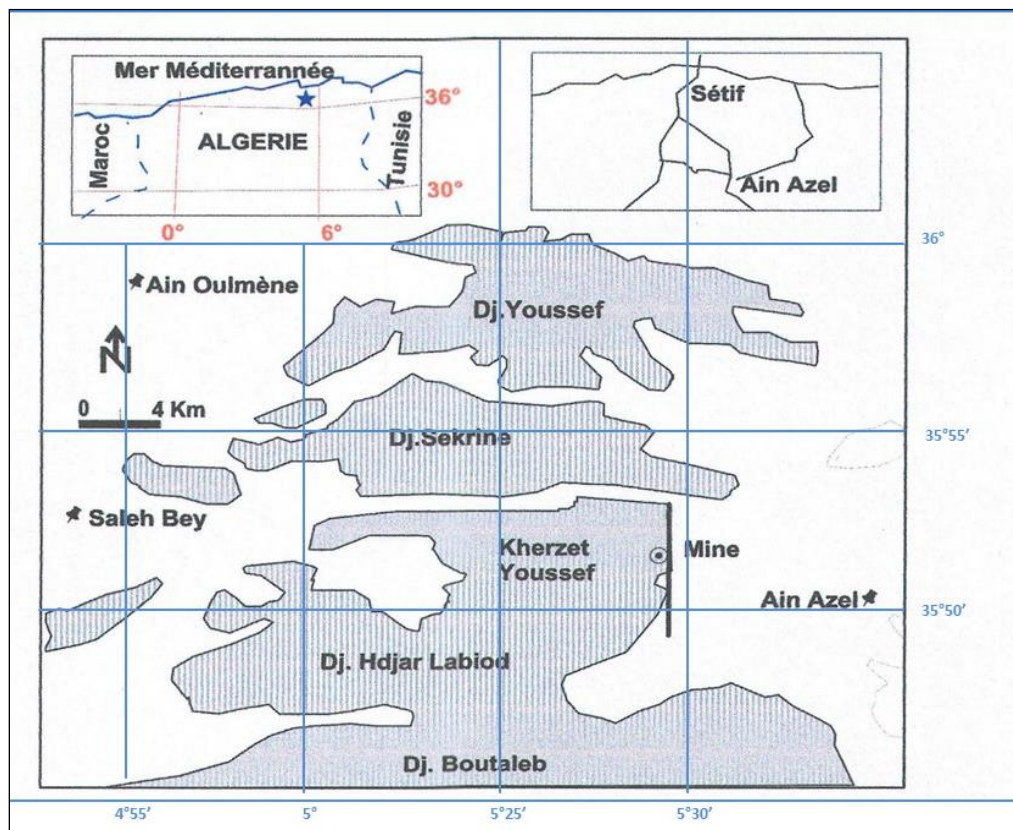
X (m) = 746496.63 à 762800.00 et Y (m) = 280197.96 à 289880.58

Du point de vue orographique, nous avons plusieurs chainons individualisés dont le plus important est le massif de Hadjar Labiod où se trouve le gisement de Kherzet Youssef notre terrain d'étude.

-Au Nord de ce massif, on a le front Sud Sétifien où se localise Dj.Sekrine et Dj.Youssef.

-Au Sud on a une multitude de montagnes: Dj. Boutaleb, Dj.Guétiane, Dj.Debba, Dj.Tzila, le district de Fourhal qui constitue la limite septentrionale des monts de Hodna qui renferment d'importantes minéralisations en Pb-Zn ; et enfin le Horst anticlinal de Rahbat-Talkhampt où se localise le gisement de Chaâbet-El-Hamra.

Du point de vue géographique, une grande partie de la zone d'étude est occupée par la plaine qui s'étend entre les affleurements allochtones des Djebels Djebbas et Kalaoun au Nord et les formations autochtones et parautochtones hodnéennes des



**Fig.I.1** : Situation géographique de la mine Kherzet Youssef

autres limites méridionale, orientale et occidentale où culminent les Djebel Asmar, Kef Mennchar et Kef Hamara respectivement. Plusieurs oueds alimentent cette plaine. Cette dernière qui semble être bien arrosée, représente la région cultivée. Le point culminant de la région d'étude se trouve au Djebel Djebbas à 1205 m d'altitude.

### **I.3.CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL**

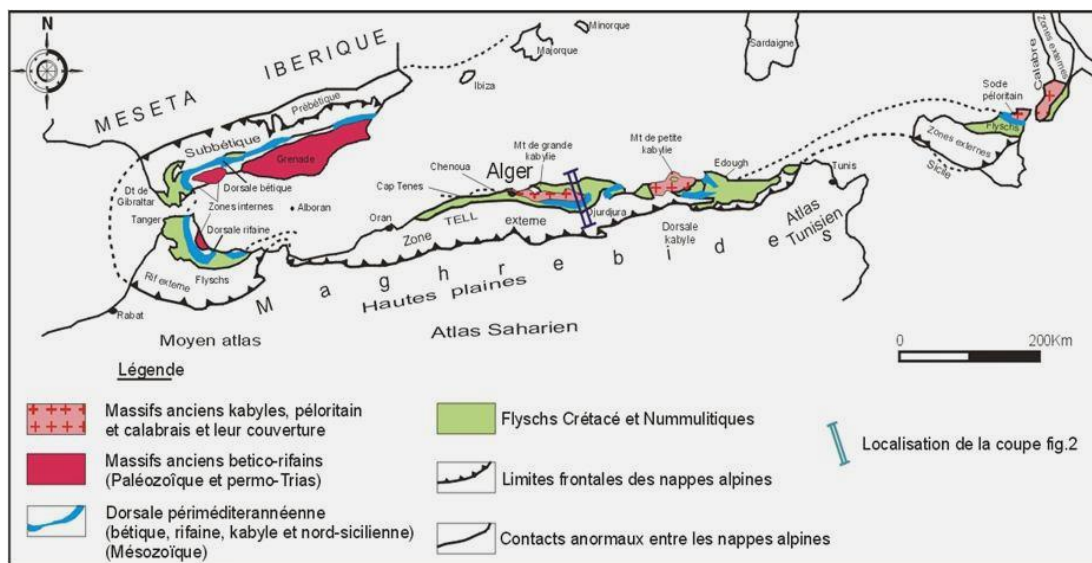
L'histoire géologique des bassins sédimentaires algériens s'inscrit dans le processus de géodynamique globale de la tectonique des plaques qui a structuré l'Algérie en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille Sud-atlasique :

- Au Nord, l'Algérie alpine où la tectonique du cycle alpin prédomine ;
- Au Sud, la Plate-forme saharienne, relativement stable, où la tectonique est moins prononcée.

La chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogénèse alpine péri-méditerranéenne (Durand-Delga, 1969) d'âge Tertiaire qui s'étend de l'Ouest à l'Est sur 2000 km depuis l'Espagne du Sud à l'arc calabro-sicilien.

Dans ce domaine en forme d'anneau très aplati (Fig. I.2), on distingue classiquement les zones internes, situées à l'intérieur de l'anneau et représentées aujourd'hui par différents massifs, dispersés le long de la côte méditerranéenne et les zones externes situées à sa périphérie. Le domaine de la chaîne des Maghrébides a connu des phases de déformations méso-cénozoïques aboutissant à la mise en place de nappes de charriage. C'est le domaine des nappes ou domaine allochtone.

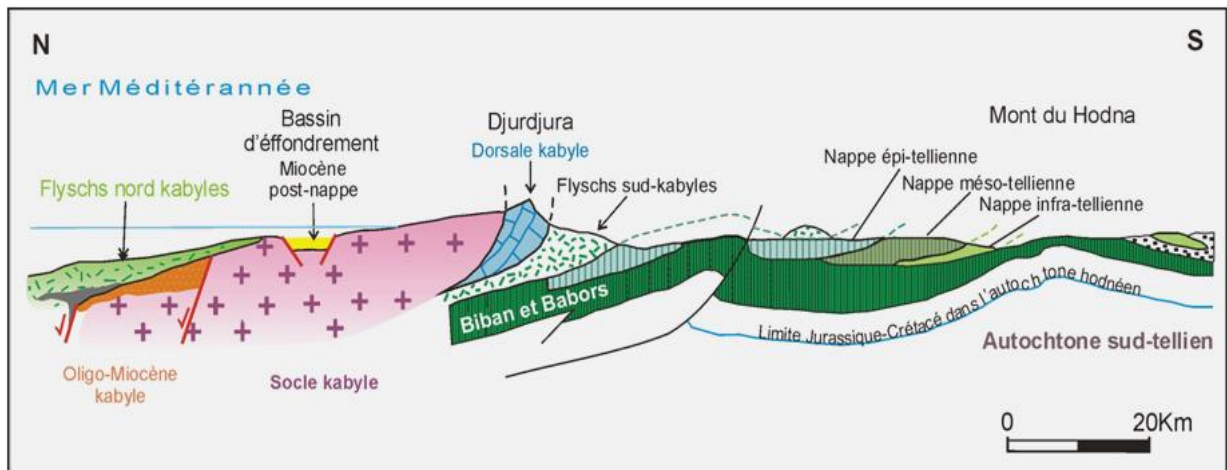
En Algérie, la chaîne des Maghrébides montre du Nord au Sud les domaines suivants :



**Fig. I.2.** Les grands domaines d'origine alpine de méditerranée occidentale (Durand Delga 1969).

La chaîne des Maghrébides résulte probablement de la convergence et de la collision d'un élément de la marge Sud européenne avec la marge Nord africaine d'un bassin Téthysien Maghrébin qui faisait communiquer la Téthys avec l'Atlantique central (Wildi W. 1983).

Cette chaîne est généralement subdivisée en plusieurs domaines structuraux et paléogéographiques bien distincts (Fig. I.3), qui sont actuellement en partie superposés.



**Fig. I.3.** Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (modifiés d'après Durand-Delga, 1969, les Bibans et les Babors qui étaient considérés comme étant de l'Autochtone font également partie des nappes telliennes).

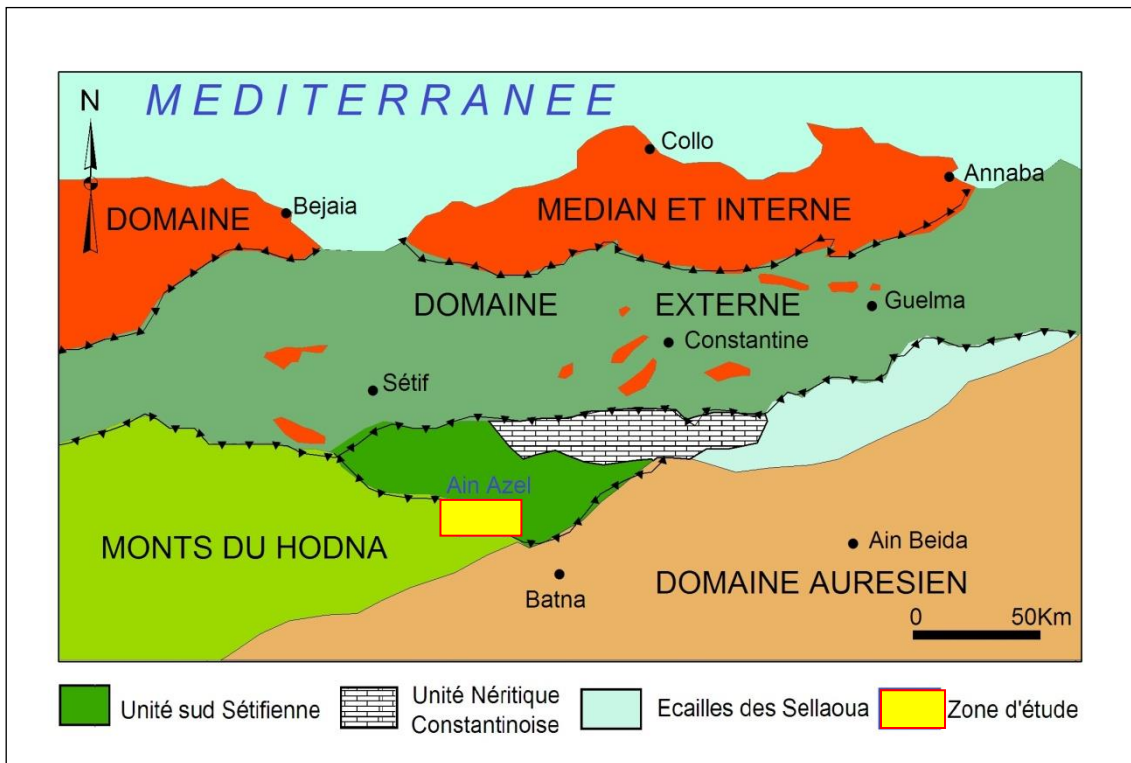
### I.3.1. LES DIFFERENTS DOMAINES PALEO GEOGRAPHIQUES DE LA CHAINE ALPINE

La chaîne des Maghrébides qui est un segment intégrant de la chaîne Alpine est considérée comme une paléo-limite entre l'Europe et l'Afrique (Bouillin, 1986). Le Nord Algérien est une portion de cette chaînes Maghrébides.

En Algérie cette chaîne est structurée en trois grands domaines (Fig. I.4) :

On distingue du Nord vers le Sud:

- Le domaine interne** : Il est représenté en Algérie par un chapelet de massifs, anciens littoraux bordés au Sud par la dorsale kabyle (chaîne calcaire)
- Le domaine des flyschs**: se caractérise par des formations de la plaine abyssale
- Le domaine externe**. Il correspond à un segment de la marge septentrionale de l'Afrique caractérisé par des nappes superficielles Crétacé-Paléogènes à matériel marno-calcaire, recouvrant le miocène.
- Le domaine de l'avant pays para-autochtone et autochtone** : La région étudiée se situe dans la wilaya de Sétif constitue la limite septentrionale des monts du Hodna, ces derniers appartiennent à l'avant pays autochtone de la Chaîne alpine de l'Algérie orientale. Du point de vue géologique, cette région du Nord-est Algérien fait partie des monts du Hodna et se trouve à la jonction des hautes plaines sétifiennes et de l'atlas saharien.



**Fig. I.4.** Contexte structural du domaine d'étude (D'après Wildi .1983) Modifiée

C'est une région qui a été le témoin d'une tectonique intense, où se sont manifestées plusieurs phases tectoniques tangentielles, qui ont engendré des recouvrements importants et impliquant même des formations miocènes.

L'étude géologique des monts du Hodna a fait l'objet de travaux de plusieurs auteurs : J. Savornin (1920), J ; Glaçon (1952, 1955 et 1963), J. Bertraneu (1955), R. Guiraud (1973) et enfin J.M. VILA (1980).

### **I.3.1.1. LES ZONES DU DOMAINE INTERNE**

Il est représenté par les massifs anciens ou cristallins appelés socle Kabyle ou Kabyliques, bordés à leurs parties méridionales par les formations de couverture qui se présentent en écaillles appelées la Dorsale Kabyle (Durant Delga, 1967). Le socle est formé principalement de roches métamorphiques (gneiss, marbres, phyllades et amphibolites).

Au cours du cycle alpin, les formations du socle et de la dorsale kabyle ont été largement charriées vers le Sud sur le domaine des flyschs.

#### **I.3.1.1.1. LE SOCLE KABYLE**

Le socle kabyle constitue l'essentiel du domaine interne. Il est composé de massifs littoraux cristallophylliens métamorphiques (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes) et d'un ensemble sédimentaire paléozoïque (Ordovicien à Carbonifère) peu métamorphique. Ce socle affleure d'ouest en est dans les massifs du Chenoua (à l'ouest d'Alger), d'Alger, de Grande Kabylie et de Petite Kabylie (entre Jijel et Skikda). Ce dernier, avec 120 km de long et 30 km de large, constitue le plus large affleurement du socle kabyle en Algérie. Le complexe métamorphique de Grande Kabylie qui est le plus important des massifs est une entité structurée en un empilement d'unités tectono-métamorphiques (Gani, 1988 ; Loumi, 1989 ; Benkerou, 1989 ; Bettahar 1989 ; et Saadallah, 1992). Cette structuration se retrouve également plus à l'Est dans le massif de petite Kabylie (Mahjoub, 1990) et dans le massif de l'Edough (Caby et Hammor, 1991).

Ce schéma géologique est actuellement admis par la plupart des géologues des Maghrébides.

Plus récemment l'ensemble des socles kabyles a été interprété comme la partie supérieure du « métamorphiccorecomplex » défini par Caby et al, dans l'Edough (Saadallah et Caby, 1993).

Les massifs de socle sont revêtus d'une couverture sédimentaire Paléozoïque fossilifère souvent peu ou pas métamorphique (fig. I.3). Par endroits ces derniers sont recouvert, en discordance, par des dépôts détritiques (principalement mollassiques) d'âge Oligocène supérieur – Miocène inférieur, appelés Oligo-Miocène Kabyle (OMK)

#### **I.3.1.1.2. LA DORSALE KABYLE**

Cette chaîne a fait l'objet d'étude de plusieurs auteurs : M. Durand Delga 1969 (il est le premier à avoir proposé le terme de dorsale kabyle).

Le socle kabyle est bordé au Sud par les unités mésozoïques et cénozoïques de la Dorsale Kabyle appelée parfois « chaîne calcaire » à cause de l'importance du Jurassique inférieur calcaire. Ce domaine est exceptionnellement étroit et ne dépasse jamais quelques km de largeur. Le premier affleurement de la dorsale kabyle en Algérie est situé au cap Ténès. On la retrouve ensuite dans le massif du Chenoua puis au Sud- Est d'Alger où elle constitue d'importants reliefs sur plus de 125 km de long (massifs de Larba, de Bou Zegza et du Djurdjura). Elle apparaît ensuite au Nord de Constantine (Dj. Sidi Dris) et on la suit sur 90 km jusqu'au Sud d'Annaba (Zit Emba). Elle constitue une limite paléogéographique majeure entre l'Afrique et le domaine septentrional AlKaPeCa (Alboran, Kabylies,

Peloritain et Calabre), lié à la marge Sud de l'Europe. La dorsale kabyle se présente sous forme d'écaillés d'âge permo-triasiques à Eocène moyen-Lutétien- (J.F.Raoult ; 1975), reposant en discordance sur les formations paléozoïques.

En général, la dorsale kabyle est caractérisée par un style tectonique en écaille. Ces écaillés comprennent également des formations paléozoïques ainsi que des terrains de l'Éocène supérieur et de l'Oligocène.

La Dorsale Kabyle est subdivisée du Nord vers le Sud en trois unités plus ou moins individualisées et caractérisées par leur lithostratigraphie respective (J.F.Raoult, 1974 ; J.M.Villa, 1980) :

- la dorsale interne ;
- la dorsale médiane ;
- la dorsale externe.

Ces unités, sont séparées par des limites correspondent à des accidents cisailants. (Boillot, 1984 ; Lemoine, 1955 ; Bouillin, 1986).

En général, les faciès traduisent des conditions de sédimentation de plus en plus profondes lorsque l'on passe des formations de la dorsale interne (dépôts littoraux ou épicontinentaux) à celles de la dorsale médiane (dépôts marneux et plus profonds du Crétacé à l'Eocène) puis aux formations de la dorsale externe (qui montrent souvent des radiolarites au Dogger-Malm) (Bouillin, 1986).

#### **a). La dorsale interne :**

Elle est très souvent condensée et montre nettement du Sud au Nord un amincissement de ses séries, Cette dorsale est caractérisée par une série transgressive sur le substratum paléozoïque. Elle débute par des microconglomérats du Permo-Trias, un Trias supérieur et un lias basal à calcaires néritiques et des calcaires du Néocomien, suivis par une lacune jusqu'au Sénonien supérieur. Puis vient un Paléocène – Yprésien caractéristique formé de calcaires du Nummulitique.

#### **b). La dorsale médiane :**

C'est la plus développée de la dorsale kabyle (J.flandrin, 1952) et occupe une position centrale dans le dispositif structural du Djurdjura.

Elle est particulièrement déformée et limitée au Nord par les formations métamorphiques de Grande Kabylie et les terrains primaires de la dorsale interne par l'intermédiaire d'une zone tectonique importante. Au Sud, elle chevauche les formations de la dorsale externe.

Elle est aussi caractérisée par un Lias inférieur très développé et ne montre pas en général de différences avec celui de la dorsale interne.

#### **c). La dorsale externe :**

Elle est chevauchée par les formations de la dorsale médiane. Elle se caractérise par une série détritico-lacustre avec un faciès intermédiaire entre la dorsale interne et médiane du Crétacé à l'Éocène.

On peut conclure qu'en général, les faciès traduisent des conditions de sédimentation de plus en plus profondes lorsque l'on passe des formations de la dorsale interne (dépôts littoraux ou épicontinentaux) à celles de la dorsale médiane (dépôts marneux et plus profonds du Crétacé à l'Eocène) puis aux formations de la dorsale externe (qui montrent souvent des radiolarites au Dogger-Malm), (Bouillin, 1986).

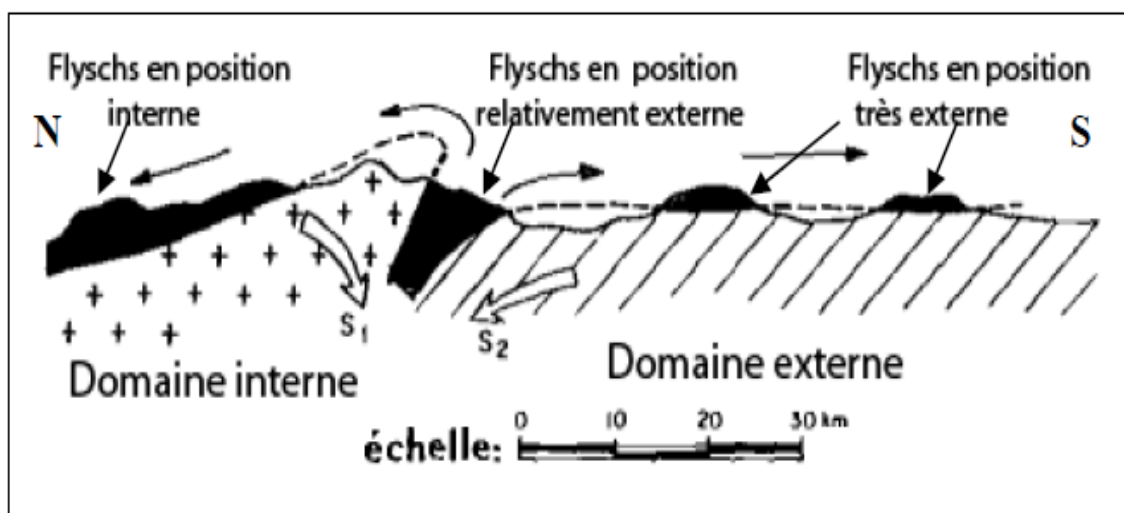
#### **I.3.1.1.3. LE DOMAINE DES FLYSCHS**

Est constitué par des nappes de flyschs crétacés-paléogènes qui affleurent dans les zones littorales sur 800 km de long, entre Mostaganem et Bizerte (Tunisie). Il s'agit essentiellement de dépôts de mer profonde mis en place par des courants de turbidités.

Ce sont des nappes de flyschs avec une dominante carbonatée. Découplés de leur substratum initial, (J.P. Bouillin, 1986), ils englobent des formations plissées et écaillées. Les flyschs kabyles se présentent sous trois dispositions distinctes (Fig. I.5).

- En position interne, superposées aux massifs kabyles, c'est-à-dire rattachées sur les zones internes, et appelées flyschs Nord-kabyles ;





**Fig. I.5.** Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la Chaîne des Maghrébides, (J.P. Bouillin, 1986).

- En position relativement externe à la bordure Sud de la Dorsale kabyle (flyschs Sud-kabyle)
- En position très externe, sous forme de masses isolées flottant sur le Tell charriées jusqu'à une centaine de kilomètres au Sud.

Les flyschs crétacés-paléogènes maghrébins sont répartis en deux groupes fondamentaux du Nord au Sud : les flyschs maurétaniens (J.P. Gélard, 1969) et les flyschs massyliens (J.F. Raoult, 1969) auxquels s'ajoute une troisième série plus récente (Oligo-Oligocène supérieur – Burdigalien inférieur miocène), le flysch numidien.

**a). Le flysch mauritanien** (P.E. Coiffait, 1992) :

Il montre des faciès allant du Néocomien à l'Oligocène, relativement épais qui occupent une position interne dans le domaine des flyschs. Il est composé d'alternances de bancs calcaires, des argileux, et gréseux. La série débute par des radiolarites rouges du Dogger-Malm, ensuite des calcaires fins alternant avec des marnes schistosées d'âge Tithonique-Néocomien surmontés par des niveaux conglomératiques du Paléocène puis des grés d'âge Éocène à Oligocène.

**b). Le flysch Massylien** (P.E. Coiffait, 1992) :

Il occupe une position externe dans le domaine des flyschs.

C'est un ensemble de formations qui présente des termes du Néocomien (Crétacé inférieur) calcaro-gréseux à l'Éocène inférieur et comporte en outre, le flysch « Albo-Aptien », le Cénomano-Turonien à phtanites et le Sénonien à microbrèches.

### **c). Le flysch numidien**

Il constitue une nappe indépendante d'âge Oligocène supérieur à Miocène inférieur et recouvre indifféremment toutes les unités de cet édifice et comprend, (P.E. Coiffait, 1992) :

- des argiles sou-numidiennes à tubotomaculum (Oligocène supérieur) ;
- des grés numidiens en bancs (Aquitaniens -Burdigaliens inférieurs) ;
- des argiles et des marnes claires à silexite « supra-numidienne », (Burdigaliens inférieurs).

#### **I.3.1.2. LES ZONES DU DOMAINE EXTERNE**

Segment de la marge septentrionale de l'Afrique caractérisé par des nappes superficielles, Crétacé-Paléogènes à matériel marno-calcaire, charriées pendant le Miocène inférieur vers le Sud sur un parautochtone. Paléogéographiquement du Nord vers le Sud, on distingue (Durand Delga, 1969 ; J.F.Raoult, 1974 ; Bouillin, 1977 ; J.M.Villa, 1980).

##### **I.3.1.2.1. LES SERIES ULTRA-TELLIENNES**

Elles forment un ensemble particulièrement homogène qui comporte un Crétacé marneux et un Eocène caractérisé par des marnes sombres avec intercalations de calcaire à silex noir. Ces séries n'affleurent de façon notable qu'à l'Est du Djebel Sidi Driss (J.F.Raoult, 1968) puis se développent au Djebel Bou Sbaa au Nord du Guelma (J.M.Villa, 1968).

##### **I.3.1.2.2. LES SERIES TELLIENNES (SENSU STRICTO)**

Elles vont du Trias au Lutétien. A un Lias de plateforme succèdent un Dogger et Malm marneux, le Cétacé d'abord détritique devient marneux à argilo-calcaire, l'Eocène se caractérise par des marnes épaisses avec un Yprésien calcaire. Ces séries sont groupées en cinq unités :

- les nappes Baboriennes (D.Obert, 1981) ;
- les unités Bibaniques (A. Caire, 1957 ; Leikime, 1971) ;
- les nappes de Djemila, béni Abdallah, Barbacha, Drâa el Arba.
- les unités Gouraya, Arablou, Brek.
- les nappes Sétifiennes à matériel Éocène (M.Leikime, 1971 ; D.Obert, 1981).

##### **I.3.1.2.3. LES SERIES PENI-TELLIENNES (et leur couverture éocène à nummulites), J.M.Villa, 1977**

Les formations péni-telliennes, sont à faciès néritique prépondérant, d'âge Crétacé supérieur à Eocène. Dans l'Est Algérien ces séries montrent de grandes affinités avec l'unité néritique constantinoise et les unités Sud-Sétifiennes.

Des unités plus externes et d'allochtonie remarquable structurées au Miocène moyen se répartissent dans le domaine externe. Elles sont appelées séries de l'avant-pays allochtone et se localisent entre les nappes telliennes au Nord et l'autochtone ou para-autochtone atlasique au Sud.

Ce sont des séries différenciées, allant du Trias supérieur à l'Éocène. Elles supportent les nappes telliennes au Nord et surmontent l'autochtone Nord Aurésien. On distingue deux organisations (J.M.Villa, 1980).

#### **I.3.1.2.4. L'ORGANISATION SETIFIENNE**

Ensemble formé de séries qui ont un caractère « de plateforme subsidente », daté du Jurassique inférieur jusqu' à l'Eocène. Ce sont les massifs qui apparaissent en fenêtre sous les nappes telliennes septentrionales (Djebels Guergour, Anini, Zdimm etc..), et en demi-fenêtre dans les Monts du Hodna et Belezma (Djebels Sékrine, Kalaoun, Mestaoua etc...).

#### **I.3.1.2.5. L'ORGANISATION CONSTANTINOISE**

Elle regroupe le môle néritique constantinois et le sillon écaillé de Sellaoua situé plus au Sud.

##### **a). Le môle néritique constantinois**

Ce sont des formations carbonatées du Mésozoïque (J.M. Vila, 1980). Ils correspondent à des reliefs calcaires caractérisés par la tectonique cassante et des plissements à grand rayon de courbure lors des phases tectoniques alpines. Ces derniers constituent l'essentiel des massifs de Tadjenanet, d'Oued Athménia, de Constantine, d'Aïn M'lila, d'Hammam Meskhoutine et de Guelma.

##### **b). Le sillon écaillé de Sellaoua**

Il est représenté par des formations allochtones à sédimentation argilo-marneuse et marno-calcaire allant du Valanginien à la fin du Maestrichtien. Les plissements datent de l'Eocène supérieur, les écaillages et les chevauchements du Tortonien.

### **I.3.1.2.6. L'AVANT PAYS AUTOCHTONE :**

C'est un vaste domaine comprenant d'Ouest en Est les monts du Hodna, de Belezma, des Aurès et du Mellègue et plus au Sud, la vaste zone de diapirs représentée par les Djebels d'El Ouasta, d'Ouenza-Boukhadra, de Mesloula, etc...La sédimentation reste homogène à faciès de plateforme subsidente, envahie par une sédimentation gréseuse qui débute au Berriasien et se termine à l'Albien (J.M.Villa, 1980).

Les formations ont conservé des structures plissées acquises de la tectonique fini-Eocène ou « Phase atlasique » : Cet autochtone est bordé au Nord par une marge particulièrement accidentée marquée par des phénomènes tectoniques alpins importants (écaillage, renversement de séries...) définissant ainsi des éléments parautochtones et délimitant le « front Sud Sétifien » de l'édifice Alpin

### **I.3.2.LES DIFFERENTES 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.

#### **I.3.2.1. LES EVENEMENTS TECTONIQUES DURANT LE MEZOZOIQUE**

A l'échelle des zones externes de l'Algérie Nord orientale, les événements tectoniques durant cette époque sont peu étudiés. Les travaux réalisés jusqu' à présent s'accordent sur les événements suivants :

##### **I.3.2.1.1. AU TRIAS**

Le Trias correspond à une période d'extension généralisée qui affecte le domaine Atlasique. Les bassins triasiques en Algérie ne sont connus que localement et en subsurface. La présence des pélites et des évaporites très épaisses dans l'ensemble des domaines externes du Tell témoignent d'une forte subsidence à partir du Trias moyen et supérieur qui est facilitée sûrement par cette période de distension généralisée. Les séries évaporitiques (sédimentation argilo-gypseuse) sont accompagnées de coulées basaltiques et de carbonates du Keuper (Benabbas C., 2006).

##### **I.3.2.1.2. AU LIAS**

La distension provoque une subsidence différentielle. Celle-ci se poursuit jusqu'au Crétacé inférieur, permettant de la sorte la création de bassins marins ouverts dans les hauts atlas sahariens, '*Rifting et ouverture, subsidence et installation de la mer ouverte*' Wildi W., (1983).

La plate forme constantinoise se distingue dès la fin du Lias comme un haut-fond à sédimentation calcaire dominante, (Guellal S., et al, 1973a).

### **I.3.2.1.3. AU JURASSIQUE MOYEN ET SUPERIEUR**

A cette période, l'approfondissement et le caractère océanique des milieux sédimentaires se confirment et s'accroissent. Le bloc africain est décalé par un coulissage senestre par rapport à l'Ibérie et au bloc Alboran à partir de 165 Ma (*Ouverture et coulissage*), engendrant probablement les premiers plissements dans les Babors vers la fin du Malm, avec des axes de plis d'orientation N-S.

Le Malm représente la fin d'une période de distension et de subsidence caractérisant le Lias et le Dogger.

Dans les zones telliennes, les structures associées à la tectonique du Malm sont attestées par des discordances angulaires marquant la base du Crétacé inférieur.

Plus au Sud, dans l'avant pays, la phase Jurassique supérieure se manifeste par une sédimentation terrigène au cours du Néocomien sans discordance angulaire notable, Wildi W., (1983).

### **I.3.2.1.4. AU CRETACE**

#### **a). Crétacé inférieur**

Aucune phase tectonique importante n'est connue à cette époque ni en Ibérie ni en Afrique. L'origine du dépôt des sédiments détritiques sur la bordure Nord de l'Afrique et sur le continent ibérique ne serait pas tectonique mais climatique.

D'après l'interprétation des anomalies magnétiques dans l'atlantique Nord, les coulissages senestres E-W entre l'Ibérie et l'Afrique s'arrêtent pratiquement dès l'Aptien supérieur (110Ma), Wildi W., (1983).

Suivant une transversale régionale, au Crétacé inférieur on peut noter une alternance de régressions et de transgressions individualisant ainsi des zones sédimentaires préfigurant déjà les unités structurales majeures, tel le domaine néritique, qui dès cette période, apparaît comme un entablement massivement

carbonaté situé entre deux zones vaseuses, Guellal S., et al, (1973).

### **b). Au Crétacé supérieur**

Au Crétacé supérieur, il semble qu'un épisode tectonique important correspondant au Cénomaniens inférieur a eu lieu. En effet sur la bordure Sud-ouest de la plate-forme néritique constantinoise et dans le Sud Sétifien, la sédimentation devient planctonique. Les marnes pélagiques succèdent aux calcaires. Ce changement peut être relié à un épisode tectonique entraînant un relèvement du niveau eustatique. Cet épisode tectonique est le plus souvent traduit dans la sédimentation par une surface durcie (Hard-ground) observable dans plusieurs massifs (Oum Settas particulièrement). Cette phase correspond à une phase compressive, qui coïncide avec le début de la rotation anti-horaire de l'Ibérie par rapport à l'Europe. Cette phase compressive a engendré des plis orientés E-W ainsi qu'une forte schistosité de fracture dans les Babors affectant les niveaux anté-fracas. Elle est orientée conformément aux plissements E-W à SW-NE. Des évaporites triasiques se trouvent remaniées et resédimentées dans des formations qui datent de l'Albien supérieur au Sénomaniens inférieur surtout.

A cette époque la différenciation paléogéographique, apparue au Crétacé inférieur, se poursuit et s'accuse par le fonctionnement des zones positives et négatives. Dans le domaine néritique, la construction de l'entablement carbonaté s'achève avec l'émergence définitive de la fin du Crétacé supérieur. Cette émergence est confirmée par Guellal S et al, (1973).

- Remaniement conglomératique du Fracassien-Turonien dans le Sénomaniens dans la partie Nord du domaine néritique (massif de Chettaba).
- Présence de nombreux hard-grounds.
- Turonien localement érodé ou absent.
- Faciès néritique en lentilles (massif de Karkara)

### **I.3.2.2. LES EVENEMENTS TECTONIQUES DURANT LE TERTIAIRE**

La chaîne alpine de l'Algérie Nord orientale s'est surtout structurée pendant les phases tertiaires.

#### **I.3.2.2.1. A L'EOCENE : *Phase priabonnaise***

Cette phase compressive se situe vers la fin du Lutétien, appelée phase *fini-lutétienne* ou *phase atlasique* d'après Durand Delga M., (1969) et Raoult J.F., (1974) ou encore phase *priabonnienne* selon Vila J.M., (1980).

Elle marque la fin d'un grand cycle sédimentaire ayant débuté dès le Trias supérieur, et dont l'organisation n'a pas été perturbée malgré des manifestations tectoniques locales enregistrées avant le Cénomaniens, Aris Y., (1994).

Cette phase compressive est expliquée par la fermeture de la Téthys occidentale par la rotation de l'Afrique autour d'un pôle situé à l'Ouest de Tanger, conduisant à la collision entre la partie orientale de l'Alboran et la marge Africaine tellienne. Dans les zones internes la position relative E-W de la Kabylie par rapport au Tell est bloquée dès l'Eocène supérieur. Elle est associée à un métamorphisme régional, Wildi W., (1983).

Cette phase est associée à des accidents verticaux de direction NE-SW tels que l'accident N45°-50° E d'El Kentour qui se prolonge jusque dans l'avant pays au Sud-Ouest, entre les monts du Bélezma et ceux du Hodna correspondant à la transversale de Constantine.

#### **I.3.2.2.2. AU MIOCENE**

##### **a). *Phase compressive du Burdigalien***

La phase Miocène est caractérisée par une direction de raccourcissement N-S. La partie occidentale de la plaque d'Alboran continue sa migration vers l'Ouest, pour entrer finalement en collision avec la marge rifaine de l'Afrique. Cette migration contribue à l'ouverture du bassin Nord algérien. Cette phase se manifeste par :

- L'avancée de la nappe numidienne vers le Sud et la formation des olistostromes kabyles dans une dépression septentrionale.
- Un bombement à l'aplomb du bord kabyle méridional, où s'étaient antérieurement empilées les unités de flyschs sur les nappes telliennes au Priabonien.
- Des structures plissées, au Sud du domaine kabyle. A la fin du Miocène inférieur et au début du Miocène moyen, des bras de mer envahissent des golfes de la partie septentrionale des chaînes algériennes. Dans les Babors, les premiers sédiments post-nappes marins se déposent. Cette transgression va de pair avec une phase volcanique calco-alcaline et un plutonisme qui a mis en place les intrusions granitiques en grande Kabylie, dans les Babors et en petite Kabylie. Les datations radiométriques y indiquent souvent des âges entre 12 et 16 Ma.

### ***b). Phase tangentielle tortonienne – phase alpine***

Pour Vila J.M., (1980), c'est la phase tortonienne majeure, à vergence Sud qui est responsable de vastes raccourcissements impliquant les formations postérieures au Burdigalien supérieur dont la nappe numidienne. Toujours selon le même auteur, cette phase serait responsable de la genèse de la nappe néritique constantinoise, des unités allochtones des Sellaoua, de l'ensemble «Sud-Sétifien» et des «unités méridionales à nummulites».

Cette phase a engendré dans l'ensemble de Algérie Nord orientale des chevauchements vers le Sud des unités méridionales à nummulites, des unités Sud-sétifiennes et des écaillés de Sellaoua, ainsi que des plissements à axes E-W des monts du Hodna jusqu'à la transversale de l'Aurès. La genèse des « plis emboutis » qui s'interfèrent et reprennent les plis éocènes.

Pour revenir à la notion de tectonique tangentielle tortonienne selon Vila J.M., du Nord au Sud et de haut en bas de l'édifice structural on distingue :

- La zone intermédiaire est fortement plissée (Burdigalien-Langhien).
- La zone nappée méridionale, où se manifestent de vastes mouvements anormaux, impliquant les formations postérieures au Burdigalien supérieur.
- Les nappes telliennes sont reprises en bloc.
- L'ensemble allochtone Sud-Sétifien constitue un empilement de lames en série normale.
- La nappe néritique constantinoise et les unités allochtones de type Sellaoua relaient en plan l'ensemble allochtone Sud-Sétifien vers l'Est.

### **I.3.2.3. LA TECTONIQUE RECENTE**

Cette phase tectonique post-nappes est responsable de l'orographie actuelle. Elle a induit le comblement des bassins Mio-Pliocènes, alimentés par la destruction des reliefs environnants.

A l'échelle du Constantinois, les structures attribuées à cette tectonique évoquent une tectonique polyphasée. En effet, deux phases successives de distension et de compression ont affecté les formations tortoniennes, entraînant ainsi un resserrement des structures préexistantes, et la formation de plis qui s'alignent en gros sur la direction atlasique. Parmi ces plis on note ceux de Djebel Ouahch, du massif du Chettaba et du Djebel Djaffa.



Par ailleurs, des failles inverses parfois décrochantes ou chevauchantes ainsi que des déformations cassantes de direction E-W et NW-SE, tel l'accident de M'cid Aïcha-Debbar d'une centaine de kilomètres, peuvent être observées. Le long de cet accident, des chevauchements Nord-Sud post-miocène sont localement signalés, Guellal S., et al, (1973).

### **I.3.3.GEOLOGIE DES MONTS DU HODNA**

#### **I.3.3.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE**

Les monts du Hodna s'étendent entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien, dont ils font partie, coupant les hautes plaines en deux parties inégales<sup>2</sup> et dominant la région déprimée du bassin du Hodna. Les monts constituent géologiquement et humainement une réplique de l'Aurès en plus petit.

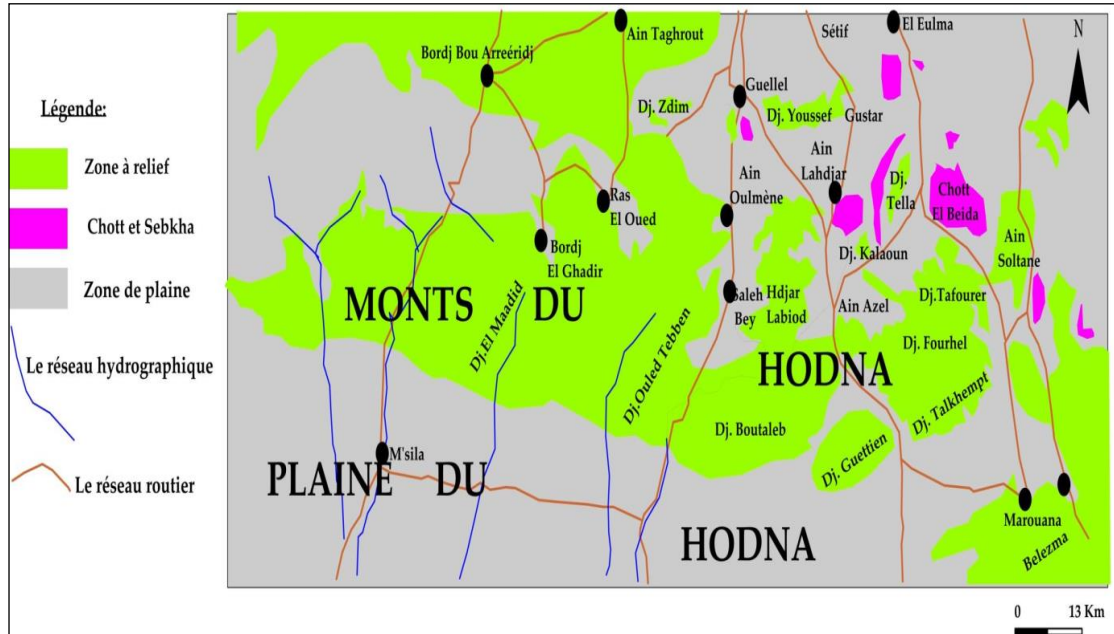
La chaîne des monts du Hodna assure la liaison orographique entre les monts des Bibans et de l'Aurès.

Cette chaîne est formée, du Nord-ouest au Sud-est, par les monts des Ouennougha, les monts des Maadid, le Bou Taleb, les monts des Ouled Sellem et le Belezma.

Les Monts du Hodna constituent un ensemble montagneux localisé entre deux chaînes : (Fig. :I.6). L'Atlas Saharien au Sud et l'Atlas Tellien au Nord.

Les chaînons et les massifs constituant les Monts du Hodna d'orientation Est-Ouest sont séparés par des dépressions, caractérisant ainsi les paysages hodnéens et on distingue d'Ouest en Est :

- La chaîne de Tarf Djedough - Mansourah
- L'Anticlinal de Ouled Tebbène et le Djebel Boutaleb (arrière pays de Djebel Labiod)
- Le Djebel Guétiane
- Le Djebel Gouzi, le Djebel Tazila, et le Djebel Fourhal.



**Fig. I.6.** Localisation des monts du Hodna

### I.3.3.2. SITUATION GEOLOGIQUE

D'après de nombreux auteurs, et plus particulièrement J. SAVORNIN (1920) et J. GLACON (1967), plusieurs ensembles sont à distinguer (Fig. I.7).

-Au Sud, l'autochtone essentiellement carbonaté, d'âge Jurassique et crétacé, représenté dans la partie orientale des monts du Hodna par les Djebel Boutaleb et Fourhal d'allongement ENE – NSN.

-Un avant-pays hodnéen autochtone à para-autochtone correspondant aux dépressions d'Aïn-Azel et Salah Bey à l'Ouest, séparées par Djebel Hadjar Labiod ;

- Au Nord, le domaine des nappes de charriage avec l'ensemble allochtone Sud-Sétifien représenté du Sud au Nord par :

- L'unité inférieure de Djebel Kalaouan,
- L'écaille de Djebel Sekrine,
- L'écaille d'Aïn-Lahdjar,
- L'écaille de Djebel Youssef.

Le Trias affleure en plusieurs endroits, dans le Djebel Gouzi, Koudiat-Bassour et Drâa El Djebbas et ce à la faveur d'un grand accident ou front de chevauchement où il aurait probablement joué le rôle d'une semelle de glissement pour les nappes de charriage (Fig. I.7)

### **I.3.3.2.1. APERÇU LITHOSTOGRAPHIQUE**

Les différentes séries constituant les Monts du Hodna, peuvent être définies du Trias au Miocène (Fig.I.7)

#### **a) Le Trias :**

Le trias jalonne les zones de dislocations et plus précisément le front Sud Sétifien. On le rencontre dans les zones les plus tectonisées (zones de changement de direction des plis et des fronts de chevauchement). On l'observe dans la région d'El Bahira, Kef-Maâfer et Koudiat Bassour. Il est constitué de masses d'argiles bariolées accompagnées d'un chaos de roches : brèches dolomitiques, cargneules, amas de gypse, brèches de schistes micacées, avec parfois des fragments de cristallin et de roches vertes, en continuité avec la série de l'infra-Lias (Rhétien ou Hettangien) calcaro- dolomitique rubanées noire ou grise (J. Glaçon, 1967)

#### **b) Le Jurassique:**

Les formations du Jurassique constituent l'ossature de plusieurs chaînons des mots du Hodna, mais elles n'occupent que des surfaces réduites à l'affleurement (Talkhempt – Dabba – Hadjar Labiod – oued Tebbène). Ces formations ont été définies par J. Glaçon (1952 –1963), Bertraneu (1955) et R. Guiraud (1973).

#### **-Le Jurassique Inférieur (Lias) :**

L'essentiel du Lias est constitué par de grosses masses de dolomies, de calcaires et de calcaires dolomitiques, ne renfermant aucune association faunistique caractéristique. C'est au sommet du Lias qu'apparaissent les premiers niveaux fossilifères associés à un changement brusque de la sédimentation. Ces niveaux d'une faible épaisseur (20m) sont datés par des ammonites (Hildocéras) ; ils caractérisent des faciès type « Ammonitico-Rosso » inférieur (Guiraud - 1973).

#### **- le Jurassique Moyen (Dogger) :**

Le Dogger est représenté par un ensemble de calcaires et de dolomies à intercalations de marnes.

Les bans calcaires sont peu épais (décimétriques), mais se développent sur une grande épaisseur (300 à 350 m), succèdent normalement à l'Ammonitico-Rosso inférieur.

Cet ensemble représenterait le Dogger dont la base coïncide avec l'apparition de calcaires à filaments, ainsi que de gros bancs de calcaires sont micritiques, riches en silice,

se terminant par des niveaux de calcaires argileux noduleux rouges violacés, verdâtres à beige, referment souvent des restes d'ammonites mal conservés.

Par leur faciès et leurs positions stratégiques, ces couches épaisses de 10 à 15 m constituent « l'Ammonitico-Rosso » supérieur (R. Guiraud - 1973).

**- *Le Jurassique Supérieur (Malm) :***

Le Malm est constitué par une puissante série marno-calcaire, grise à gris bleuté, à dominante marneuse (250m à 300m).

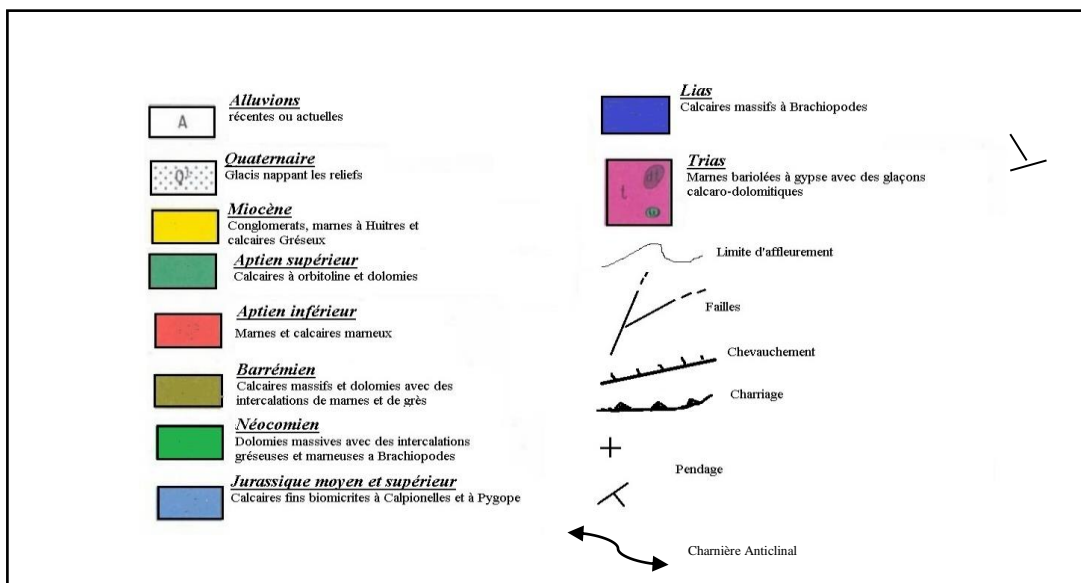
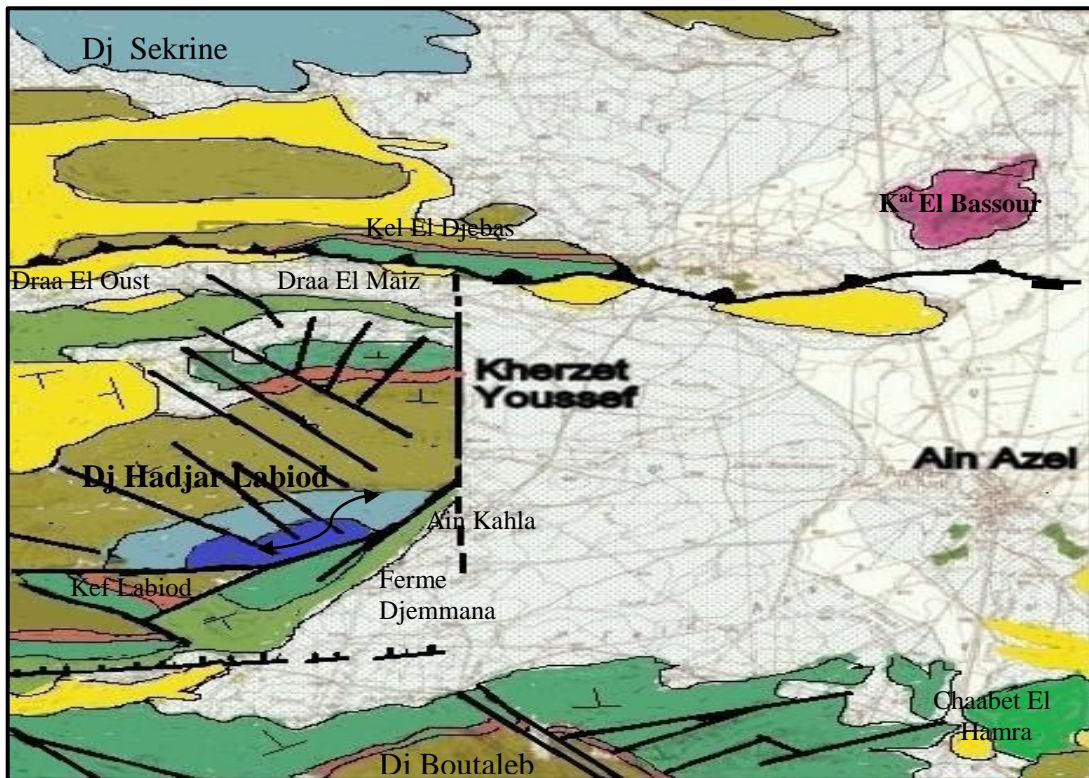
Sur cette série, repose une puissante formation calcaro-marneuse (350 m environ), constituée par de petits bancs calcaires gris-noir et des interlits marno-calcaires. Elle est datée du Tithonique inférieur au Berriasien moyen.

**c) Le Crétacé:**

**-*Le Crétacé inférieur :***

-Le Néocomien d'une épaisseur de 200m affleure dans le Djebel Hadjar Labiod et en quelques points de Djebel Gouzi où il est transgressif sur le Jurassique supérieur. Son contact avec le Néocomien est matérialisé par hard Ground (BENZERGA – 1974).

Il débute par des marnes calcaires et des calcaires à grains fins en petits bancs à débris d'ammonites d'une épaisseur de 60 à 80m datés du Berriasien. La série se poursuit par des argiles et des marnes vertes avec de petits bancs de grès et de pélites vertes d'une épaisseur de 180 à 200m.



**Fig.I.7.** Carte géologique des environs de la mine de Kherzet Youssef et sa légende (D'après la Carte géologique au 1/50.000 d'Aïn-Azel, Sonatrach, 1977).

- L'Hauterivien : d'une épaisseur de 200m environ, il affleure à Chaâbet-El-Hamra où il débute par un niveau argileux surmontant un niveau de calcaires à crinoïdes. La série se termine par un ensemble dolomitique.

- Le Barrémien : d'une épaisseur de 650 à 700m présente de larges affleurements au niveau de la mine Kherzet Youssef, au Nord Est de Djebel Hadjar Labiod, Djebel Boutaleb et

Djebel Gouzi. On note la présence d'un petit affleurement au niveau de Djebel Fourhal. Le Barrémien est constitué de la base au sommet par :

- Des grès et des niveaux dolomitiques.
- Des calcaires graveleux.
- Des calcaires à algue
- Des grès.

- L'Aptien couvrant presque la totalité de Djebel Fourhal est constitué par une série de 350 m d'épaisseur représentée par :

- Des marnes jaunes et vertes gréseuses à intercalations de calcaires à orbitolines
- Un niveau dolomitique épais.
- Calcaires gréseux, des grés et des calcaires à Sudistes avec quelques intercalations marneuses.

- L'Albien d'une épaisseur de 200m, représenté sur les flancs Nord et Sud de Djebel Hadjar Labiod, montre :

- Un Albien inférieur bio-détritique
- Un Albien supérieur marneux à ammonites.

***-Le Crétacé Supérieur :***

- Le Vraconien affleure au Nord de Djebel Hadjar Labiod sur les flancs Nord de Djebel Gouzi et Djebel Fourhal, dans Drâa Bourioum et Ouled Tebbène. Il correspond à un ensemble de calcaires en petites dalles, de grès et de marnes gréseuses jaunes, son épaisseur totale est de 80 à 100m.

- Le Cénomani affleurant sur les mamelons de Drâa Aoura, au Nord de Djebel Hadjar Labiod et son flanc Sud, et en quelques points aux alentours de Aïn-Azel, est représenté par une série de 350 m d'épaisseur constitué par : Des calcaires marneux à la base surmontés par des marnes et se termine par des calcaires dolomitiques à rognons de silex.

- Le Turonien est constitué par des marnes et des calcaires dolomitiques d'une épaisseur totale de 100m.

- Le Sénonien basal forme une dépression très caractéristique à la périphérie de Djebel Ostmane et de l'anticlinal d'Ouled Tébbène à l'ouest d'Aïn-Azel. La série d'une épaisseur de 150 m débute par des marnes jaunes verdâtres sableuses à galets roulés et une barre de

quelques mètres de calcaires à galets dans les marnes. Le Sénonien supérieur est représenté au Djebel Ostmane près d'Aïn-Oulmène par des marnes sableuses à intercalation de calcaires argileux et marno-calcaires d'une épaisseur totale de 350 m.

#### **d) Le Miocène**

La série de néogène se subdivise en plusieurs cycles sédimentaires qui représentent la totalité du Miocène et du Pliocène. R. Guiraud (1973), on distingue dans le Miocène les cycles suivants :

**-Miocène 1** : C'est une formation continentale, parfois lagunaire, de couleur rouge. Elle repose en discordance sur le Mésozoïque, l'âge reste indéterminé.

**-Miocène 2** : Il est représenté par des conglomérats, des grès, des marnes et des argiles rouges. Il comporte ainsi successivement des formations continentales puis lagunaires et enfin marines. D'après Berggen (R. Guiraud 1973), le Miocène serait probablement aquitainien.

**-Miocène 3** : Ce Miocène se caractérise par des dépôts marins. L'essentiel du Miocène 3 est constitué d'une puissante série marneuse et marno-gréseuse. Il correspond très probablement au Langhien et au Tortonien (Glaçon, 1970).

**-Miocène 4** : Il correspond aux premiers dépôts post-nappes, il s'agit d'une sédimentation détritique continentale. Il comporte localement des passages gypseux lagunaires. Cet ensemble paraît correspondre au sommet du Tortonien (R. Guiraud, 1973). Il représente le Mio-Pliocène de J. M. Vila 1980.

#### **e) Le Pliocène :**

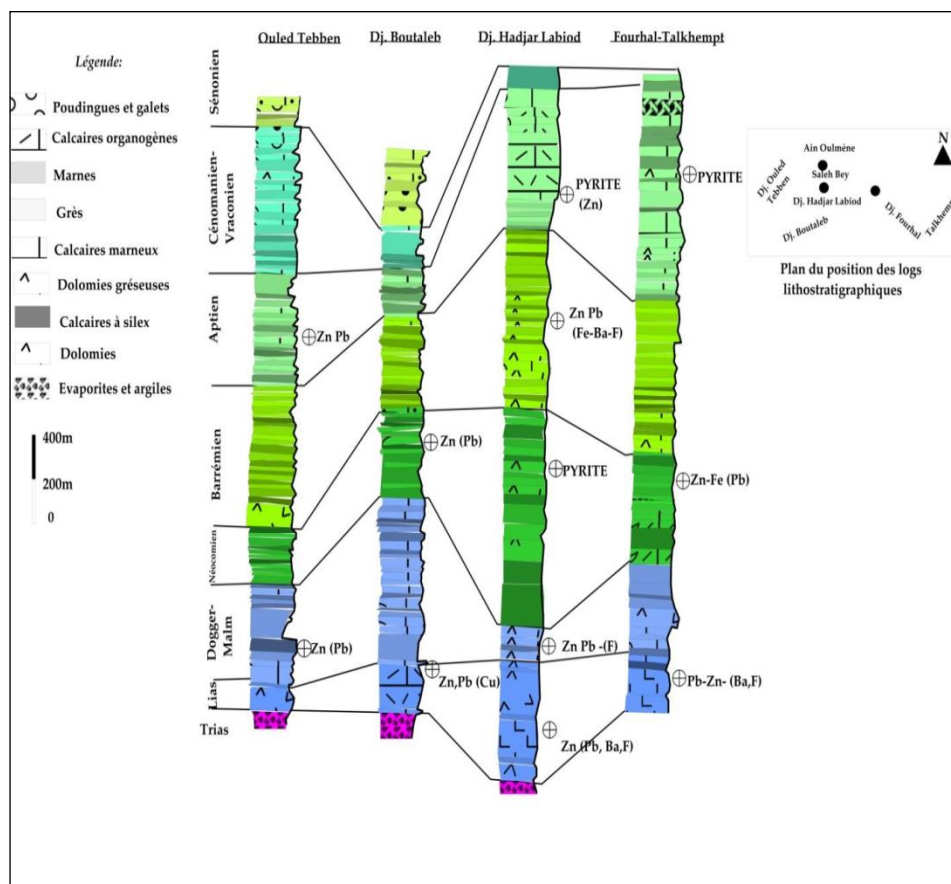
Il est généralement concordant sur le miocène. La série est d'abord détritique, à affinité deltaïque, puis marneuse et enfin envahie à son sommet par de Nouveaux apports conglomératiques.

#### **f) Le Quaternaire:**

Les formations du quaternaire des Monts du Hodna sont représentées essentiellement par des dépôts de pente qui sont fréquemment conservés au pied de certains reliefs. Ces faciès sont généralement fins, parfois lités ou grossiers, mais rarement

concrétionnés, ils peuvent se raccorder à des glacis et des terrasses, notamment dans les dépressions situées dans les Ouled Tebbène et le Djebel Boutaleb où les diverses formes montrent des étagements nets.

En conclusion, des colonnes lithostratigraphiques synthétiques et comparatives ont été réalisées sur l'ensemble des monts du Hodna par Boutaleb, 2001 (Fig. I.8).



**Fig. I.8.** Colonnes lithostratigraphiques synthétiques comparatives des Monts du Hodna (Compilation faite par Boutaleb, 2001)

### I.3.3.2.2. LA TECTONIQUE DES MONTS DU HODNA

Dans les Monts du Hodna, se distinguent deux unités Tectoniques séparées par le front Sud-Sétifien (Fig. : I.9).

-L'allochtone Sud Sétifien au Nord, constitué d'un vaste empilement d'écailles limitées par des cisaillements (J. VILLA 1980).

-L'autochtone Hodnéen au Sud, dont fait partie le Djebel Hadjar Labiod est affecté essentiellement par trois structures tectoniques liées à l'orogénèse Alpin qui sont :

#### a). Les failles :



L'analyse du réseau de failles permet de distinguer plusieurs familles d'accident tectoniques qui affectent les terrains carbonatés du Jurassique et du crétacé. Il s'agit :

- les failles de Direction NE-SW et NW-SE très nettes au Djebel Boutaleb et Djebel Hadjar Labiod

- des failles de direction EW de plus grande importance affectant surtout les formations de Djebel Hadjar Labiod et Djebel Fourhal. Elles se sont formées lors du plissement au moment de la formation du grand anticlinal du Hodna. D'après J. Bertraneu (1955) cet événement se place dans la phase tectonique emschérienne.

- une faille importante de direction N-S (faille de Kherzet Youssef) affectant le crétacé du Djebel Hadjar Labiod sur son flanc Est.

#### **b). Les plis :**

Les plis ont généralement une orientation E-W et un WSW-ENE. La direction WNW-ESE correspond à des synclinaux à larges rayons de courbure, représentant l'ensemble de hauts reliefs avec des axes de direction :

- NW-SE tels que ceux observés au niveau de Djebel Sekrine, Djebel Kalaouan, Djebel Gouzi et Djebel Fourhal.

- NE-SW rencontrés au niveau de Djebel Hadjar Labiod et Djebel Boutaleb.

#### **c). Les Structures Diapiriques :**

Selon J. BERTANEU (1955) ; J. GLACON (1963) et J. M. Villa (1980), Les affleurements du trias diapirique se situent généralement dans la zone de convergence de deux directions des fractures (E-W et NW-SE ou NE-SW). D'après R. GUIRAUD (1973), la mise en place du trias est liée principalement à des contraintes compressives, c'est à dire à la phase priabonnienne et la phase tortonienne.

### **I.3.3.3.CADRE GEOLOGIQUE LOCAL**

#### **I.3.3.3.1. LOCALISATION DU SECTEUR D'ETUDE**

Le gisement de Kherzet Youssef, notamment l'usine de traitement appartient au flanc NE de chaînon de Hadjar Labiod qui culmine à 1371 m et correspond à une série monoclinale située sur la bordure septentrionale de l'autochtone Hodnéen (Fig. I.9.)

La bordure Est du massif de Hadjar Labiod est matérialisée par la faille méridienne de Kherzet Youssef- Drâa el Maïz qui sépare le massif de la plaine de Aïn-Azel.

Il est bordé à l'ouest par la plaine de Salah Bey et s'étend au Nord par la crête de Drâa el Maïz et au Sud par la montagne d'Ain Kahla.

#### **I.3.3.3.2. LE CADRE GEOLOGIQUE :**

Le massif de Hadjar Labiod appartenant au para-autochtone Hodnéen (Fig. I.9), présente un style structural intermédiaire entre celui du massif de Boutaleb au Sud et celui des écaïlles bordières de Kef Maâfer et Kef-El-Djebbas au Nord.

Les formations de Kherzet Youssef constituent le flanc Nord Est de l'anticlinal de Hadjar Labiod sont de nature carbonatée et essentiellement d'âge crétacé.

##### **a). Le crétacé :**

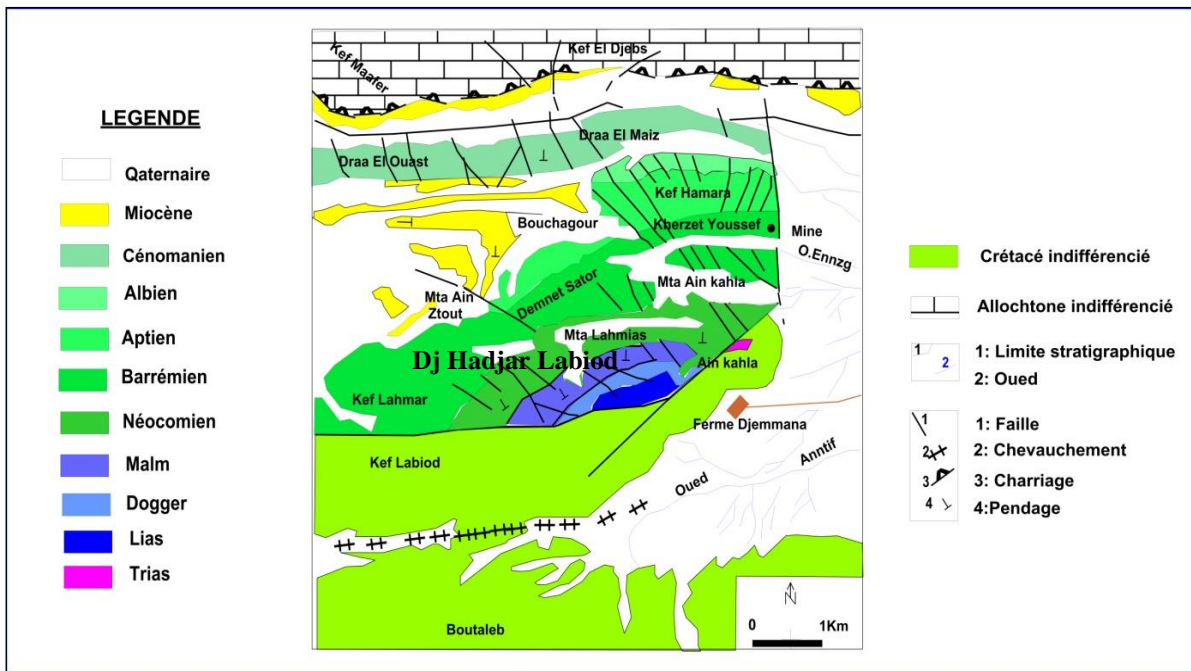
L'étude lithostratigraphique de Hadjar Labiod a montré de la base au sommet :

Le Barrémien inférieur : il est très puissant (160 m d'épaisseur), il se compose composé d'une alternance de calcaires marneux gris, de marnes jaunes et de niveaux dolomitiques grossiers parfois gréseux à gastéropodes et lamellibranches.

Le Barrémien supérieur d'une épaisseur de 130 m marqué par des apports détritiques se traduisant, par des bancs gréseux à stratifications obliques et entrecroisées de couleur beige, alternant avec des marnes gréseux et des bancs de calcaires zoogènes.

La formation décrite ci-dessus se termine par des calcaires à orbitolines et térébratules d'une épaisseur totale d'au moins 260m.

L'Aptien : il débute par des marnes jaunes surmontées par une barre de dolomies massives de grande extension latérale. Au-dessus de laquelle s'est déposée une alternance régulière de marnes peu épaisses, calcaires zoogènes et calcaires à orbitolines. L'ensemble à une épaisseur de 140 m. Au sommet l'Aptien supérieur peut atteindre une épaisseur de 320m. Il se compose essentiellement, par des calcaires organogènes alternant avec des niveaux gréseux, des marnes et des calcaires marneux et silteux de couleur grise.



**Fig. I.9.** Carte géologique du Djebel Hadjar Labiod et de ses environs (modifiée).

L'Albien correspondant à une alternance marno-calcaire généralement recouverte par le quaternaire, présente une épaisseur de 175 m. Le passage stratigraphique Aptien-Albien est marqué par des niveaux de condensation à faunes variées et un changement lithologique net.

Le Cénomanién : il est constitué par trois ensembles :

- Un ensemble inférieur d'une épaisseur de 60 m rapporté au Vraconien formé par des grés grossiers à la base, surmonté par des marnes jaunes à ammonites J.M. VILLA (1977) et à intercalations de calcaires gréseux.
- Un ensemble médian de 300 m d'épaisseur correspondant au Cénomanién constitué par une alternance de marnes et de calcaires marneux qui se termine par des bancs de calcaires fossilifères.
- Un ensemble supérieur d'une épaisseur de 120 m, représentant le Turonien, et des calcaires à débris de rudistes auxquels succèdent des niveaux dolomitiques massifs à rognons de silex.

**b). Le Miocène :**

Le Miocène d'une épaisseur de 200m, est constitué de la base au sommet par :

- Des conglomérats à fragments de calcaires et de dolomies.
- Un ensemble de calcaires gréseux avec des intercalations marneuses
- Des dolomies en bancs métriques

- Des calcaires à silex en bancs centimétriques et décimétriques de couleur grisâtre.

### **c). Le Quaternaire :**

Le Quaternaire inférieur est constitué par des marnes lacustres insignifiantes et des calcaires.

Le Quaternaire supérieur est représenté par des proluvions à gros blocs et galets avec des intercalations de limons sableuses et limons (10 à 15m) et par des colluvions de grés et de galets (1 à 2m), des galets alluviaux et des interlits de limons sableux d'argile et de sable à grains fins.

### **I.3.3.3. LA TECTONIQUE LOCALE :**

Le massif de Hadjar Labiod correspond à un anticlinal d'orientation Est-Ouest marqué par des failles N-S et E-W. (Fig. I.10).

Dans le secteur étudié, les roches sont en général assez compétentes et sont soumises à un style de déformation de type cassant. On peut distinguer deux types d'accidents.

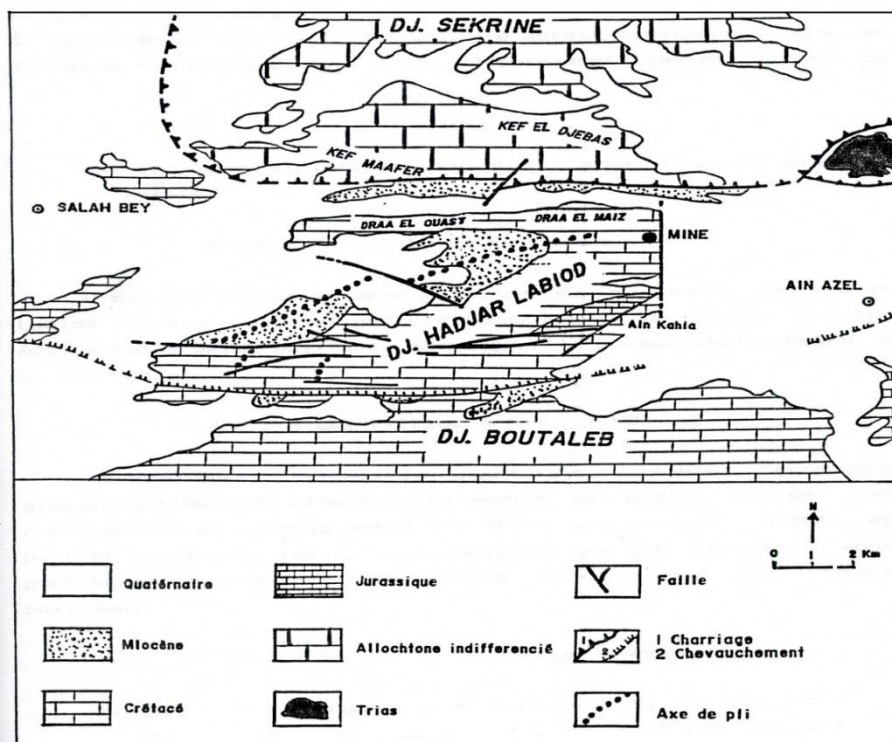
#### **a) Les Accidents majeurs :**

##### ***-La faille de KHERZET YOUSSEF***

La faille de Kherzet Youssef occupe une place très importante dans la structure de la zone NE du massif de Hadjar Labiod, elle correspond à la seule faille méridienne régionale

On peut la suivre de Drâa-El-Maïz jusqu'à Ain Kahla sur une distance de 2,5km. Au Nord de Drâa-El-Maïz, elle disparaît sous le front Sud Sétifien. Au Sud, elle est relayée par la faille longitudinale d'Ain Kahla.

Les travaux de « RUBIS » (1964) montrent que la faille de KHERZET YOUSSEF est une faille normale à décrochement dextre, dont le rejet vertical dépasse 500m et le rejet horizontal 150m avec un pendage de 65° à 85° vers l'Est.



**Fig. I.10.** Schéma structural de la région d'Aïn-Azel  
(D'après la carte géologique au 1/50000)

De plus, l'analyse paléogéographique et structurale de la région de Aïn-Azel a révélé que cet accident est attribué à une succession d'évènements qui s'échelonnent du crétacé inférieur jusqu'à l'actuel, donc synsédimentaire.

#### **- La faille de AIN KAHLA**

Parallèlement au front Sud Sétifien et à la grande faille chevauchante qui sépare le massif Hadjar Labiod du massif Boutaleb au Sud, la faille d'Aïn Karla s'étend de la plaine d'Aïn-Azel au Kef Labiod en mettant à jour le Jurassique de Aïn Kahla. Elle prend naissance au niveau de la source d'Aïn Kahla où elle se joint à la faille de KHERZET YUCEF. Cette faille met au contact les formations crétacées au Sud avec celles du Jurassique au Nord.

C'est une faille inverse polyphasée dont le rejet est très important (plusieurs centaines de mètres) de direction N70-80° à Djemmana puis N50° à Kef Labiod.

#### **b) Les accidents secondaires**

Les accidents secondaires sont caractérisés par deux familles de failles :

- Les failles longitudinales NNE ;
- Les failles transversales NW-SE à N-S.

Les premières failles affectent plus particulièrement le flanc Sud de l'anticlinal de Hadjar Labiod, perturbent sérieusement les séries carbonatées. Elles sont souvent décalées par la deuxième famille de failles.

Les deuxièmes failles (NNW-SSE) sont de moindre importance par rapport aux précédentes mais plus nombreuses. D'après R. DJOUAHRA (1983), l'étude statistique effectuée sur la répartition de la densité de fracturation selon leur représentation spatiale en tranche de 20° a mis en évidence une fracturation prédominante de direction N80°E et N100°E avec une longueur cumulée de 56,3Km.

#### **I.3.3.3.4. LA MINERALISATION DE KHERZET YOUSSEF**

Les minéralisations de Kherzet Youssef encaissées dans les dolomies du membre médian du Barrémien ont été décrites par Henni (1984), Khalid (1986) et Touahri (1987). Il s'agit de deux faisceaux de plusieurs couches (cinq à sept couches) d'une épaisseur moyenne de un à deux mètres reconnues sur 300 mètres d'extension latérale EW, sur une longueur dans le sens du pendage qui peut atteindre 1000 à 1500 mètres. La minéralisation d'une richesse exceptionnelle est encaissée dans les dolomies diagénétiques du membre médian du Barrémien (formation d'alternances de calcaires, grès dolomies et marnes). Elle est constituée de sphalérites cristallines, de galène, de marcasite et de pyrite. Les minéraux de gangue sont constitués par de la calcite et de la barytine géodiques dont les vides résiduels sont remplis par des bitumes cookifiés. Les textures des minéralisations sont très nombreuses, bréchiques, zébrées ou rubanées, disséminations, remplissages de vacuoles de dissolution ou de fractures et des textures de remplacement. La mise en place de la minéralisation est épigénétique (Touahri, 1987).

Les couches minéralisées constituent deux faisceaux bien distincts

- Un faisceau supérieur « **Saint Pierre** » composé de 3 à 7 corps minéralisés avec une épaisseur totale de 70 m environ, ces corps minéralisés sont représentés par des dolomies cavernueuses solidifiées avec minéralisation de Blende plus rarement Galène, Pyrite et Marcasite. Les teneurs en Zinc et en Plomb sont variables, en moyenne à : 10 % pour le Zinc et 4,5 % pour le Plomb.
- Un faisceau inférieur « **Saint Jean** » composé de 5 à 9 corps minéralisés avec une épaisseur de 40m, les corps minéralisés sont représentés par des dolomies cavernueuses à cristaux de Blende, les teneurs moyennes sont comprises entre 15 à 16 % par le Zinc et ≈ 4,00 % pour le Plomb.

Entre les gîtes de Aïn Karla et celui de Kherzet Youssef près de la ferme Djemmana (sur la piste qui longe la grande faille NS de Kherzet Youssef) ; nous avons observé au cours des stages de terrain des étudiants de Géologie Minière, un chapeau de fer dans les dolomies de l'Hauterivien qui serait probablement l'équivalent de la minéralisation de Chaabet El Hamra ou de celle de Kef Omar. Au Nord de la Laverie de Kherzet Youssef existe aussi un chapeau de fer dans la barre dolomitique de l'Aptien supérieur. Il s'agit là d'un repère régional connu depuis les Ouled Tebbène à l'Ouest jusqu'aux monts de Batna et Belezma en passant par les indices du Djebel Fourhal. Au Sud-est de Aïn-Azel se développe un axe anticlinal arqué (de direction NW-SE puis NE-SW). Entre les gîtes de Chaâbet-El-Hamra et Gouzi-Debba et à mi-chemin existe un indice minéralisé (Mènes) dont les tranchées et les petits travaux de prospection (ORGM) n'ont trouvé aucune minéralisation sulfurée en surface (que des oxydés), par analogie de faciès (dolomies de couleur rouille de l'Hauterivien) cet indice est analogue aux chapeaux de fer qui se développent sur les concentrations de Chaâbet-El-Hamra.

D'ailleurs le même faciès se rencontre un peu à l'Ouest, il s'agit de l'indice de Chouf Ameer situé dans la branche SW de Djebel Talkhempt. Jadis on y a exploité de la calamine, des travaux récents de l'ORGM ont mis en évidence une minéralisation de sphalérite associée à des faciès riches en matière organique à marcassite et pyrite. Les échantillons que nous avons observé montrent beaucoup d'analogie avec la minéralisation que nous avons étudié à Chaâbet-El-Hamra et Kef Omar (richesse relative en sphalérite, marcassite et pyrite ; zonalité des couleurs observées au sein des sphalérites.) Les indices de Kef Talkhempt et de Ras Oum Lham (extrémité orientale du Hodna) sont encaissés dans les dolomies du Lias. Ils ressemblent beaucoup aux indices de Gouzi-Debba et Aïn Kahla avec la particularité de montrer une richesse relative en minéraux cuprifères (chalcopryrite, cuivres gris et bornite) et l'absence de fluorite. Pour le cuivre on constate aisément qu'il est absent dans les indices de Hadjar Labiod, il fait son apparition dans les indices de Gouzi puis augmente relativement au Talkhempt. Soulignons au passage que les minéraux cuprifères s'expriment minéralogiquement à chaque fois qu'en est à proximité de percements triasiques.

#### **I.3.4. CONCLUSION :**

La mine de Kherzet Youssef, notamment l'usine de traitement sont localisés sur le flanc NE du Djebel Labiod appartient au para-autochtone Hodnéen.

Le massif de Hadjar Labiod présente un style structural intermédiaire entre celui de l'autochtone au Sud (massif de Boutaleb) et celui de l'allochtone au Nord (écaille de Kef Mâafer et Kef-El-Djebbas).

L'étude lithostratigraphique de la région de Aïn-Azel permet d'identifier les différents formations représentées par :

-Des formations carbonatées et gréseuses d'une épaisseur d'environ 600 m constituant le Barrémien correspondent à la transgression aptienne. A noter que cet ensemble présente essentiellement une porosité de fractures.

-Des formations alluvionnaires d'une épaisseur de 200 m correspondant au Moi-Plio-quaternaire sont constituées de sables, graviers, galets, grès, argiles et conglomérats. Cet ensemble est caractérisé par une porosité d'interstices.

Cependant d'autres niveaux aquifères sont à distinguer, il s'agit de :

-les calcaires gréseux et grès du Vraconien.

-Les calcaires de l'Albien inférieur.

-Les calcaires et dolomies d'une épaisseur de 500 m de l'Aptien.

-Probablement les calcaires Turoniens.

-Les grès et les conglomérats du Miocène inférieur.

L'étude tectonique du Djebel Hadjar Labiod révèle un style de déformation essentiellement de type cassant, représentée particulièrement par la faille méridienne de Kherzet Youssef d'orientation N-S qui est relayée au Sud par la faille d'Ain Kahla.

Toutefois, on note la présence d'accidents secondaires matérialisés par des failles ayant généralement une direction N80°E et N100°E.

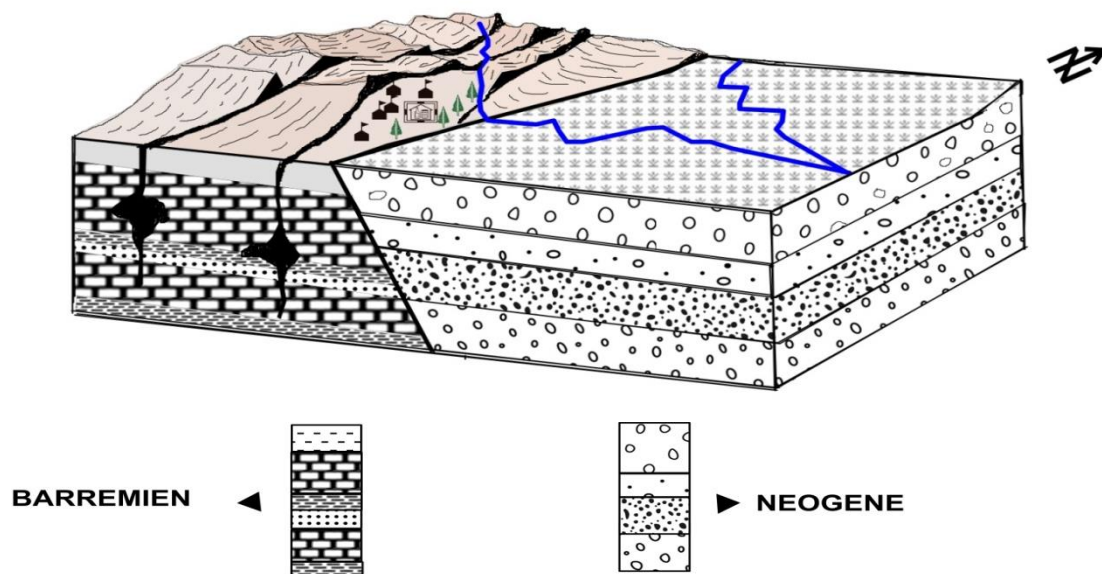
Cette approche géologique a permis de définir la nature lithologique des terrains qui sont favorables aux développements d'éventuels aquifères. Les sondages géologiques et hydrogéologiques ont permis de les définir. Du point de vue hydrogéologique, la faille de Kherzet Youssef juxtapose deux aquifères potentiels de nature et d'âge différents.

- Le premier est situé à l'Ouest de la faille, composé de formations d'âge Barrémien supérieur. L'étude lithostratigraphique montre que les assises inférieures sont caractérisées par une alternance de grès, de calcaires et de marnes renfermant des niveaux de calcaire dolomitique à grains fins. Ces derniers sont surmontés par des calcaires argileux, de grès et de marnes (Guiraud, 1990). Le toit des ces assises se compose de grès quartzeux blanc et des marnes jaunes. Les assises supérieures débutent par un faisceau massif de calcaires



dolomitiques de teinte gris foncé alternant avec des calcaires marneux, des grès et parfois des argiles. Des marnes jaunes terminent ce faisceau. La minéralisation se localise dans les dolomies et rarement dans les marnes. Cette alternance de couches imperméables (marnes/argiles) et de couches perméables (grès, dolomies et calcaires), traduit, dans le détail, la présence de plusieurs niveaux aquifères étagés. Toutefois cette structure, lorsqu'elle est considérée dans son ensemble, présente une certaine homogénéité. En effet les fissures karstiques mettent en relation les différents niveaux aquifères et donnent lieu à un seul aquifère fissuré et karstique.

- Le second réservoir à l'Est, est représenté par des formations d'âge néogène indifférencié qui comblent les dépressions des mechtas d'Ain Kahla et celle de la plaine d'Aïn-Azel. Les carottes, de sondages réalisés par la SONAREM dans ces formations, montrent que le Néogène correspond à une décharge détritique composée de grès, de sable, de gravier, de roches fortement bréchifiées et d'argiles rouges parfois verdâtres enrobant des éléments plus ou moins arrondis. Leur épaisseur s'accroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la faille vers l'Est, passant de 100 m à 150 m à proximité de la faille à plus de 300m plus à l'Est. Ces dépôts détritiques sont favorables au développement d'un aquifère poreux (Fig. I.11).



**Fig. I.11 : Bloc diagramme du gisement de Kherzet Youssef (Bellouche1996)**

## *Chapitre Deuxième*

# **CADRE MORPHOMETRIQUE**

**ET**

# **HYDROLOGIQUE**

## **II.1. CARACTERES MORPHOMETRIQUES**

### **II.1.1.INTRODUCTION**

Avant d'aborder l'étude hydrogéologique du secteur étudié, il s'avère nécessaire de donner un aperçu hydrologique, car l'hydrologie est la science qui étudie le cycle de l'eau et son évolution à la surface de la terre et par conséquent elle permet de quantifier la quantité d'eau qui alimente les nappes d'eau souterraines. Or les caractéristiques topographiques, géologiques et géométriques jouent un rôle essentiel dans le comportement du bassin versant. En effet, elles interviennent d'une manière conjuguée dans les modalités de l'écoulement et l'infiltration.

Le Bassin Versant joue le rôle de collecteur des précipitations qu'il transforme en écoulements de surface qui finissent par rejoindre la mer ou les cuvettes endoréiques.

Cette transformation ne va pas sans perte d'une partie des eaux précipitées, ces pertes dépendant tout autant des conditions climatologiques qui règnent sur le bassin que des caractéristiques physiques de ce dernier. La nature du sol et la couverture végétale interviennent en dernier ressort.

## **II-1.2. SITUATION DU BASSIN D'AÏN-AZEL**

La plaine d'Aïn-Azel se situe dans l'Algérie Nord Orientale et fait partie des hautes plaines sétifiennes et constantinoises (Fig. II-1).

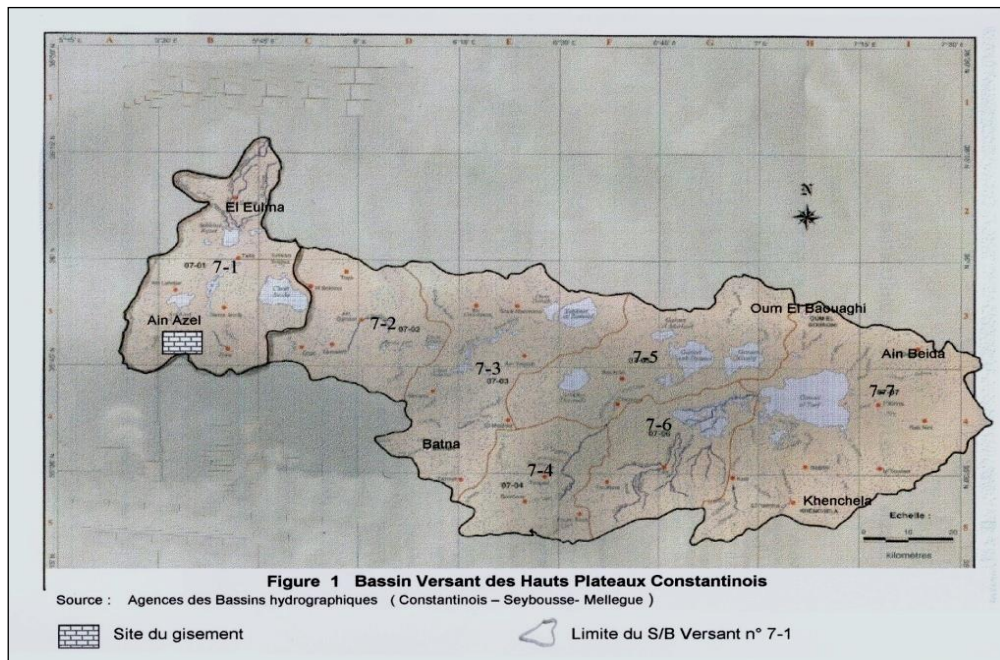
Le sous-bassin d'Aïn-Azel couvre une partie d'un vaste bassin hydrologique qui s'étale sur une surface de plus 9580 km<sup>2</sup> (Fig. II.2), depuis la région d'Aïn-Beida à l'Est jusqu'à El-Eulma à l'Ouest. Il est limité par le 35<sup>ème</sup> parallèle au Sud et par le 36<sup>ème</sup> au Nord, et aussi par le méridien 5° à l'Ouest et 8° à l'Est

L'A.N.R.H lui attribue le numéro « 07 ». La plaine d'Aïn-Azel occupe le sous-bassin le plus occidental de ce bassin codé 07-01

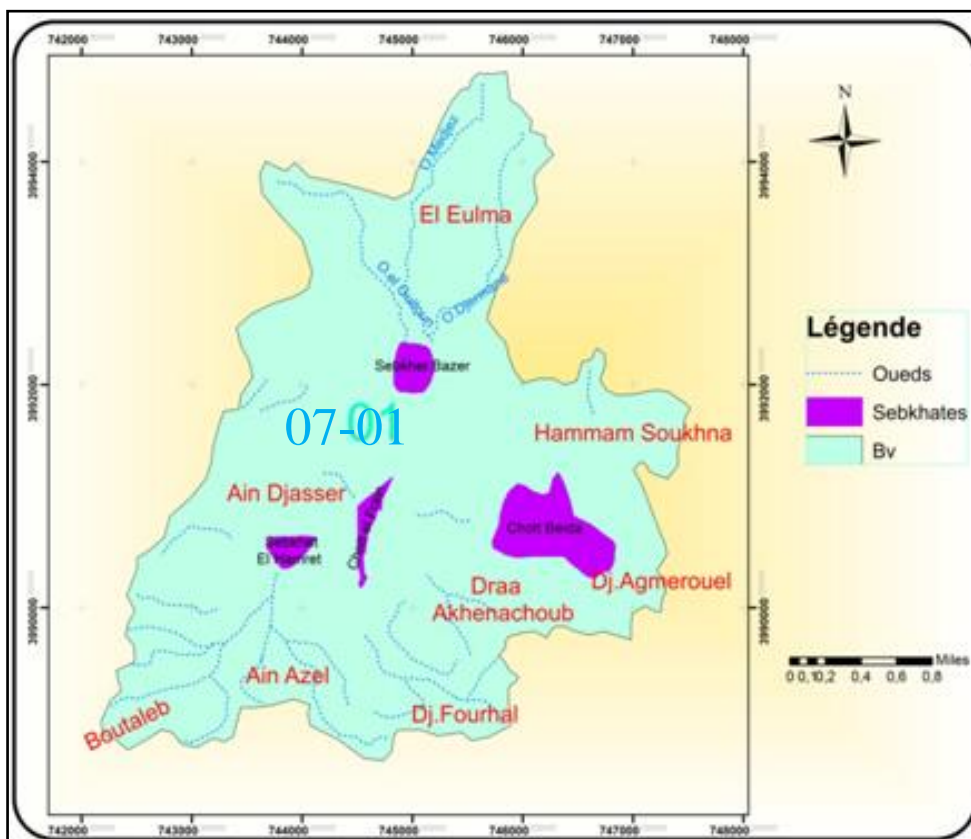
## **II-1.3. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES**

### **II-1.3.1. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE**

Le réseau hydrographique est peu dense et correspond à un ensemble d'oueds courts et temporaires qui drainent la majeure partie des versants et se perdent dans les formations détritiques de la plaine.



**Fig. II.1 :** Situation du bassin versant des hautes plaines Sétifiennes et Constantinoises (A.N.R.H)



**Fig. II.2 :** Carte du sous-bassin versant N°07-01

Ces oueds prennent leurs sources soit des reliefs limitant le sous-bassin versant, soit des collines qui se trouvent à l'intérieur même du bassin versant (Koudiat El Bassour). Ils ne coulent qu'en période de fortes pluies. Ce réseau hydrographique est désorganisé par

l'effet combiné des phases tectoniques du Pliocène-Quaternaire et des variations climatiques.

### **II.1.3.2. LE COUVERT VEGETAL**

Dans la région d'Aïn-Azel, les sols sont composés de matériaux divers et la végétation y est appropriée essentiellement au climat. On y rencontre quelques arbustes de pins éparpillés sur les massifs du Boutaleb et sur la partie ouest du massif de Hadjar Labiod (évapotranspiration d'un pin 1mm/j)

Dans la plaine les principales cultures sont représentées par les céréales : blé et orge (évapotranspiration du blé est 2.5mm/j environ). Les cultures maraîchères sont peu abondantes et se concentrent aux alentours des rares puits paysans et aux voisinages de la mine de Kherzet Youssef.

### **II.1.3.3. LES PARAMETRES ALTIMETRIQUES**

Les premiers travaux qui se sont intéressés à la morphométrie sont ceux de Tarr et Martin (1914), ensuite Gravelius (1914) s'est attaché aux caractéristiques physiques les plus importantes. Ces dernières jouent un rôle essentiel dans le comportement hydrologique du bassin versant.

Ainsi, l'étude morphométrique (ou physiographique) des bassins porte sur le réseau hydrographique ainsi que sur les surfaces drainées, voir, l'ordre des cours d'eaux, la forme des bassins, le relief, et les modèles de représentation géométrique.

En effet, la transformation de la pluie en écoulement (aussi bien superficiel que souterrain) passe par l'intermédiaire du bassin versant. Ce dernier est défini comme "la région qui reçoit les précipitations et, suite aux processus hydrologiques entraînant pertes et retards, les achemine jusqu'à un exutoire" (OMM, 1996).

Outre les conditions climatiques qui gouvernent le fonctionnement du bassin versant, ses caractéristiques physiques influencent le volume (en terme de bilan) et la répartition temporelle (en terme d'hydrogramme) des écoulements (Roche, 1963).

Par caractéristiques physiques il faut entendre la topographie, la géologie, la nature et l'occupation du sol, mais aussi la forme du bassin versant dont on conçoit bien qu'elle influence les caractéristiques de l'écoulement résultant d'une pluie donnée (Roche,1963; Strahler, 1964). Les hydrologues ont tenté de

caractériser cette morphologie par des indices simples calculables avec le seul concours des cartes topographiques (Fig. II-3).

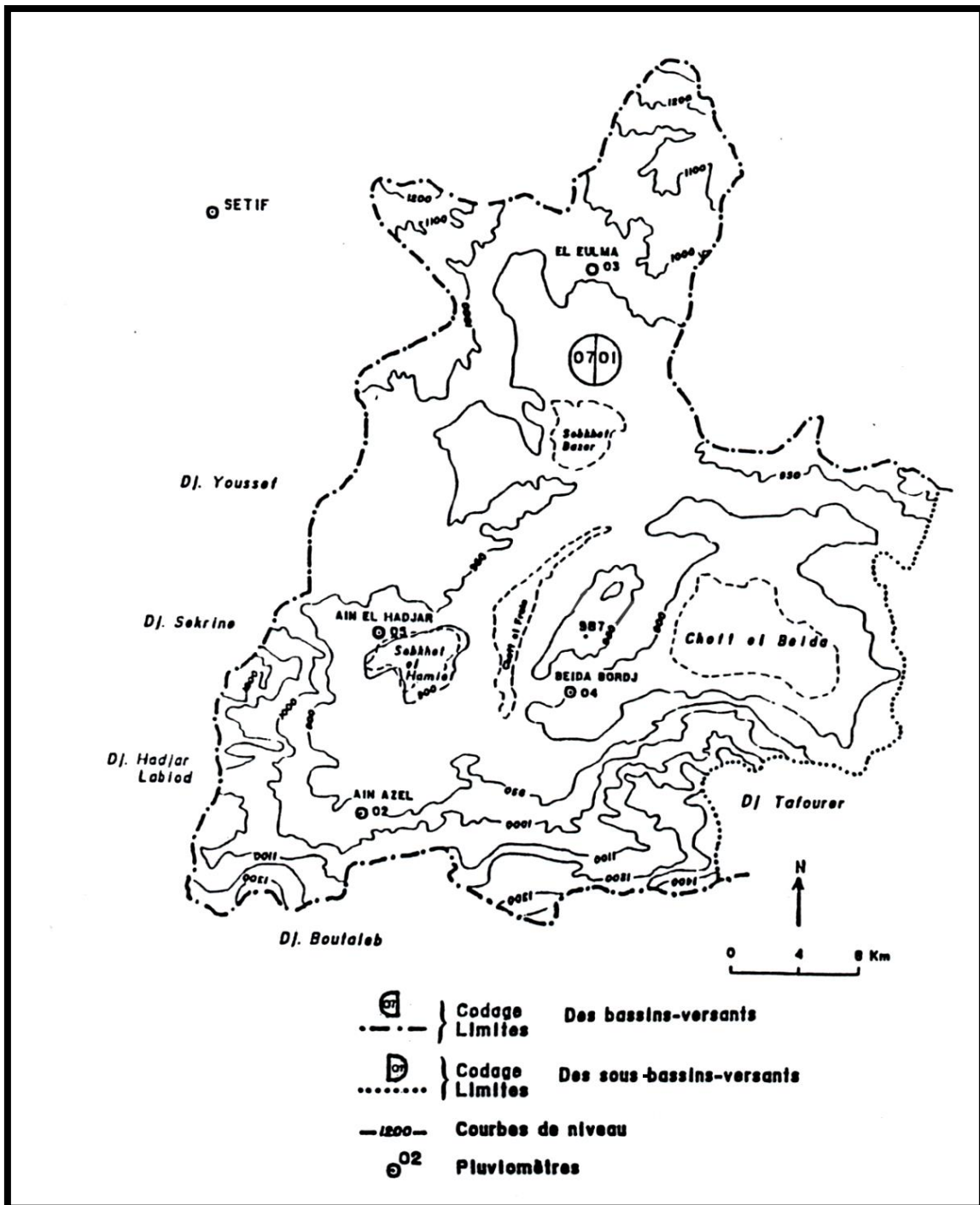


Fig. II.3. Carte topographique du sous-bassin versant 07/01. (In Bellouche 1996)

#### II.1.3.4. CARACTERISTIQUES DE FORME

Ce sont des caractéristiques purement géométriques des bassins que l'on peut réaliser par la seule analyse des documents topographiques.

La limite de précision de calculs sera bien évidemment liée à celle des cartes topographiques utilisées.

La forme des bassins est importante à étudier car elle conditionne directement le temps de réponse du bassin aux précipitations, c'est à dire la durée du ruissellement de surface et le temps de parcours à travers le réseau de drainage.

L'idée la plus simple est de comparer le bassin étudié à un bassin de forme standard. C'est ainsi que Gravelius (1861-1938), professeur à l'Université de Dresde (Allemagne), a proposé en 1914 le coefficient de compacité noté  $K_c$  ("compactness coefficient") défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface (Wisler & Brater, 1959; Roche, 1963; Ward, 1975; OMM, 1996). Si le périmètre du bassin est noté  $P$  et sa surface  $A$ , le coefficient de compacité s'exprime par:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} \rightarrow K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 1.8$$

A : surface du bassin versant = 1600km<sup>2</sup>

P : Périmètre du bassin versant =250km

#### II.1.4. LES PARAMETRES GEOMETRIQUES

Pour la recherche d'un modèle de représentation ; Roche (1962) a proposé une méthode qui fait intervenir la répartition altimétrique des reliefs au sein du bassin versant. Pour ce faire, il introduit la notion du rectangle équivalent qui permet de comparer facilement les bassins entre eux par rapport aux caractéristiques relatives à l'écoulement et de calculer la dénivelée spécifique. Par une simple transformation géométrique, le contour devient un rectangle de même périmètre, les courbes de niveau des droites parallèles au petit côté du rectangle, l'exutoire de l'un des petits côtés du rectangle appelé "Rectangle équivalent"

Pour ce faire il introduit la notion de l'indice de compacité de Gravelius  $K_c$  qui permet de comparer le périmètre du sous-bassin à celui d'un cercle de même surface (voir tableau II.1).

**Tableau II.1** : valeur d'indice de compacité de gravelius

Kc	Forme du sous-bassin versant
----	------------------------------

1.00	Cercle
1.12	Carré
$Kc > 1.12$	Rectangle (allongé)

Si  $Kc$  est supérieur ou égal à 1.12, les dimensions du rectangle équivalent seront obtenues à l'aide des deux relations suivantes :

$$\text{- Longueur : } L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} + \left( 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{\sqrt{Kc}}\right)^2} \right) = 110\text{km}$$

$$\text{- Largeur : } l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} + \left( 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{\sqrt{Kc}}\right)^2} \right) = 13.5\text{km}$$

$L$  = longueur du rectangle équivalent en km

$l$  = largeur du rectangle équivalent en km

$A$  = superficie du sous-bassin versant en  $\text{km}^2$

$Kc$  : représente l'Indice de compacité de Gravelius,

$P$  : le périmètre du bassin versant (km) : Le périmètre est estimé par curvimétrie

**$P = 250\text{km}$**

$A$  : l'aire du bassin versant ( $\text{km}^2$ ) : La surface totale est estimée par planimétrie

**$A = 1600\text{km}^2$**

Si  $Kc = 1$  : le sous-bassin versant est de forme circulaire

Si  $Kc = 1.12$  : le sous-bassin versant est un carré,

Si  $Kc > 1.2$  : le sous-bassin versant est allongé.

Sur le plan morphologique, la valeur élevée du coefficient de compacité  $Kc=1.8$  traduit l'allongement du bassin et donc la prédominance de l'érosion régressive.

Le calcul du coefficient de compacité est simple, mais un problème se pose quant aux conditions de stylisation du contour du bassin : un contour très irrégulier, où seraient enregistrées toutes les petites irrégularités conduisant à des valeurs exagérées du périmètre. A l'inverse, une stylisation trop importante risquerait de fausser les valeurs de l'indice de raccourcissement exagéré du périmètre.

## II.1.5. CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES



Le relief, par ses altitudes et ses pentes, joue un rôle direct sur le temps de concentration des eaux de pluie et sur les variations des températures et de l'évaporation.

Pour déterminer la répartition spatiale des altitudes sur l'ensemble de la surface du sous-bassin versant, il faut diviser les altitudes par tranche de 100m de dénivellation suivant les courbes de niveau maîtresses. Ensuite on doit planimétrer les surfaces de chaque tranche d'altitude.

Les résultats sont portés sur le tableau suivant :

**Tableau II.2** : Répartition des altitudes du sous-bassin versant 07/01

Tranche Altitude(m)	Altitude Moyenne(m)	Surface (Km <sup>2</sup> )	Surfaces cumulées	% surface	%surfaces cumulées
>1400	1450	8.0	8.0	0.53	0.53
1400-1300	1350	10.0	18.0	0.66	1.19
1300-1200	1250	72.0	90.0	4.80	6.00
1200-1100	1150	100.0	190.0	6.66	12.67
1100-1000	1050	208.0	308.0	13.86	26.53
1000-900	950	890.0	1280.0	59.33	85.86
<900	850	212.0	1500.0	14.13	100.00

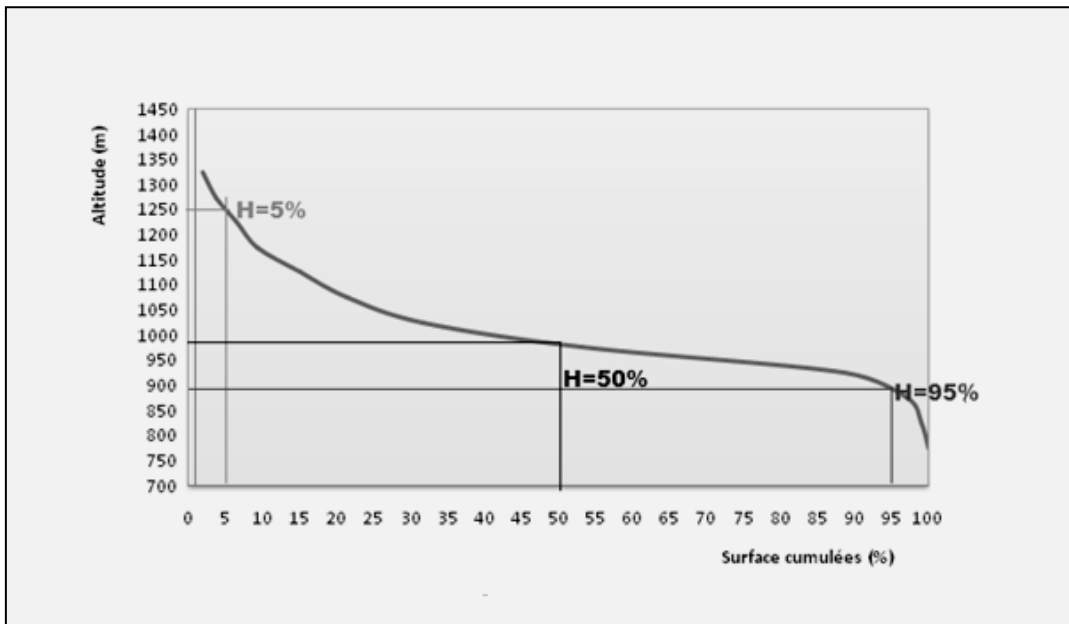
La courbe hypsométrique (Fig. II.4), obtenue à partir des altitudes moyennes portées en abscisse et les fréquences cumulées en ordonnée, permet de déterminer :

- l'altitude médiane (50%) qui est égale à H=970m
- plus de 85% de la surface totale représente des altitudes inférieures à 950m
- Le reste environ 15%, correspond aux zones montagneuses dont l'altitude est supérieure à 1050m.
- L'altitude moyenne est déterminée par la formule suivante :

$$H \text{ moy} = \frac{\sum Si Hi}{\sum Si} = 980m$$

$Si$  : aire des tranches d'altitude en km<sup>2</sup>

$Hi$  : Altitude moyenne en mètre, comprise entre deux courbes de niveaux maîtresses équidistantes de 100 m.



**Fig. II.4.** Courbe hypsométrique

La dénivelée spécifique permet la comparaison immédiate de la répartition des reliefs indépendamment de la forme des bassins versants.

$$D_s = D \frac{\sqrt{A}}{L} = D \sqrt{\frac{l}{L}} = 178\text{m}$$

D : dénivelée simple déduite de la courbe hypsométrique (Fig. II. 6)

$$(H_{5\%} - H_{95\%}) = 380\text{m}$$

A : surface du bassin versant = 1500km<sup>2</sup>

l : largeur du rectangle équivalent = 13.5km

L : longueur du rectangle équivalent = 111km

D'après la classification de l'O.R.S.T.O.M (Tableau II.3), le relief est assez fort.

**Tableau II.3 :** classification des reliefs de l'O.R.S.T.O.M

Valeurs de Ds	Classe de reliefs
Ds < 10m	Relief très faible
25m < Ds < 50m	Relief assez faible
50m < Ds < 100m	Relief modéré
100m < Ds < 250m	<b><u>Relief assez fort</u></b>
250m < Ds < 500m	Relief fort
Ds < 500m	Relief très fort

### II.1.6. MARQUES DE L'ENDOREISME

La conjugaison des phénomènes topographiques et la semi-aridité du climat ont donné naissance à un phénomène d'endoréisme qui se traduit par la présence de cuvettes fermées : sebkha el Hamiet, Chotts El Frain et Chott El Beida qui jalonnent d'Ouest en Est le sous-bassin versant et, sebkha Bazer Sakhra qui se localise dans sa partie Nord. Les dépressions correspondent à des bassins d'effondrement qui ne s'expliquent essentiellement que par la tectonique

## **II.1.7.CONCLUSION**

La plaine d'Aïn-Azel correspond à un sous-bassin allongé, assez plat, limité par des reliefs assez forts. En effet, la topographie, la géologie, la nature et l'occupation du sol, mais aussi la forme du bassin versant joue un rôle important sur les caractéristiques de l'écoulement résultant d'une pluie donnée.

La forme du bassin versant peut avoir des conséquences hydrologiques importantes, notamment sur la relation pluie-débit et sur l'évolution des écoulements en période de crue. En effet, la forme de sous-bassin indique que le temps de concentration des eaux à l'exutoire est assez lent, entraînant ainsi une faible torrentialité, ce qui favoriserait l'infiltration au détriment de l'écoulement.

L'une des crues les plus meurtrières et dévastatrices qui a frappé la mine de Kherzet Youssef fût celle du 28 Mai 1990 qui survint sous forme d'orages. Un orage exceptionnel de **28mm** a provoqué une crue violente et de courte durée. L'inondation de la mine le 2 juin 1990 (avec des dégâts humains et matériels) fut elle, la conséquence de cette pluie intense, favorisée par cet environnement géomorphologique propice au ruissellement et à l'infiltration (milieu fissuré et karstifié).

Toujours du point de vue risque d'inondations, nous avons noté que de nouvelles constructions ont été édifiées ces dernières années sur d'anciennes dayas (zones inondables) ; exemple : dans la dépression de Sebkhet El Hamiet et dans la plaine d'Aïn-Azel.

## **II.2.CARACTERISTIQUES HYDRO-CLIMATIQUES**

### **II.2.1.INTRODUCTION**

Le climat de la région d'Aïn-Azel est tout à fait comparable à celui des Hautes Plaines Sétifiennes. Il est semi-aride et se caractérise par une amplitude thermique élevée avec des hivers perturbés, rigoureux et pluvieux et des étés chauds et secs

## **II.2.2. LES INFLUENCES CLIMATIQUES**

Le régime climatique des Hautes Plaines Sétifiennes est contrôlé aussi bien par la morphologie du secteur que par sa position en latitude et en altitude.

En été elles sont soumises à l'influence des hautes pressions subtropicales qui repoussent vers le Nord le Front Polaire. Il en résulte un climat chaud et sec.

En hiver le Front Polaire se déplace vers le Sud, repousse les zones de haute pression vers des latitudes plus basses. L'effacement partiel de l'anticyclone des Açores permettra l'apparition de perturbations en provenance du Sud-ouest. Sur la base d'une série de situations météorologiques qui se répètent régulièrement, on peut dire qu'en Méditerranée, se développent trois types de perturbations ayant lieu en décembre, janvier et février.

- Les perturbations d'origine Nord-Atlantique suivent une direction NNW-SSE.
- Les perturbations d'origine Sud Atlantique Ouest, Sud-ouest à Est, Nord-est. -- En Mars et Avril ainsi qu'en Octobre et Novembre, la région subit aussi des perturbations d'origine Africaine Sud-ouest.

Dans le détail, il est possible d'observer un certain nombre de situations spéciales qui déterminent plusieurs types de climats. Les masses d'air humides venues du Nord (Méditerranée) sont contraintes dans leur cheminement à franchir les crêtes de la chaîne Kabyle. Et de ce fait, elles se débarrasseront d'une grande partie de leur humidité et les versants de Kabylie orientés vers la mer(Nord) recevront un volume très important de précipitations et ce d'autant plus que nous sommes dans un secteur où le Front Polaire dérivé est fréquemment présent. Lorsqu'elles descendront vers les Hautes Plaines, les masses d'air se réchaufferont par effet de Foehn.

Plus au Sud, il y aura une nouvelle augmentation de la pluviosité liée au franchissement de la chaîne du Hodna ou de celle des Aurès et à la présence des Fronts Méditerranéens.

De la même façon, il y aura augmentation du volume des précipitations au niveau des massifs calcaires parsemés sur les Hautes Plaines. A l'inverse, les couloirs ouverts, entre les Monts des Hodna et ceux des Aurès, permettront l'avancée vers le Nord, des influences Sahariennes.

Les Hautes Plaines Sétifiennes occupant une position élevée en altitude seront soumises à un climat chaud de montagne pendant la journée et froid la nuit.

En conséquence, les hivers seront froids et la neige fréquente. A Aïn-Azel, comme à Aïn-Lahdjar la saison pluvieuse se développe de Septembre à mai pour la série 1984-1987 et de novembre à Avril pour la série 1990-2010, la période sèche se limitant aux mois de Juin Juillet et d'Août pour la série 1984-1987 et de Mai a novembre pour la série 1990-2010. Ces différences montrent bien l'impact du réchauffement climatique.

Ces quelques observations montrent bien la complexité du climat qui règne sur les Hautes Plaines Sétifiennes. Malheureusement l'absence ou le faible nombre de stations climatologiques ne nous a pas permis d'utiliser des données récentes pour une période de référence. Pour l'étude hydro-climatologique on s'est appuyé sur les périodes 1984-1987 et 1990-2010 pour laquelle nous disposons d'une série de données pluviométriques continue.

### II.2.3. CLIMAT ET ANALYSE DES PARAMETRES CLIMATIQUES

Le climat de la région d'Aïn-Azel est tout à fait comparable à celui des Hautes Plaines Sétifiennes. Elle jouit d'un climat continental semi-aride. Pour les paramètres climatiques, nous nous sommes appuyés sur les données de l'O.N.M (Office National de Météorologie) de la station de Sétif et d'Aïn-Azel pour la période allant de 1990 à 2010 (La station pluviométrique d'Aïn-Azel qui se situe pratiquement dans le gisement de Chaâbet-El-Hamra à 700 m de la limite Nord-Ouest du gisement).

#### II.2.3.1. LES PRECIPITATIONS

La série d'observations sur la précipitation de 1990 à 2010 (Période de 20 ans) de la station de Aïn-Azel est donnée (Voir le tableau II.4).

Les données disponibles permettent l'estimation de la quantité de pluie moyenne annuelle reçue par le sous-bassin versant.

**Tableau II.4.** Précipitations mensuelles de la station d'Aïn-Azel et de Sétif durant la période 1990-2010 (ONM, Sétif)

Année	Station	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
1990-1991	Aïn- Azel	7,3	29,7	94,3	48,7	58,7	13,7	0	10	17,2	14,8	57	59
	Sétif	4,8	4,7	35,9	7,1	116,8	26,4	0	11,6	48,4	6	9,6	21,5
1991-1992	Aïn- Azel	39	23,8	57,9	22,3	111,3	2,2	17,9	0,3	29,6	97,5	15,8	16,8
	Sétif	28,8	5,9	6	18,8	59,6	0,3	2,8	3,8	62,1	5,8	29,2	6,2
1992-1993	Aïn- Azel	15	32	32,3	1,2	47,4	2	0	15,2	13,8	5,6	31,8	43,8
	Sétif	8	9,2	14,7	25,4	8,9	3,7	19,8	70,9	4,7	22,5	66,6	32,4
1993-1994	Aïn- Azel	39	12,4	16,8	0	0	0	0	4,2	11,8	3	44	27,1

	Sétif	15,4	31,4	23	97,2	27,6	14,8	2,7	6,7	44,1	81,6	14,1	44,4
1994-1995	Aïn- Azel	43	19,8	41,3	20,8	5,1	39,3	1,6	20	55,5	54,1	7,2	6,1
	Sétif	26,5	10,8	57	43,3	98	59,4	8,6	13,7	45,8	19,9	96,9	104,8
1995-1996	Aïn- Azel	67	58	26,7	21,1	47,5	36,4	0	13	84,8	8,8	6,4	34,5
	Sétif	16,4	42,5	20	37,2	3,6	14,1	4,5	29,6	17,7	17,1	16,8	27,6
1996-1997	Aïn- Azel	25	2	8,8	59,5	12,7	13,2	0	7,6	19,4	6,3	13,3	6,5
	Sétif	62,3	32,8	5,8	71,9	83,8	10,9	4,8	3	11,2	1,9	18,8	40,6
1997-1998	Aïn- Azel	26	20,6	5,8	47,6	66,2	4,5	0	2	53,1	30,5	45,2	32,8
	Sétif	1,6	20,5	38,7	32,5	17,6	2,1	0	9,9	64,3	23,4	10,1	37
1998-1999	Aïn- Azel	60	11	19,7	19,9	6,8	3,7	2,6	2,5	17,7	9,4	16,8	3,5
	Sétif	6,9	2,3	39,3	3,3	107	21,5	18,8	10,5	47,1	36,4	15,3	15,6
1999-2000	Aïn- Azel	14	0	3	9,5	49,5	16,8	0	6	49,8	41,4	46,4	0
	Sétif	5,9	5,7	21,5	28,8	61,9	20,3	0	23,9	39,4	47,3	15,2	61,3
2000-2001	Aïn- Azel	24	18,1	5,7	3,6	20	19,2	9,6	8,4	49,5	2,3	7,7	44,7
	Sétif	79	20,1	8,6	13,2	19,3	0	0	4	47,2	14,4	37,1	8,4
2001-2002	Aïn- Azel	96	19,5	29,7	56,3	52,7	9	9	9	38,8	3,3	18,5	9,2
	Sétif	22,7	24	29,5	7	5,5	0,8	45,5	29,8	7,8	16,2	118,9	92,4
2002-2003	Aïn- Azel	96	19,5	20,7	47,3	43,7	0	0	0	9	74,6	14,7	22,4
	Sétif	130,7	28,8	38,2	87,7	37,9	36,5	36,6	28,7	14,1	63,3	13	89,8
03-2004	Aïn- Azel	33	10,9	54,1	58,4	65,4	42,8	2,3	0	0	74,6	14,7	22,4
	Sétif	47,9	15,4	27,5	66,1	66	9,6	0,3	23,9	13,2	28,1	52,7	91,1
2004-2005	Aïn- Azel	14	18,5	26,2	13	0,5	22,8	5,1	0	8,4	39,2	45,3	70,5
	Sétif	29,4	43,3	12,2	54,4	3,4	28	21,9	4,8	30,6	21,2	68,9	57,4
2005-2006	Aïn- Azel	73	43,8	4,4	71,6	41,3	14,6	11,6	0	28,9	29,4	48,6	20,9
	Sétif	55,9	36,8	8,5	39,7	79,4	4,7	14	2,8	54,3	0,8	9,5	49,6
2006-2007	Aïn- Azel	20	14,3	74,6	45,3	9,7	19,2	0	0	48,2	5,8	18,3	22,4
	Sétif	8,6	28,6	102	89,2	27,2	59,5	3	2,4	79,3	21,1	14,3	10,4
2007-2008	Aïn- Azel	3,5	1,1	0	2,8	0	0	0	0	148	15,1	0	8,2
	Sétif	10,8	21,6	42,9	21,8	72,7	29	40,1	19,1	44,9	55,4	23	38,1
2008-2009	Aïn- Azel	0	0	0	0	8,3	0	0	0	66,4	47,1	4,3	40
	Sétif	66,3	38,2	31,5	79,1	4,9	4,7	3	29,7	63,8	9	28,1	26,1
2009-2010	Aïn- Azel	7	50,8	49,2	63,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sétif	30,9	38,2	38,3	55,1	73,4	22,6	6	35,3	5	40,9	43,7	18

### II.2.3.1.1. VARIATIONS DES PRECIPITATIONS DANS LE TEMPS

#### a). Précipitations moyennes mensuelles (série 1990-2010)

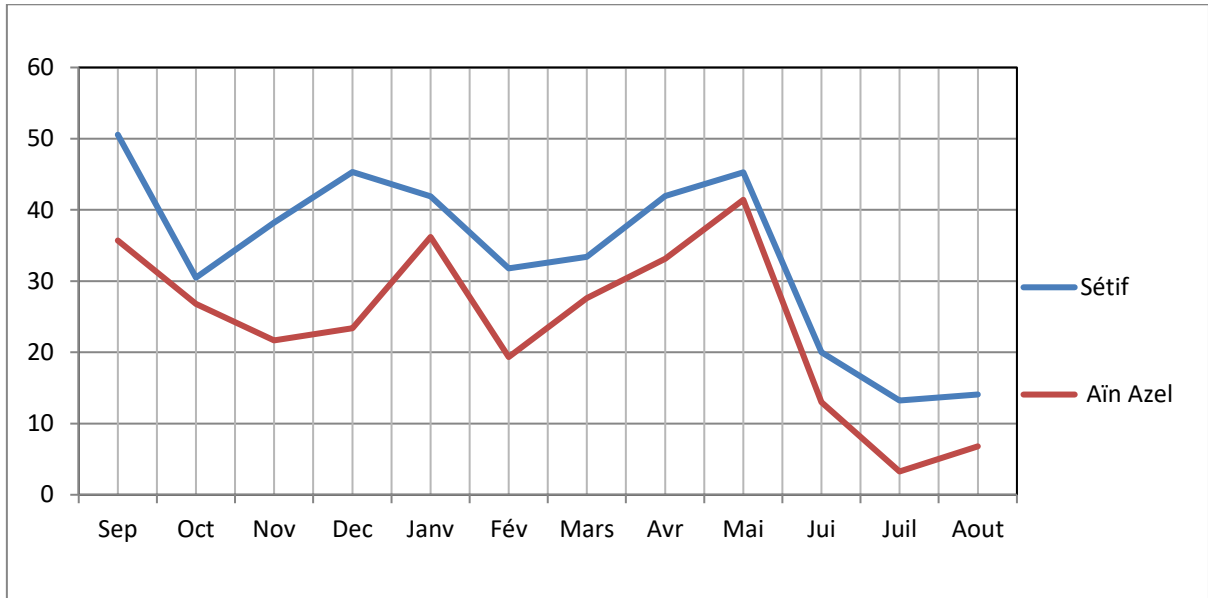
Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations sont portées dans le tableau  
Suivant :

**Tableau II. 5.** Précipitations moyennes mensuelles de la station Aïn-Azel et Sétif  
(1990-2010 – ONM-Sétif)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout
<b>Sétif</b>	50,56	30,47	38,22	45,32	41,89	31,81	33,42	41,95	45,29	20	13,24	14,1

<b>Aïn-Azel</b>	35,71	26,8	21,7	23,4	36,2	19,32	27,6	33,13	41,42	13	3,27	6,78
-----------------	-------	------	------	------	------	-------	------	-------	-------	----	------	------

Le tableau des précipitations moyennes mensuelles exprimé courbe (Fig. II.5.) montre que la dépression d'Aïn-Azel est caractérisée par une saison plus ou moins pluvieuse des mois de Septembre à Mai.



**Fig. II.5.** Courbes des variations des précipitations moyennes mensuelles.

D'après le graphique, on constate que les mois les plus pluvieux sont : Septembre pour Sétif et le mois de Mai pour Aïn-Azel. Par contre le mois le plus sec est celui du mois de Juillet pour les deux stations

#### b). Précipitations moyennes annuelles (série 1990-2010).

Les données recueillies auprès de l'ONM de Sétif sont portées sur le tableau II.3.

L'histogramme de la figure (Fig. II.6) représente les valeurs moyennes annuelles des précipitations issues des précipitations des stations d'Aïn-Azel et de Sétif.

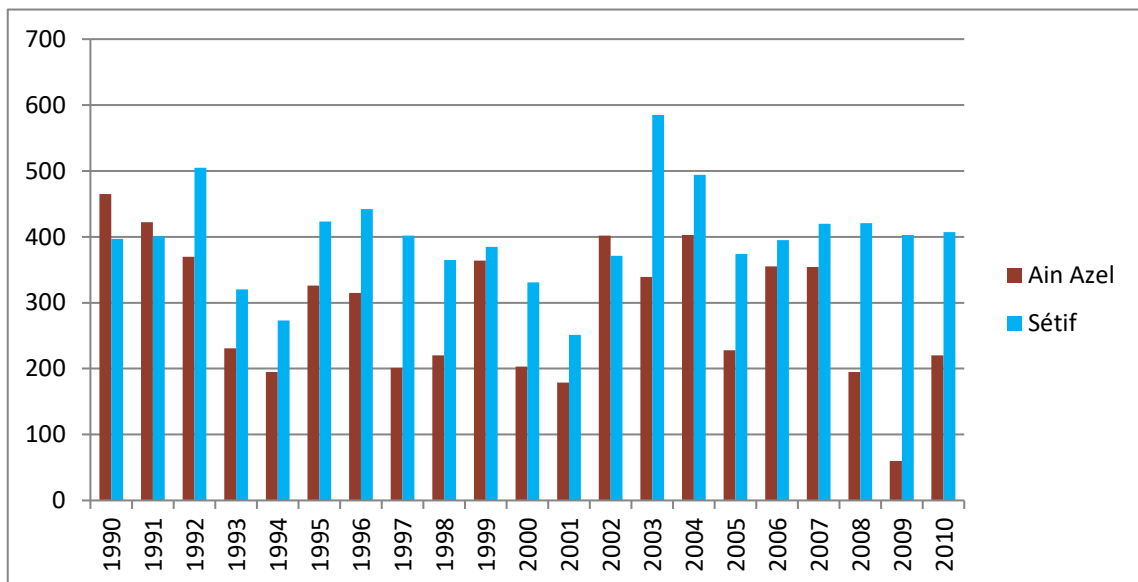
**Tableau II.6.** Précipitation moyennes annuelles (1990-2010 – ONM-Sétif)

Année	Aïn-Azel	Sétif	Année	Aïn-Azel	Sétif
<b>1990</b>	464.3	396.71	<b>2001</b>	178.4	251.3
<b>1991</b>	422.1	401.2	<b>2002</b>	401.9	371.0
<b>1992</b>	369.7	505.2	<b>2003</b>	338.9	585.0
<b>1993</b>	231.0	319.9	<b>2004</b>	403.3	494.1

<b>1994</b>	195.3	272.6	<b>2005</b>	227.9	373.8
<b>1995</b>	325.4	422.4	<b>2006</b>	355.0	394.5
<b>1996</b>	315.2	442.9	<b>2007</b>	354.4	419.7
<b>1997</b>	290.4	402.4	<b>2008</b>	185.2	421.2
<b>1998</b>	220.1	465.3	<b>2009</b>	60.0	403.0
<b>1999</b>	263.8	384.5	<b>2010</b>	220.2	407.3
<b>2000</b>	<b>203.0</b>	<b>331.2</b>			

On constate que l'année la plus pluvieuse à Aïn-Azel est l'année 1990 avec 465mm tandis que l'année 2009 n'a enregistré que 60mm

A partir de ces données on a dressé un histogramme (fig. II.6)



**Fig. II.6.** Histogrammes des précipitations moyennes annuelles (1990-2010)

D'après ce graphique on constate que l'année la plus pluvieuse est l'année 1990 pour la station d'Aïn-Azel et l'année 2003 pour la station de Sétif. Il est à noter que le 2 juin 1990 est le jour de la catastrophe. C'est dire que l'inondation est en relation avec les eaux pluviométriques

### II.2.3.2. TEMPERATURES

Les températures constituent avec les précipitations les éléments majeurs qui régissent le climat d'une région. Elles constituent un facteur très important qui intervient dans le calcul de l'évapotranspiration.



Les données de températures mensuelles sur une période de 10 ans (1990 à 2010), vont nous servir dans l'estimation et le calcul des différents paramètres et à l'établissement d'un graphe Ombro-thermique.

L'examen du Tableau.2 montre bien que la température moyenne interannuelle est de 17,93 C°, avec les mois de juin, juillet, août et septembre, comme mois les plus chauds, avec un maximum de température au mois de juillet de l'ordre de 26,9 C° , et un minimum au mois de janvier avec 6.1°C.

### II.2.3.2.1. VARIATIONS DES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES

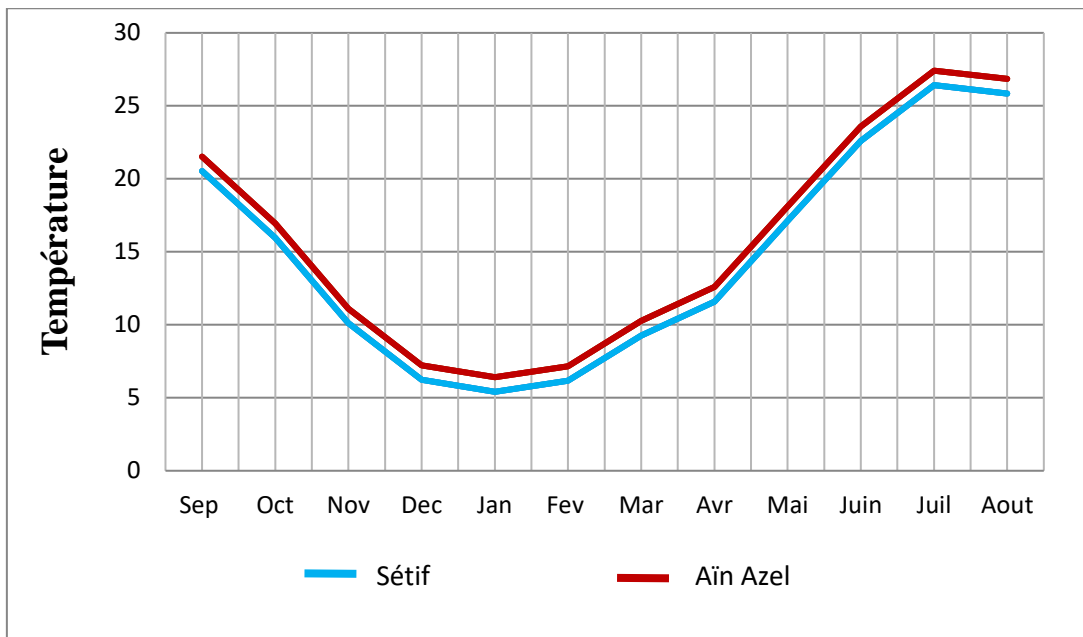
La distribution des températures moyennes mensuelles est très irrégulière, on note que les mois les plus chauds sont Juin, Juillet et Aout, et les mois les plus froids sont Décembre, Janvier et Février ;

**Tableau II.7.** : Variations de températures moyennes mensuelles des stations Aïn-Azel et Sétif durant la période (1990-2010 - ONM-Sétif)

Station d'Aïn-Azel											
Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
21,53	16,94	11,11	7,23	6,41	7,16	10,26	12,59	18,11	23,58	27,41	26,85
Station de Sétif											
Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
20,53	15,94	10,11	6,23	5,41	6,16	9,27	11,59	17,12	22,59	26,42	25,85

D'après le graphique (Fig. II.7), on en déduit que le mois le plus chaud est le mois de juillet pour les deux stations. Par contre le mois le plus froid est le mois de janvier dans les deux régions.

Comparant les résultats des deux stations, on remarque qu'ils sont presque identiques ; sauf que la région de Sétif est moins chaude par rapport à Aïn-Azel mais avec une petite différence.



**Fig. II.7.** Variation des températures moyennes mensuelles

### II.2.3.2.2. LA COURBE OMBROTHERMIQUE

Un diagramme Ombrothermique est un type particulier de diagramme climatique représentant les variations mensuelles sur une année des températures et des précipitations selon des gradations standardisées : une gradation de l'échelle des précipitations correspond à deux gradations de l'échelle des températures où sont portées en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (**P**) et les températures (**T**), avec **P=2T**.

Il a été développé par Henri Gaussen et F. Bagnouls, botanistes célèbres, pour mettre en évidence les périodes de sécheresse définies par une courbe des précipitations se situant en dessous de la courbe des températures. Ces diagrammes permettent de comparer facilement les climats de différents endroits d'un coup d'œil du point de vue pluviosité. Les températures sont indiquées à gauche et les précipitations sont indiquées à droite.

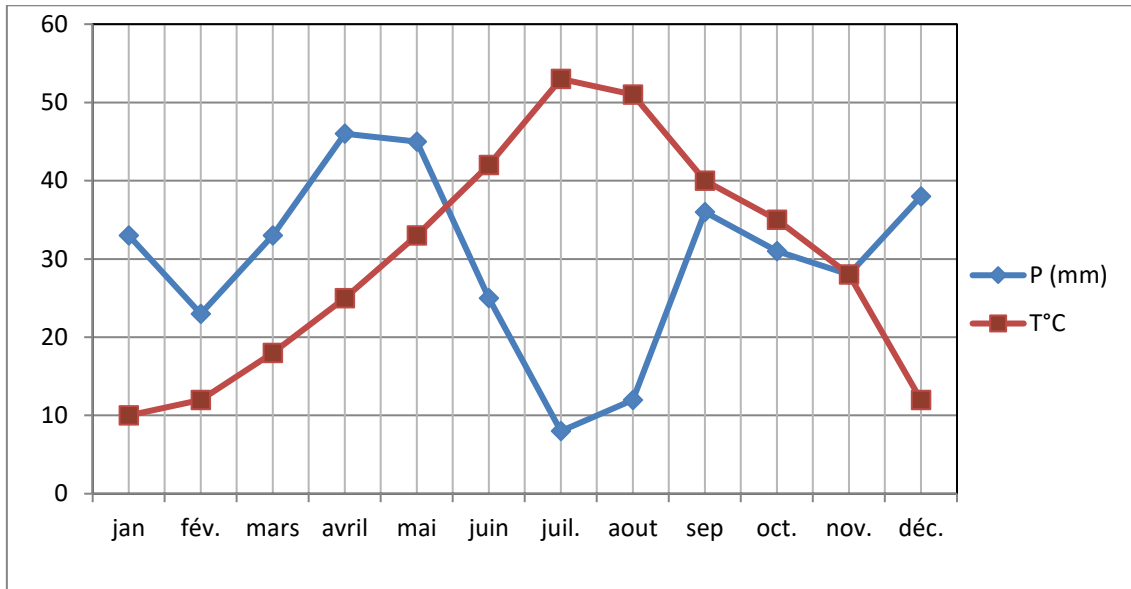
Le Diagramme Ombrothermique de la région d'Aïn-Azel, établi à partir des données pluviométriques et thermiques moyennes mensuelles calculées sur une période de 10 ans.

**Tableau II.8.** Températures et précipitations moyennes mensuelles (Température: et Précipitation: Station de Aïn-Azel, période 2000-2010 – ONM-Sétif).

Mois	jan	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sep	oct.	nov.	déc.

P (mm)	33	23	33	46	45	25	8	12	46	31	28	38
T°C	5.1	6.2	9.6	12.2	16.8	22.6	26.5	25.3	20.0	16.0	9.3	5.9

A partir des données de ce tableau on a dressé le graphique suivant :



**Fig. II.8.** Courbe Ombrothermique.

D'après la courbe Ombrothermique, on peut distinguer deux périodes dans la région d'Aïn-Azel :

Une période humide allant de Décembre à Avril où les précipitations sont fortes par rapport aux températures.

Une période sèche allant du mois de Mai au mois de Novembre, cette période aussi on peut la diviser en deux, une période très sèche allant du mois de Mai au mois d'Août, et une autre un peu moins sèche qui débute à partir du mois de Septembre jusqu'à Novembre. Et une période pluvieuse de novembre à avril

### II.2.3.3. VARIATIONS DES PRECIPITATIONS DANS L'ESPACE

Il existe différentes méthodes qui permettent de déterminer la lame d'eau précipitée sur le sous-bassin versant à partir des précipitations moyennes annuelles, mesurées sur des stations différentes.

#### II.2.3.3.1. METHODE DES POLYGONES DE THIESSEN

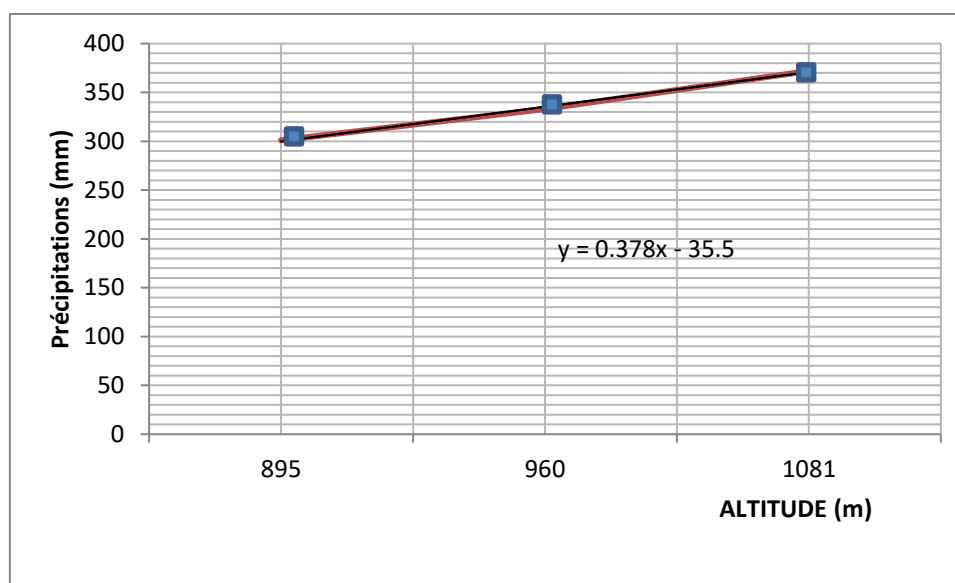
Par manque de données et de stations pluviométriques, cette méthode ne peut être convenablement appliquée. En effet on ne dispose que de trois stations dont les mesures ne sont pas ponctuelles.

### II.2.3.3.2. METHODE DES ISOHYETES

Cette méthode consiste à déterminer un gradient altimétrique de la pluviométrie. Le gradient altimétrique du bassin a été déterminé selon trois stations seulement (Tableau II.10), avec la réalisation d'une droite de régression (Fig.II.9).

**Tableau II.10.** Caractéristiques des stations utilisées

Station	Altitude (m)	Précipitation (mm)	Période commune
Beida Bordj	895	301,5	1988-89-90-91
Aïn-Azel	960	327,4	1988-89-90-91
Sétif	1081	371,9	1988-89-90-91



**Fig. II.9.** Droite de régression

L'accroissement des précipitations avec l'altitude est obtenu par l'équation de la droite de régression qui est de la forme :

$$P = 0.378H - 35.50$$

Soit une augmentation de 37,7 mm de pluie pour 100 m d'altitude.

Ce gradient altimétrique de précipitation est comparable à celui donné par Mr. OUAZOUAZ (2002) qui est de 37,5/100, celui de Mr. BELLOUCHE (1996) qui est de 38/100 et celui de Mr. SARRY à l'échelle du Hodna (1976) avec 40/100.

Ce résultat va permettre de calculer les précipitations par tranche d'altitude (voir tableau II.11).

La moyenne pondérée des précipitations sur le sous-bassin versant est calculée selon l'expression :

$$P = \frac{\sum p_i s_i}{\sum s_i} = 339 \text{ mm}$$

**Tableau II.10** : répartition par tranche d'altitudes (surface, précipitation)

Altitude moy (m)	Surface (km <sup>2</sup> )	Précipitation (mm)	$\sum P_i S_i$	$\sum h_i S_i$
>14				
13	3	4	142	406
12	7	4	335	958
11	1	3	541	156860
10	2	3	979	285495
9	9	3	296837	873031
8	1	2	473	140760
<7	1	2	37	126
Total	16		547692	1605241

## II.2. 3.4. VARIATION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR

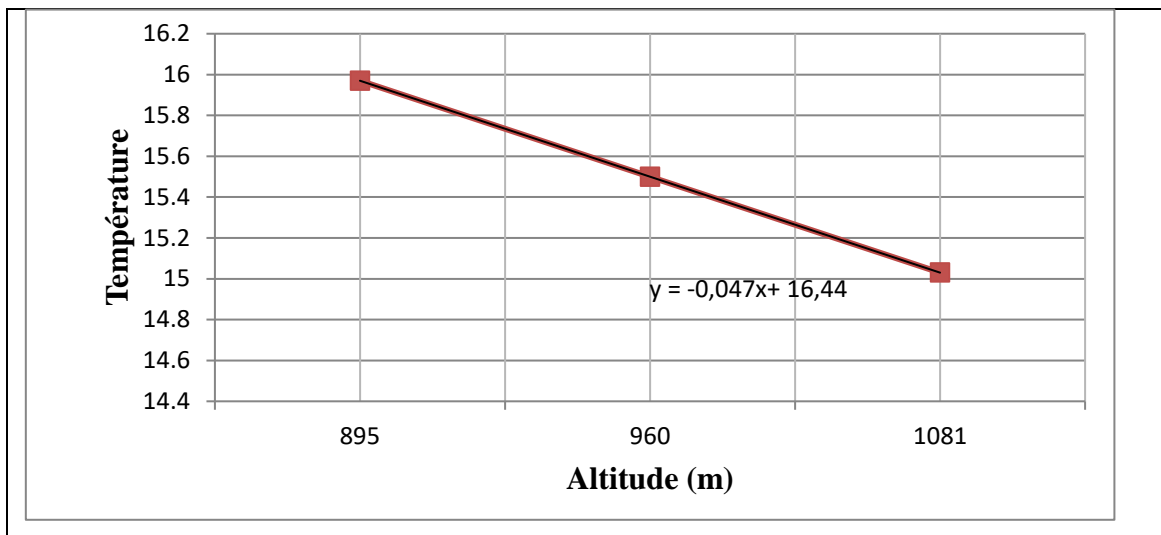
Cette méthode consiste à déterminer un gradient altimétrique de la température.

Le gradient altimétrique du bassin a été déterminé selon trois stations seulement (Tableau II.12), avec la réalisation d'une droite de régression (Fig.II.10).

**Tableau II.11.** Caractéristiques des stations utilisées

Station	Altitude (m)	Température ( °C )	Période commune
Beida Bordj	895	15.97	1988-89-90-91
Aïn-Azel	960	15.50	1988-89-90-91
Sétif	1081	14.03	1988-89-90-91

Comme pour les précipitations un gradient altimétrique des températures a été déterminé à partir des stations de Sétif, Aïn-Azel et Beida-Bordj. (In BELLOUCHE 1996)



**Fig. II.10.** Droite de régression

. La droite de régression obtenue à partir des températures moyennes annuelles en fonction des altitudes des stations considérées est donnée par la relation :

$$T = - 0.047H + 16.44$$

Soit une diminution de 0.47 par 100m d'altitude

Le gradient altimétrique des températures calculé « 0.47°C » est approximativement identique à celui utilisé par l'ONM « 0.83 °c » et celui proposé par Bellouche 1996 « 0.5 °c »

La température moyenne d'Aïn-Azel selon la formule ci-dessus est de 15.47 C°, et on retient 15.5 C° pour son utilisation dans les calculs.

#### II.2.3.4.1. INDICE CLIMATIQUE

DE MARTONNE a défini un indice *A* qui tient compte des précipitations et des températures. Cet indice est calculé par la formule suivante :

$$A = \frac{P}{T+10} = 13.30$$

*A* : Indice d'Aridité de Martonne

*P* : précipitation moyenne annuelle

*T* : température moyenne annuelle

Selon DE MARTONNE, les valeurs de l'indice climatique comprises entre 10 et 20 caractérisent un milieu semi-aride.

## II.2.4. BILAN HYDROLOGIQUE

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

L'équation du bilan s'écrit comme suit :

$$P = E + R + I$$

**P:** la hauteur de la lame d'eau précipitée sur le bassin versant en mm

**E:** l'évapotranspiration en mm

**R:** le ruissellement en mm

**I:** l'infiltration

L'évaporation et l'évapotranspiration sont deux termes désignant les pertes en eau par son retour direct à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau.

- L'évaporation constitue les pertes en eau subie par les surfaces d'eau libre.

- L'évapotranspiration correspond à un phénomène plus complexe généré par deux processus différents : Evaporation physique de l'eau dans le sol et la transpiration due à l'utilisation de l'eau par les plantes et son rejet sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

### II.2.4.1. EVAPOTRANSPIRATION REELLE ANNUELLE (ETR)

L'ETR annuelle moyenne peut être déterminée in situ par évaporomètres ou par des formules empiriques et abaques.

#### II.2.4.1.1. FORMULE DE L. TURC

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

**P:** Précipitation annuelle moyenne en mm

**T:** Température annuelle moyenne en °C

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 = 873,69375$$

Les résultats de calcul sont donnés sur le tableau suivant :

**Tableau. II.12.** Calcul de l'E.T.R annuelle selon la formule de L. Turc.

Station	P (mm)	T° C	L	ETR (mm)	ETR (%)
Aïn-Azel	339	15.50	873,69375	331	98

Soit une valeur de : ETR= 331mm et qui représente 98% des précipitations

#### II.4.1.2. FORMULE DE COUTAGNE

Cette formule fait intervenir deux paramètres: précipitation P et température T.

$$D = P - \lambda P^2$$

Avec:

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T}$$

Et cette formule ne sera valable qu'après la vérification de la condition suivante:

$$\frac{1}{8\lambda} \leq P \leq \frac{1}{2\lambda}$$

Où:

- **D**: déficit d'écoulement en mm par an
- **P**: précipitation moyenne annuelle en mm
- **T**: température moyenne annuelle en °C
- **λ**: paramètre dépendant de la température.

Application numérique:

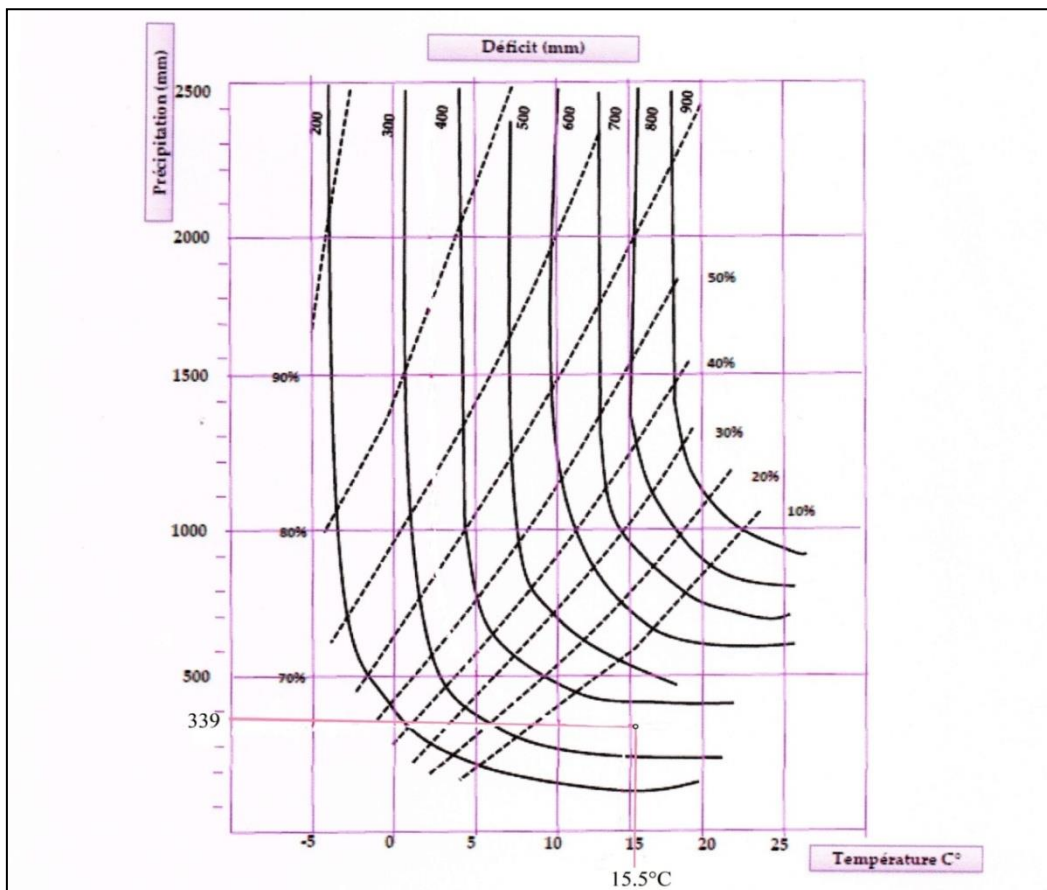
T (°C)	λ	1/8λ	1/2λ	P (mm)
15.5	0.33	0.37	1.48	339

La condition n'est pas vérifiée, ce qui signifie que la relation n'est pas applicable

#### II.4.1.3. DETERMINATION DE L'ETR PAR L'ABAQUE DE WUBDT

L'évaporation réelle peut être évaluée à partir de l'abaque de WUNDT modifié par COUTAGNE, donnant le déficit d'écoulement moyen annuel en fonction de la température moyenne et précipitation moyenne annuelle(Fig.II.11).





**Fig. II.11.** Abaque donnant le déficit d'écoulement moyen annuel d'après Wundt (Modifié par Coutagne).

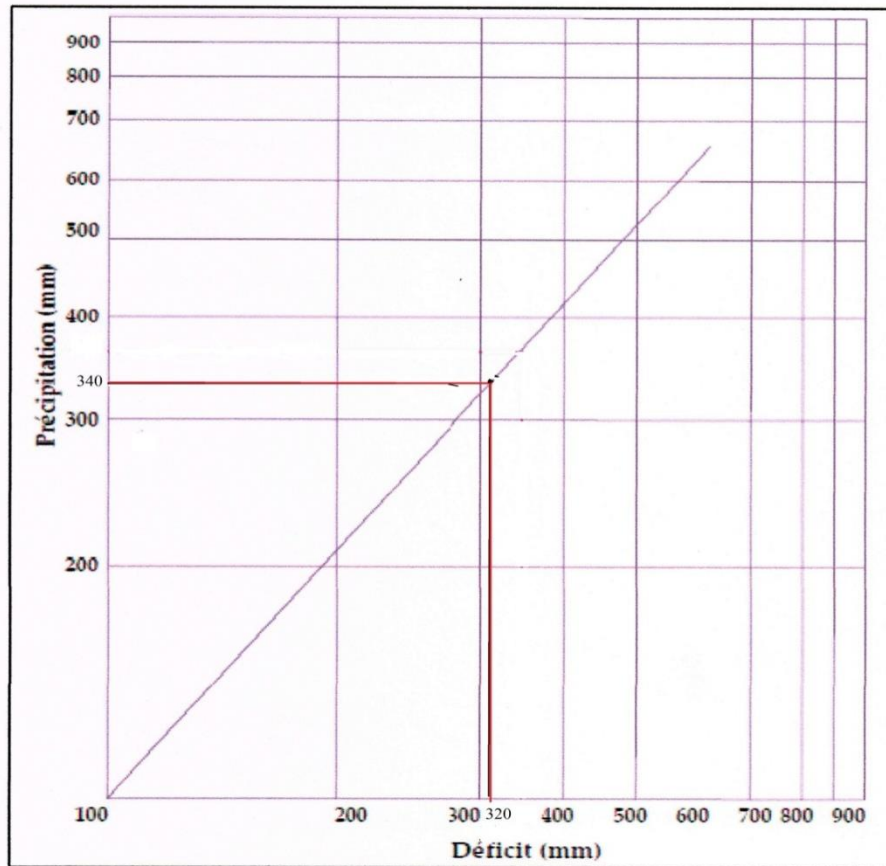
D'après l'abaque on a : ETR = 335 mm, soit 92% des précipitations

#### II.4.1.4. METHODE DE P. VERDEIL (1988)

P. Verdeil a établi en 1988 un abaque bi-logarithmique pour les régions algériennes semi-arides où les précipitations ne dépassent pas les 600 mm/an.

La valeur de la précipitation moyenne annuelle de la station d'Aïn-Azel est de l'ordre de 339mm et la température moyenne annuelle est de l'ordre de 15.5°C.

La projection de cette dernière sur l'abaque donne une valeur du déficit d'écoulement de 320mm, (soit 98% des précipitations) (Fig.II.12).



**Fig.**

**II.12.** Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie.

(D'après P.Verdeil -1988)

La projection de cette dernière sur l'abaque donne une valeur du déficit d'écoulement de 320mm (soit 95, %).

#### **II.4.1.5. EVALUATION DE L'ETP PAR LE BILAN DE THORNTHWAITE**

A cet effet, Thornthwaite a établi une corrélation entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration potentielle mensuelle.

La formule utilisée pour le calcul de l'ETP selon Thornthwaite est donnée comme suit :

$$ETP = 16[10 \cdot T/I]^{\alpha}$$

ETP : Evapotranspiration Potentielle

T : Température du mois considéré

$\alpha$  : Exposant climatique avec  $\alpha = 0.49239 + (675 \cdot 10^{-9} I^3) - (771 \cdot 10^{-7} I^2) + 1792 \cdot 10^{-5} I$

I

Cette méthode de calcul consiste à établir un bilan mensuel à partir des termes suivants :

L'indice thermique mensuel :  $i$  ;

- L'indice thermique annuel :  $I$  ;
- L'évapotranspiration potentielle mensuelle non corrigée :  $EP$  ;
- L'évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée :  $ETP$  ;
- Réserves facilement utilisables :  $RFU$ .

**- L'indice thermique mensuel :  $i$**

Cet indice est calculé à partir de la température moyenne mensuelle ( $t$ ) du mois considéré

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

**- L'indice thermique annuel :  $I$**

Cet indice est la somme des indices mensuels des douze (12) mois de l'année.

$$I = \sum_{i=1}^{12} i$$

**a). Calcul de l'évapotranspiration potentielle mensuelle non corrigée :  $EP$**

Elle se calcule selon la formule suivante:

$$EP = 16 \times \left( \frac{10T}{I} \right)^A$$

Avec  $A = (6.75 \times 10^{-7} \times I^3) - (7.71 \times 10^{-5} \times I^2) + (1.79 \times 10^{-2} \times I) + 0.049239$

**b). Calcul de l'évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée  $ETP$**

L'évapotranspiration potentielle mensuelle ( $EP$ ) corrigée est obtenue en multipliant  $EP$  par un coefficient de correction  $K$ , dépendant de la latitude du sous-bassin versant et donc de l'insolation. Ce paramètre est donné par un tableau type.

### c). Calcul des réserves facilement utilisables RFU

Avant de commencer le calcul du bilan, il faut mentionner que la RFU (Réserves facilement utilisables) est calculée à partir de la formule de Hallaire.

$$RFU = \frac{C - F}{100} \times H \times d + 30mm$$

Tel que:

**RFU**: Réserves facilement utilisées ;

**C**: capacité de rétention du sol: c'est- à- dire, elle correspond au maximum d'eau que le sol peut retenir lorsque son drainage est assurée librement;

**F**: capacité au point de flétrissement: c'est- à- dire, c'est la limite inférieure de l'eau absorbable par les plantes;

**H**: profondeur d'enracinement;

**D**: densité apparente du sol.

Les **30mm** correspondent à l'enracinement capillaire pour les sables limoneux.

Ne disposant pas de ces paramètres, nous retenons une valeur de 36mm pour la RFU correspondant à la quantité d'eau optimale que le sol peut retenir (M.A. Bellouche, 1996). La valeur de 36mm pour la RFU est utilisée pour les calculs.

Le bilan fait intervenir deux paramètres essentiels: la température  $T^{\circ}$  et les précipitations  $P$ . La détermination de l'ETR tient compte de la recharge du sol due aux précipitations et à la décharge due à l'évaporation. La différence entre l'ETP et l'ETR constitue le déficit agricole.

Le bilan de Thornthwaite est établi à partir du mois de Septembre, au moment où les réserves commencent à se reconstituer.

- Si  $P > ETP \rightarrow ETR = ETP$
- Si  $P < ETP$  on a soit :
  - $ETP \leq P + RFU$ :  $ETR = ETP$
  - $ETP > P + RFU$ :  $ETR = P + RFU$

**Tableau II.13** : Estimation du bilan hydrologique selon THORNTHWAITE durant la période (1990-2010) de la station d'Aïn-Azel.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Σ
T	21.7	16.5	10.9	7.2	6.1	7.3	9.8	12.4	17.7	22.9	26.9	26.6	15.5
i	9.22	6.09	3.25	1.73	1.35	1.77	2.77	3.95	6.78	10.01	12.77	12.56	72.25
EP	97.02	61.95	31.3	15.9	12.1	16.27	26.37	38.78	69.5	106.01	138.03	135.5	748.84
K	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	
ETP	100	60	27	14	11	14	27	42	84	128	170	157	834
P	36	26	25	33	33	26	33	34	46	20	14	13	339
RFU	0	0	0	17	36	36	36	19	0	0	0	0	
ETR	36	26	25	14	11	14	27	55	48	20	14	13	299
EXC					22	12	6						40
DEF	64	34	2						38	108	156	144	540

On obtient :

ETR= 299mm, soit 88 % des précipitations.

Excédent = 40 mm, correspond à l'infiltration et au ruissellement.

Les valeurs de l'ETR calculées par les différentes méthodes ne sont pas toutes comparables.

Les résultats de THORTHWAITE et l'abaque de WUNDT semble plus proches des résultats obtenus par d'autres auteurs algériens qui ont travaillé sur le site.

Les valeurs de l'évapotranspiration réelle ETR obtenues par les différentes méthodes sont regroupées dans le tableau II.8.

En zone semi-aride, l'estimation de l'évapotranspiration réelle par les méthodes classiques est très délicate, les résultats restent en fait discutables car ils sont déduits de formules empiriques faisant intervenir :

- soit des variables telles que les précipitations P et les températures T°
- soit des coefficients en relation avec le climat ou la situation géographique;
- soit une valeur telle que la réserve en eau RFU (36mm) qui est une valeur approximative en absence de mesures in situ.
- En zone semi-aride, l'abaque de Verdeil semble donner les valeurs les plus fiables pour ce type de régions.
- La méthode de THORTHWAITE semble mieux décrire la réalité puisqu'elle fait intervenir plusieurs facteurs intrinsèques du milieu.
- Par contre les résultats de la méthode de TURC ne sont pas appliqués

puisque, cette relation convient beaucoup plus aux climats tempérés.

**Tableau. II.14. Les valeurs de l'ETR selon les différentes méthodes.**

Méthode	ETR (mm)	Taux /P
Turc	331	97.5%
Coutagne	Non justifiée	
Abaque deWundt	335	98.8%
Abaque deVerdeil	320	95%
Thornthwaite	299	88%

**d). Estimation du ruissellement annuel**

La formule de TIXERONT-BERKALOFF est applicable en zone semi-aride, elle permet d'estimer le ruissellement à l'aide de la relation suivante :

$$R = \frac{P^3}{3 \times ETP^2}$$

**R:** Ruissellement annuel en mm;

**P:** Précipitations moyennes annuelles en mm

**ETP:** Évapotranspiration potentielle annuelle en m

Application numérique:

<b>P</b> (mm)	<b>ETP</b> (mm)	<b>R</b> (mm)
339	834	19

**RAPPEL:** l'équation du bilan hydrologique est:  $P = E + R + I$

De ce qui précède, on retient les valeurs suivantes:

$P = 339\text{mm}$

$E = 299\text{mm}$  soit 88%

$R = 19\text{mm}$  soit 5.6%

}  $\longrightarrow$   $I = 21 \text{ mm}$  soit 6 % des précipitations

**II.3.4.2.. CONCLUSION**

Le secteur étudié est caractérisé par un climat sec semi-aride avec des précipitations moyennes annuelles de 339mm et des températures moyennes annuelles de 15.5°C.

La période de sécheresse est assez longue puisqu'elle débute au mois de Juin jusqu'à la fin Septembre. L'évapotranspiration réelle est de 299mm soit 88% des précipitations alors que l'infiltration ne représente que 6%. On a donc une faible alimentation des eaux souterraines.

## *Chapitre Troisième*

# **CADRE HYDROGEOLOGIQUE DU GISEMENT DE CHAABET EL HAMRA**

### **III. 1. ETUDE DU GISEMENT DE CHAABET EL HAMRA**

#### **III.1.1.INTRODUCTION**



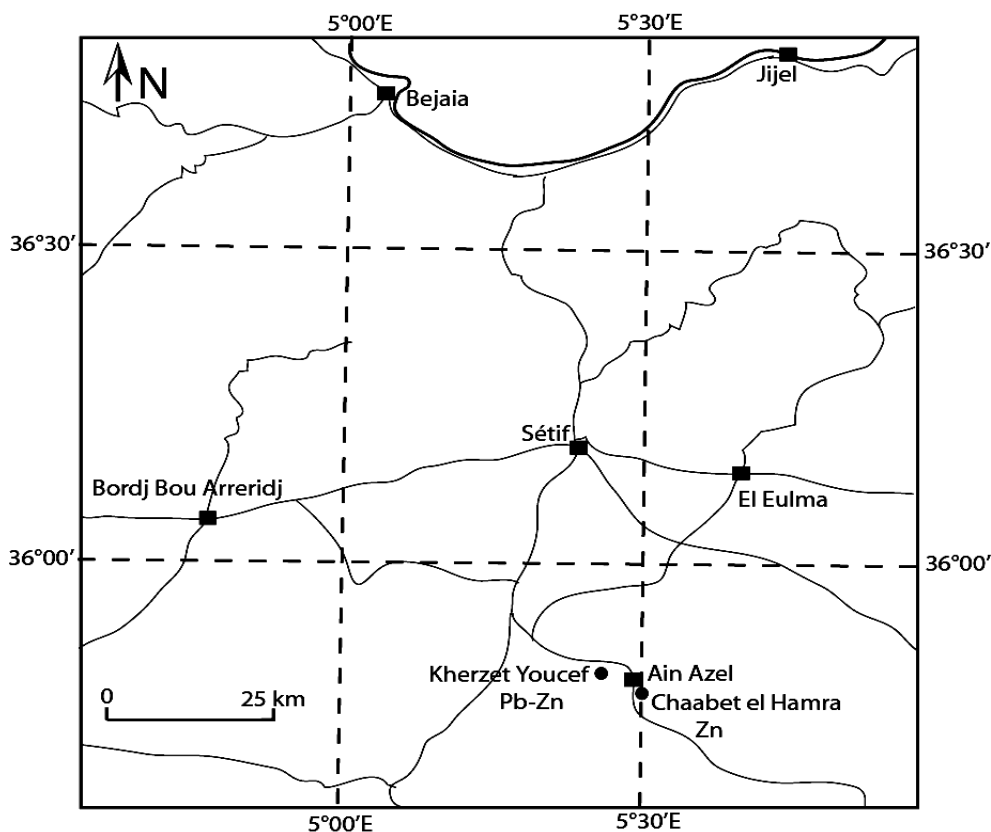
Le terrain d'étude fait partie du domaine hodnéen dont les séries sédimentaires se rapportent essentiellement au mésozoïque

Le gisement de Chaâbet-El-Hamra occupe la partie Sud-ouest du Horst anticlinal de Rahbet-Talkhemt localisé dans le district de Fourhal.

L'Objectif de notre étude est de donner un aperçu sur la stratigraphie et la tectonique de la région afin de déterminer la structure et l'hydrogéologie du gisement de Chaâbet-El-Hamra.

### III.1.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE DU GISEMENT DE CHAABET EL HAMRA

Le gisement Chaâbet-El-Hamra est situé à environ 50 km au Sud de Sétif, dans la région de Chouf- Bouarket à 4,5 km d'Ain-Azel et à 12 km au Sud-est du complexe minier de Kherzet Youssef (Fig.III.1).



**Fig.III.1.** Situation géographique de la mine de Chaâbet-El-Hamra  
(D'après l'ANRH, 2010)

### III.1.3. HISTORIQUE DES TRAVAUX MINIERS

Le gisement de Chaâbet-El-Hamra fût découvert au début du siècle dernier grâce à l'affleurement de corps de minerai. Cette mine a connu durant la période coloniale, des

travaux d'exploitation des affleurements de silicate de zinc (oxydés) de 1910 à 1920 et de 1936 à 1941

Après l'Indépendance, de 1967 à 1988, la SONAREM a effectuée des travaux géologiques, quelques sondages de prospection et des évaluations ont été effectuées sur le gisement. Ensuite L'EREM a complété l'étude en réalisant des sondages à maille régulière de 50X100m, et 100X100, de 1989 à 1991.

En 1991 et suite au coup d'eau survenu le 02 Juin 1990 à la mine de Kherzet Youssef et qui a mis fin à l'exploitation du gisement, l'ENOF a élaboré un premier dossier de recherche détaillée par ouvrages miniers sur le gisement de Chaâbet El-Hamra.

L'extraction du tout-venant démarré en Avril 1994 tout au fond pour préciser les réserves géologiques et les conditions hydrogéologiques.

### **III.1.4. CONDITIONS GEOLOGIQUES DU GISEMENT**

Le gisement de CHAABET EL HAMRA fait partie de district de Fourhal qui constitue la limite septentrionale des monts de Hodna qui renferment d'importantes minéralisations en Pb-Zn. (Fig.III.2 et Fig.III.3). Il est associé au Horst anticlinal de Rahbat-Talkhempt.

#### **III.1.4.1. LA STRATIGRAPHIE**

Les formations du gisement sont constituées essentiellement de terrains du Crétacé inférieur (Valanginien, Hauterivien, Barrémien et Aptien) recouverts par du miocène.

##### **III.1.4.1.1. LE CRETACE**

**a). Le Valanginien :** L'étude lithologique montre qu'il est composé de marnes gris-verdâtres avec des passées de grès, de dolomies gréseuses et argileuses et des calcaires à polypiers.

D'après J. Glaçon (1967) le banc de calcaire à polypiers est considéré comme repère stratigraphique, marquant la limite entre le Valanginien et l'Hauterivien.

**b). L'Hauterivien :** Les formations Hauteriviennes, présentent un grand intérêt du fait de la minéralisation zincifère qu'elles constituent. L'Hauterivien est subdivisé en deux niveaux :

L'Hauterivien inférieur : son épaisseur varie entre 100 et 120m, Il est constitué essentiellement de bas en haut par :

- Des dolomies grises massives, souvent à petits nodules de dimensions allant jusqu'à 2cm, de couleur blanchâtres ;

- Des dolomies grises à rougeâtres surmontées par des dolomies gréseuses et des marnes bariolées ;

- Des dolomies fortement hématitisées de couleur brune à rougeâtre

L'Hauterivien supérieur : Ce niveau est d'une épaisseur de 100 à 120m. Il comporte de bas en haut la succession suivante :

- Des grés à grains fins, avec à la base un niveau calcaire gris clair ;

- Dolomies grisâtres, à grains fins à moyen plus au moins hématitisées ;

- Dolomies massives à grains fins de couleur grise intercalées de marnes ;

- Des calcaires massifs de couleur grise en alternance avec des marnes et des grés ferrugineux. Le tout est surmonté par des dolomies massives à grains fins.

**c). Le Barrémien** : Le Barrémien est subdivisé en deux niveaux :

Le Barrémien inférieur : Son épaisseur est de 120m est comporte de bas en haut les formations suivantes :

- Une alternance de grés bariolés hématitisés et des dolomies gréseuses avec de filons de calcite et de matière ferrugineuse ;

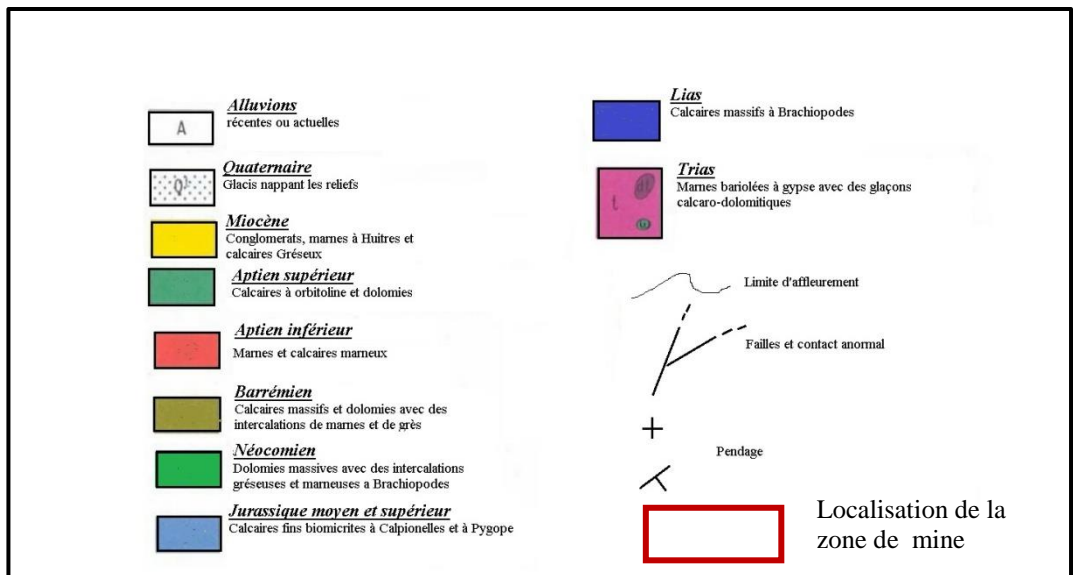
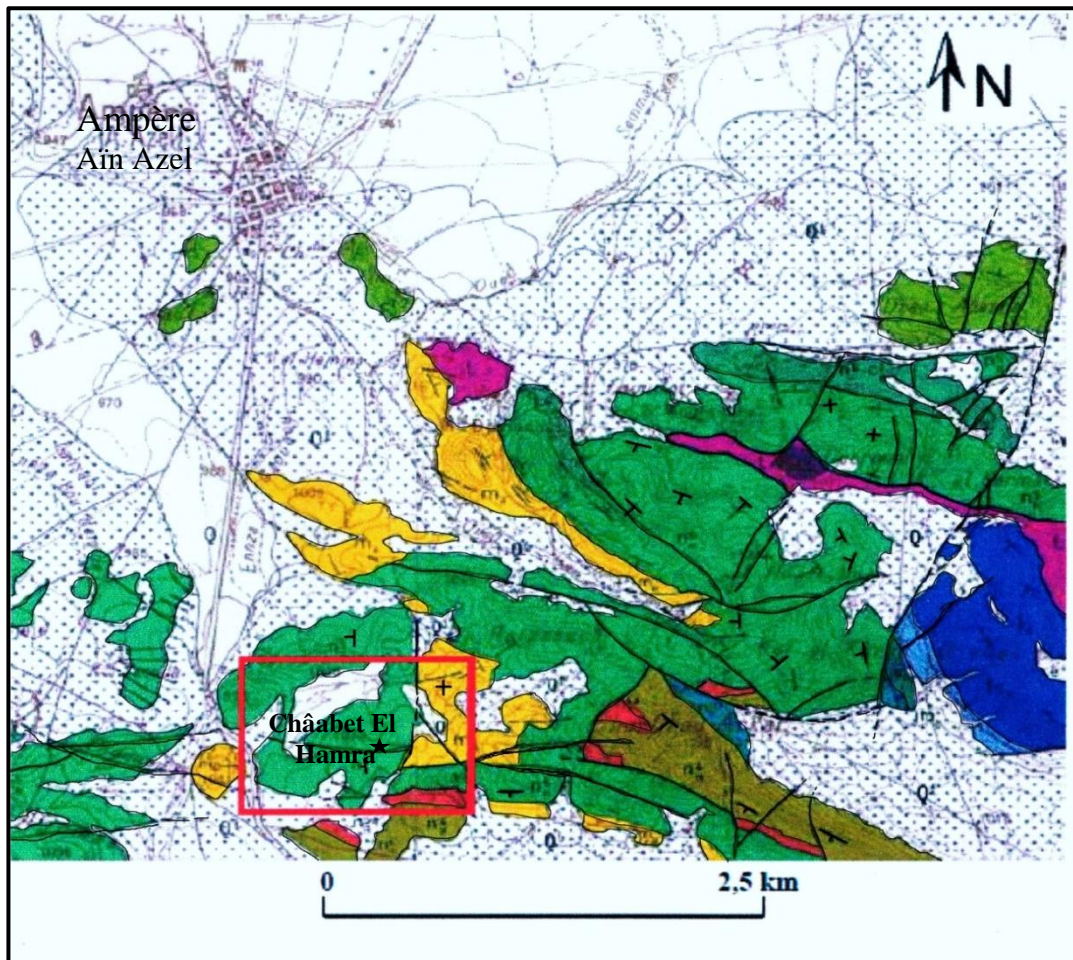
- Des dolomies à grains fins de couleur gris-blanchâtre intercalées de marnes et de calcaires marneux ;

- Des calcaires massifs, se terminant avec des bancs de marnes, de calcaires marneux et de dolomies massives grises.

Le Barrémien supérieur Ce niveau d'une épaisseur de 80m, est essentiellement représenté par :

- Des dolomies gréseuses massives à grains fins ou moyens ;

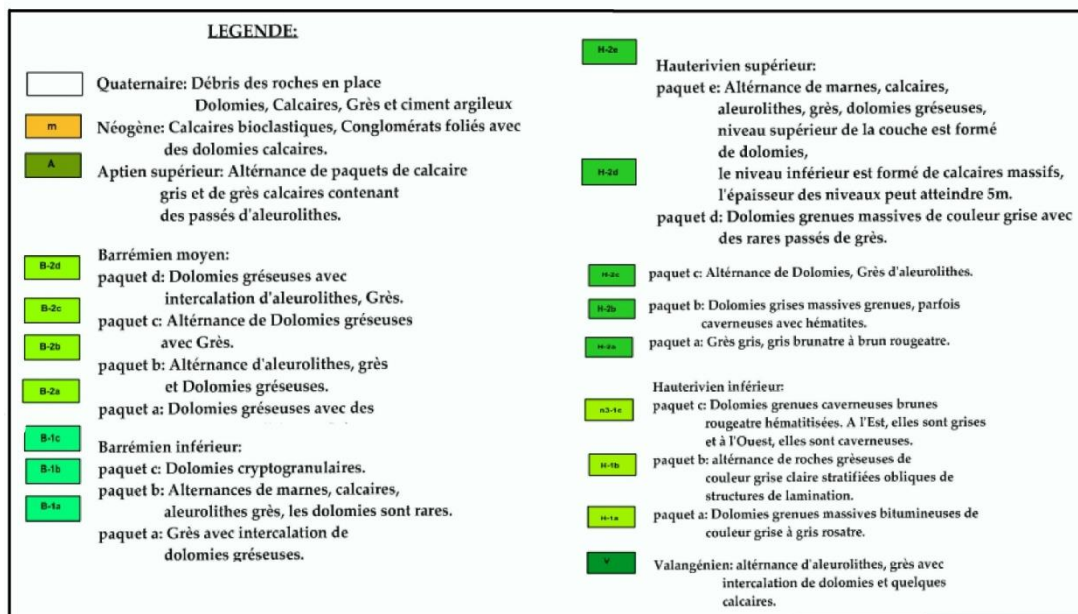
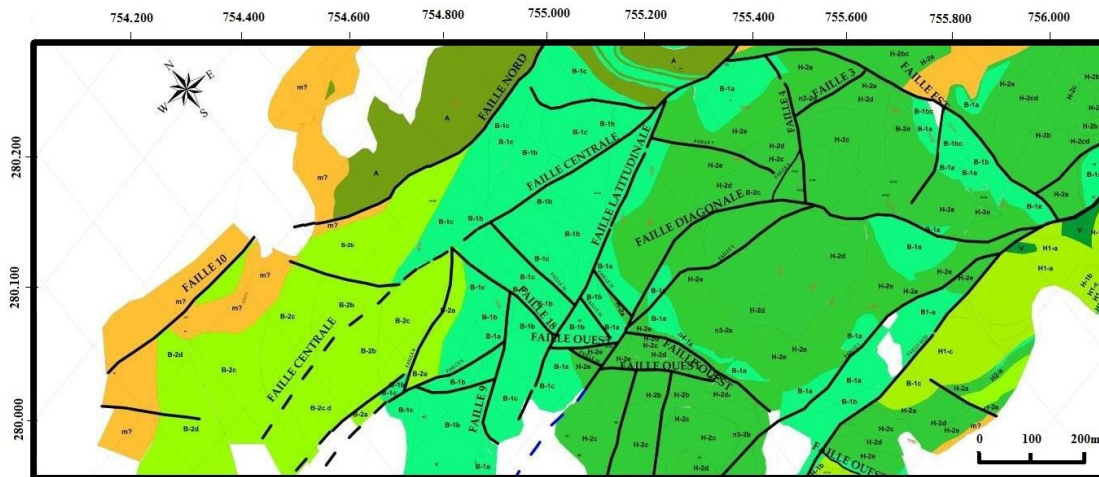
- Des grés bruns à grains fins en intercalation de dolomies gréseuses.



**Fig.III.2.** carte géologique des environs de la mine de Chaâbet-El-Hamra

Carte géologique au 1/50.000 d'Aïn-Azel, Sonatrach, (1977)

Une carte géologique du carré minier a été réalisée pour un meilleur détail (Fig.III.3).



**Fig.III.3.** Carte géologique détaillée du carré minier (in Kada 2004)

**d). L'aptien :** Dans le secteur de Chaâbet-El-Hamra, les affleurements de l'Aptien sont incertains, mais d'après les données de l'E.R.E.M les formations Aptiennes ont été rencontrées au Sud de Chouf Bouarkat, et en profondeur par certains sondages au Nord du champ minier du champ minier, sous le quaternaire et le miocène.

Il est représenté de bas en haut par : Des calcaires massifs gris, et une alternance de grès friables et de calcaires gréseux

### III.1.4.1.2. LE MIOCENE

Le Miocène affleure uniquement sur le champ minier et au Chouf Bouarkat, où il repose en discordance sur les terrains barrémiens et hauteriviens. Il débute à la base par

des conglomérats, calcaires gris-blanchâtres, calcaires gréseux et grès de pecten au sommet.

### III.1.4.1.3. CONCLUSION

A la lumière de cette étude géologique, une colonne stratigraphique (Fig.III.4) a été réalisée pour étudier les formations favorables au développement d'aquifères

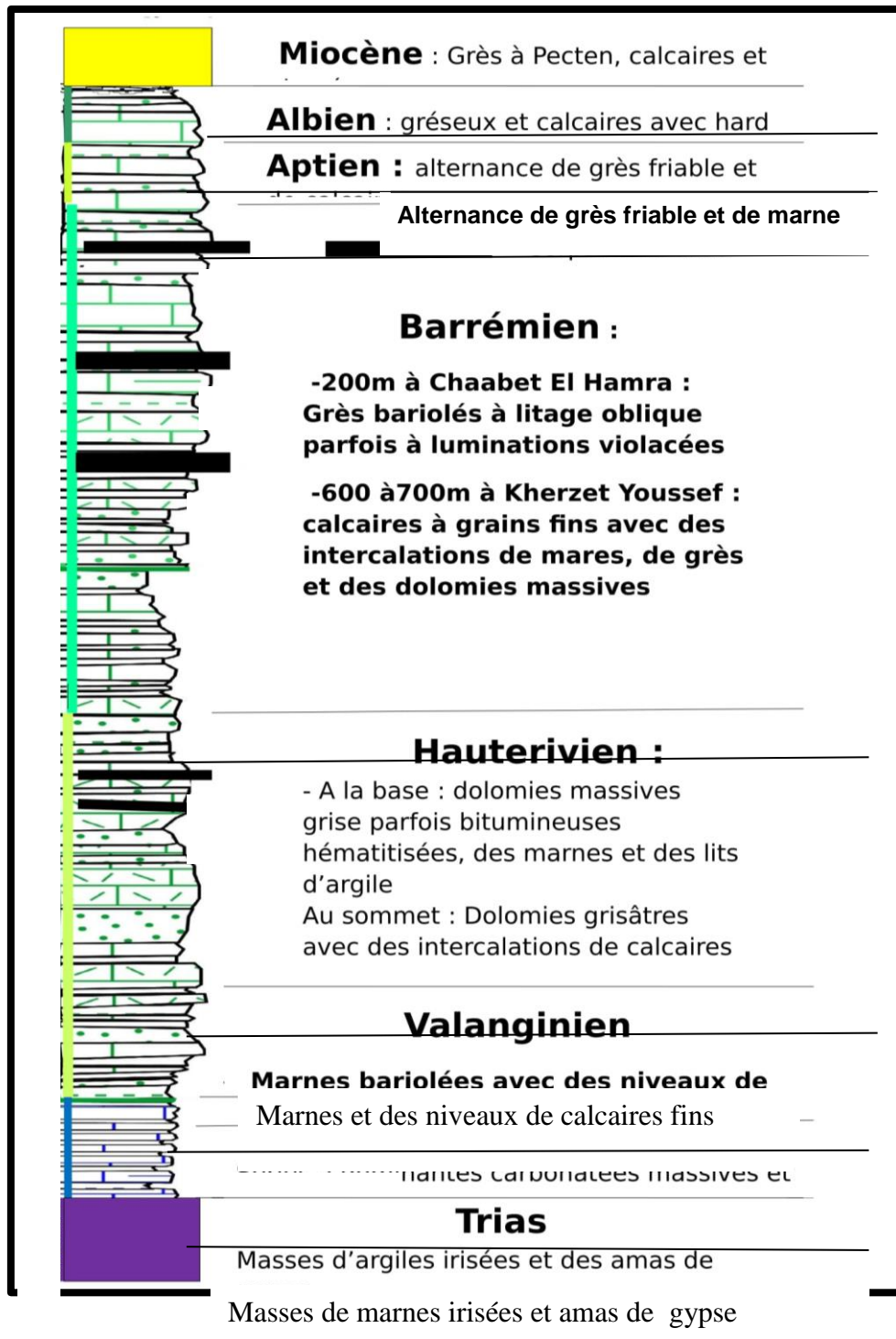


Fig.III.4. log stratigraphique du gisement de Chaâbet-El-Hamra et Kherzet Youssef

### III.1.4.2. TECTONIQUE

Le gisement de Chaâbet-El-Hamra est subdivisé en trois blocs :

#### III.1.4.2.1. UN BLOC EST :

Délimité en trois cotés par des failles, tandis que le côté Sud est ouvert et se trouve en contact avec les calcaires du Néogène. Le bloc Est présente une structure anticlinale, le pendage des flancs du pli est : 10° à

15° NE et 15° à 20° SW. Ce pli est compliqué par les failles surtout la faille Sud et la faille diagonale (voir la figure III.5).

#### III.1.4.2.2. UN BLOC CENTRAL :

Il a la forme d'un coin dans la partie Est, dont l'angle aigu est formé par le raccordement des failles centrale et latitudinale, et la partie opposée au coin s'élargisse à l'Ouest du gisement.

#### III.1.4.2.3. UN BLOC OUEST :

Il est localisé au NW de la faille normale et se trouve limité par des dislocations cassantes Est, Ouest, latitudinale et centrale.

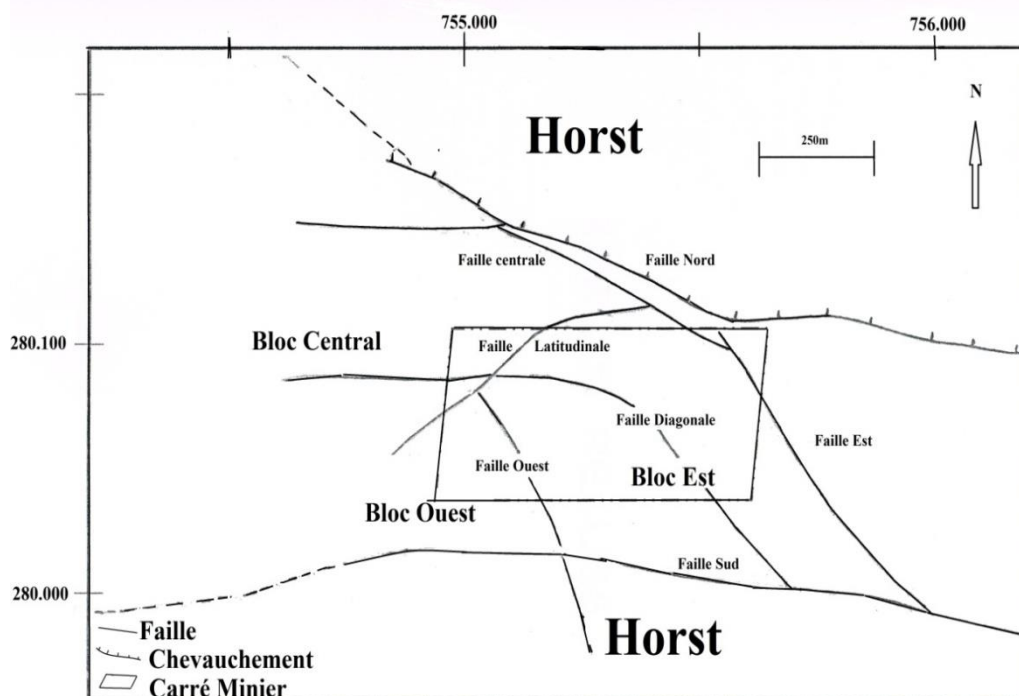


Fig.III.5 .Schéma structural de gisement de Chaâbet-El-Hamra, (source ENOF)

#### III.1.4.2.4. CONCLUSION

Les formations carbonatées Hauteriviennes et les failles favorisent la présence d'un aquifère avec une perméabilité de fissure. Les fissures favorisent la circulation des eaux et par conséquent leur karstification. Les grès et marnes du Barrémien favorisent la présence d'une nappe aquifère.

### **III.1.5. CADRE HYDROGEOLOGIQUE**

#### **III.1.5.1. TRAVAUX DE L'EREM (Entreprise de la recherche minière)**

Tenant compte des conditions hydrogéologiques de la région (mine de Kherzet Youssef située à 6km au Nord-Ouest du gisement de Chaâbet-El-Hamra) et des connaissances géologiques du gisement, plus 300 sondages de prospection sur une surface de 2km X 4km ont été réalisés. Ensuite on s'est attaché au fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère en prenant soin de faire des observations de régime :

- Prises de niveaux d'eau dans les sondages de prospections géologiques ;
- Forages de sondages hydrogéologiques et piézométriques ;
- Diagraphie ;
- Prélèvement d'échantillons de terrains pour analyse géo-mécanique ;
- Essais de développement ;
- Essais de pompage.

En complément à cette étude réalisée par l'EREM, des études hydrogéologiques sur les derniers sondages ont été également effectuées afin de déterminer le contexte hydrogéologique du gisement.

#### **III.1.5.2. RESULTATS PRELEMINAIRES**

L'étude de prospection géologique, celle des faciès rencontrés par les sondages de prospection et les travaux hydrogéologiques sus-cités permettent de dire que :

##### **III.1.5.2.1. DANS LA PARTIE CENTRALE DU GISEMENT**

On a une nappe contenue dans les formations hauteriviennes fissurées voire karstifiées.

##### **III.1.5.2.2. DANS LA PARTIE NORD OUEST DU GISEMENT**



Une deuxième nappe aquifère est reconnue dans les formations des grès dolomitiques d'âge Barrémien.

Remarque : cette partie n'est pas concernée actuellement par les travaux miniers « exploitation » et par conséquent l'étude hydrogéologique est différée à une date ultérieure.

### **III.1.5.2.3. DANS LA PARTIE EST DU GISEMENT**

Deux sondages hydrogéologiques ont été exécutés dans ce secteur, ces derniers ont donné des résultats négatifs et aucune venue d'eau n'a été observée. Les travaux miniers réalisés par l'ENOF ont confirmé qu'il n'y a pas de niveau aquifère dans la partie Est.

### **III.1.5. 3. DISCUSSIONS DES RESULTATS ET CONCLUSIONS**

Les résultats des travaux ci-dessus exécutés sur le gisement de Chaâbet-El-Hamra par l'EREM dont des tentatives d'essai de pompage, se sont soldés par des échecs et ont donné des conclusions qualitatives. Aucune interprétation quantitative n'a pu être avancée et les caractéristiques hydrodynamiques n'ont pas été déterminées.

En effet les aspirations attendues par l'exploitant minier sont principalement la détermination et l'estimation des venues d'eau qui peuvent parvenir au chantier minier dans le temps et dans l'espace, à savoir:

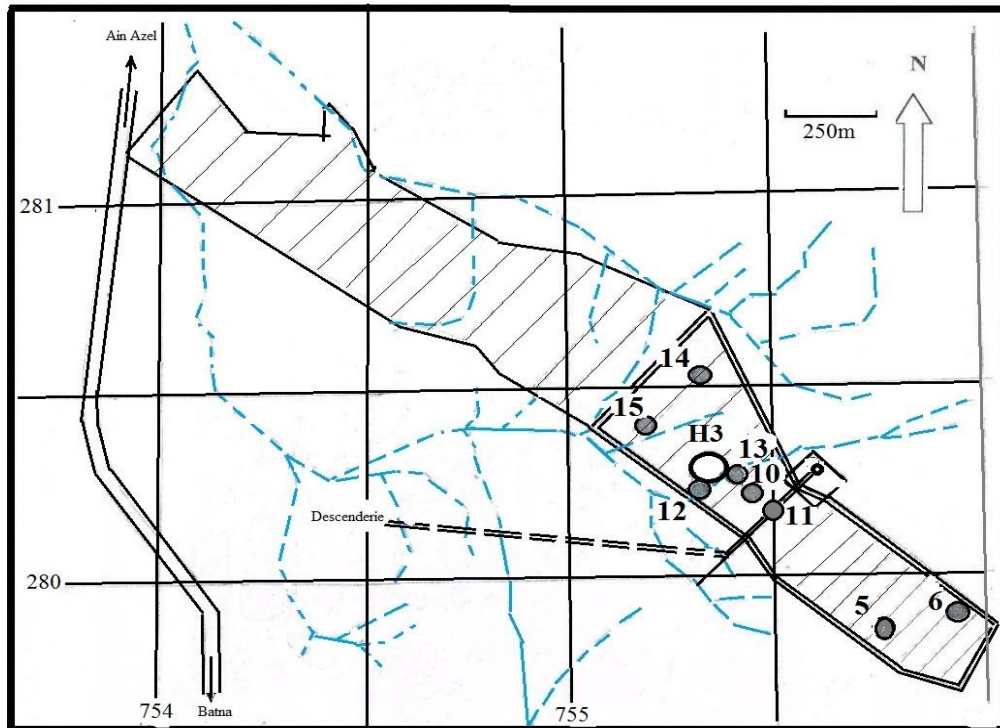
- Les variations des venues d'eau à différents états d'avancement des travaux miniers ;
- Calcul des éventuelles venues d'eau dans les ouvrages miniers jusqu'au Profi15,
- Détermination des systèmes d'exhaure

### **III.1.5.4. TRAVAUX COMPLEMENTAIRES REALISES PAR L'ENOF**

L'ENOF (Entreprise Nationale des Produits Non Ferreux et des Substances Utiles) a décidé de réaliser des travaux complémentaires pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe hauterivienne.

Ces travaux consistent à effectuer :

- Le nettoyage et le développement des sondages hydrogéologiques Pz10, Pz12, Pz13 et H3 (Fig.III.6);
- Le suivi de l'évolution des niveaux d'eau et des débits d'exhaure (Tableau.III.1)
- Réalisation d'essais de pompage.



**Fig.**

**III.6.** Carte de situation des Ouvrages Hydrogéologiques (D'après ENOF)

### **III.1.5.5. ETUDE DES CARACTERISTIQUES DE LA NAPPE HAUTERIVIENNE**

La nappe Hauterivienne est connue partiellement dans la partie centrale du gisement, localisée dans les formations carbonatées des dolomies fissurées hématitisées et parfois cavernueuses.

#### **III.1.5.5.1. LA PIEZOMETRIE**

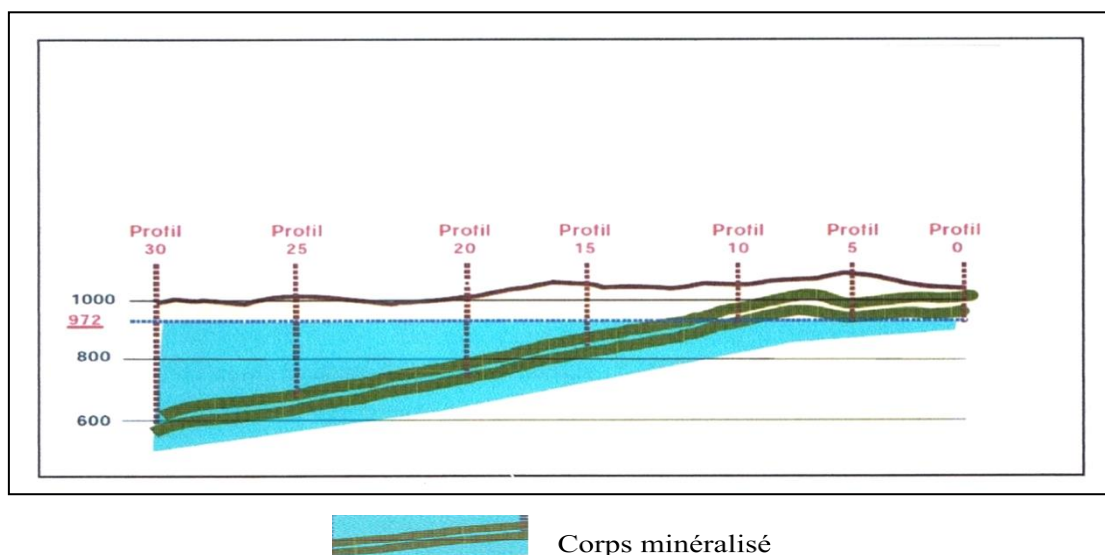
L'étude des circulations des eaux souterraines est basée sur l'analyse de la surface piézométrique des nappes aquifères en écoulement laminaire.

La réalisation de la carte piézométrique permet de déterminer la profondeur de la nappe, le sens d'écoulement des eaux souterraines, les axes de drainage et le gradient hydraulique.

Le secteur étudié est caractérisé par la faiblesse des ressources en eaux superficielles. Le niveau statique est relativement profond (80 à 90 m de profondeur) et

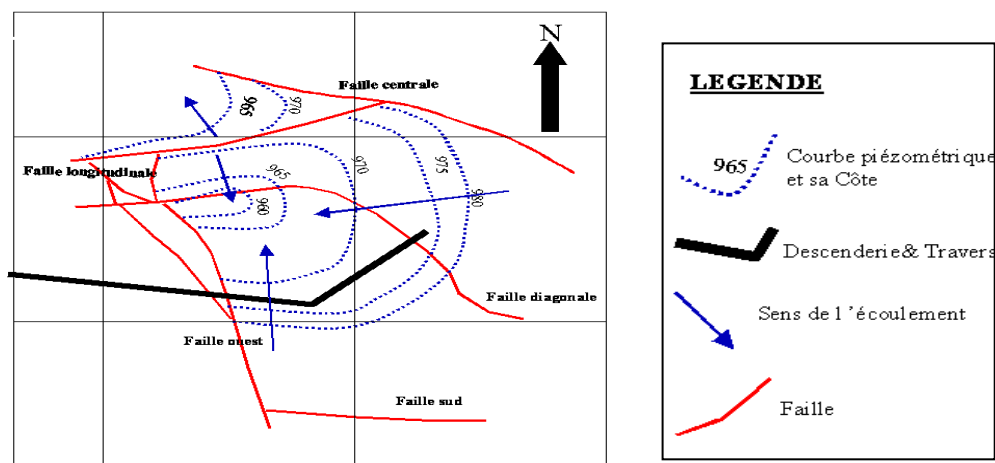
la présence de terrains dolomitiques en surface ne permet pas une exploitation par puits traditionnels.

Ces facteurs ont rendu le site inculte et inhabité. L'existence d'un nombre appréciable de données piézométriques et leurs bonnes répartitions géographiques ont permis d'établir une coupe hydrogéologique (Fig.III.6) et de procéder à l'interprétation des données ainsi qu' à l'élaboration d'une carte piézométrique (Fig.III.7).



**Fig.III.7.** Situation initiale du niveau hydrostatique d'après ENOF

Cette carte est d'une grande nécessité, et elle est établie selon les données recueillies dans les sondages réalisés par l'E.R.E.M.



**Fig.III.8.** carte piézométrique (D'après Contribution à l'étude des problèmes environnementaux et de sécurité sur l'exemple de la mine souterraine de Chaâbet-El-Hamra, 2008).

La charge des eaux est de direction Est-Ouest dans la partie centrale du gisement.

Cependant, dans le côté Nord au niveau de la *faille centrale*, le plan de faille constitue une ligne de partage des eaux. Le sens d'écoulement passe en directions Nord-Sud vers le centre du gisement et Nord-Ouest vers la dépression d'Ain-Azel. Donc, au niveau de cette faille, la partie centrale du gisement n'est pas influencée par une éventuelle venue d'eau, ce qui n'est pas le cas de la zone de la *faille Ouest* où on a un écoulement du Sud vers le Nord qui pourrait causer d'éventuelles venues d'eau.

### III.1.5.5.2. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

La détermination des caractéristiques hydrodynamiques d'un aquifère peut se faire par des essais de pompage, dont les résultats se présentent sous forme de graphiques.

L'étude de ces graphiques permet :

- D'analyser l'évolution du cône de dépression de la surface piézométrique ;
- De préciser les principales caractéristiques hydrodynamiques de la nappe exploitée;
- De déterminer les constantes et enfin d'analyser les ressources en eau souterraine exploitable.
- D'étudier le problème posé par les eaux souterraines dans l'exploitation minière (arrêt des travaux miniers à l'approche du profil 12).

La conduite des essais de débit et leur interprétation reposent sur le régime d'écoulement des eaux souterraines vers les ouvrages de captage.

C'est pourquoi, il est recommandé d'être prudent sur le choix des formules à appliquer et de leurs conditions limites.

### III.1.5.5.3. ESSAIS DE POMPAGE

Les anciennes données recueillies auprès de l'ENOF d'un essai de pompage de 96 heures avec un débit de pompage  $2\text{m}^3/\text{h}$  réalisé en 1993 (Tableau III.1)

L'essai proprement dit a été procédé par des essais de développement et de nettoyage à l'héxamétaphosphate des ouvrages hydrogéologiques situés dans la partie centrale du gisement (Pr. 0 - Pr. 15).

**Tableau III.1.** Evolution des niveaux d'eau dans les piézomètres (ENOF)

Date	H3	Pz10	Pz11	Pz12	Pz13
------	----	------	------	------	------

23.11.1992	91.6	-	971.36	980.03	971.32
29.11.1992	971.07	972.13	971.29	979.41	971.20
06.12.1992	970.66	972.04	971.29	975.99	971.24
13.12.1992	970.91	-	971.19	971.21	971.08
20.12.1992	970.72	-	971.00	979.04	970.88
27.12.1992	970.51	-	970.84	980.01	970.68
03.01.1993	970.35	970.92	970.69	980.21	970.68
10.01.1993	970.19	-	970.49	979.91	970.35
17.01.1993	969.95	970.72	970.30	980.58	970.11
20.01.1993	969.52	-	970.29	980.86	970.00
24.01.1993	969.58	970.54	970.04	981.44	969.74
09.02.1993	968.96	969.97	969.40	982.48	969.13
14.02.1993	968.76	969.77	969.04	983.14	968.93
21.02.1993	968.80	968.76	968.79	-	968.69
28.02.1993	968.25	-	968.54	968.96	968.43
02.03.1993	-	968.38	968.44	968.86	968.33
08.03.1993	968.35	968.25	968.29	968.76	968.24
09.03.1993	968.34	968.27	968.30	968.74	968.22
10.03.1993	968.28	968.21	968.26	968.68	968.18
13.03.1993	968.22	968.14	968.18	968.62	968.10
14.03.1993	968.18	968.12	968.16	968.60	968.07
15.03.1993	968.16	968.09	968.15	968.58	968.05
16.03.1993	968.13	968.07	968.11	968.55	968.02
17.03.1993	968.10	968.04	968.01	968.53	968.92
20.03.1993	968.07	968.00	968.04	968.48	967.95
21.03.1993	968.06	967.99	968.03	968.47	967.94
22.03.1993	968.04	967.97	968.01	968.45	967.92
23.03.1993	968.02	967.95	967.9	968.43	967.90
27.03.1993	967.97	967.90	967.94	968.37	967.84
28.03.1993	967.96	967.88	967.93	968.36	967.84
29.03.1993	967.95	968.88	967.91	968.36	967.82
31.03.1993	967.10	968.02	968.02	968.50	967.98
01.04.1993	-	968.02	968.02	968.50	968.98
03.4.1993	968.09	967.98	968.07	968.50	968.98
04.04.1993	968.05	968.98	968.03	968.50	967.95
05.04.1993	968.01	968.95	967.99	968.43	967.90
11.04.1993	967.91	967.84	967.86	968.33	967.80
20.04.1993	967.79	967.72	96.77	968.20	967.67
25.04.1993	967.40	967.54	967.56	968.02	967.49

#### III.1.5.5.4. TRAITEMENT DES DONNEES

En régime transitoire, on adopte l'expression hydrodynamique souterraine du

régime transitoire établie par C.V THEIS en 1935, et transformée par C.E JACOB en 1950 donnant l'expression d'approximation logarithmique suivante :

$$\Delta = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{x^2S}$$

$\Delta$ : Rabattement (m) ;

Q : Débit (m<sup>3</sup> /h) ;

T : Coefficient de transmissivité (m<sup>2</sup>/h)

t : Temps de pompage (h) ;

x : Distance entre le piézomètre et le forage H3 (m) ;

S : Coefficient d'emménagement sans dimension.

Les différentes courbes représentatives de l'essai de pompage ont été tracées sur un papier semi-log montrent :

- Dans un premier temps, l'effet de capacité joue un rôle important d'où un retard dans les rabattements qui est dû aux paramètres de l'ouvrage de captage.
- La réponse directe de l'aquifère correspond à un deuxième tronçon matérialisé par une droite.

Les graphiques réalisés pour les différents piézomètres (Fig.III.9-10-11) ont permis de calculer T et S,

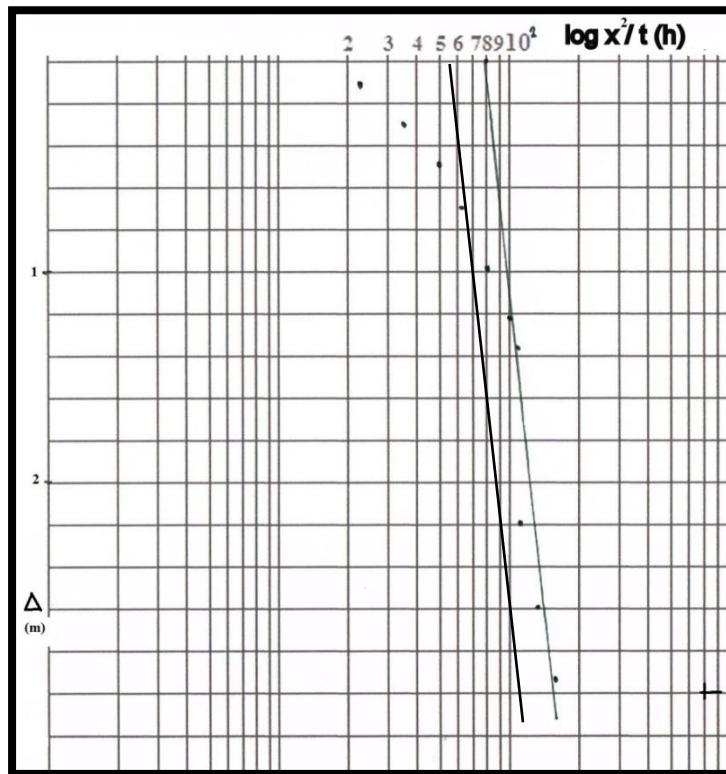
**a). Calcul de la Transmissivité T :**

$$T = \frac{0.183Q}{a}$$

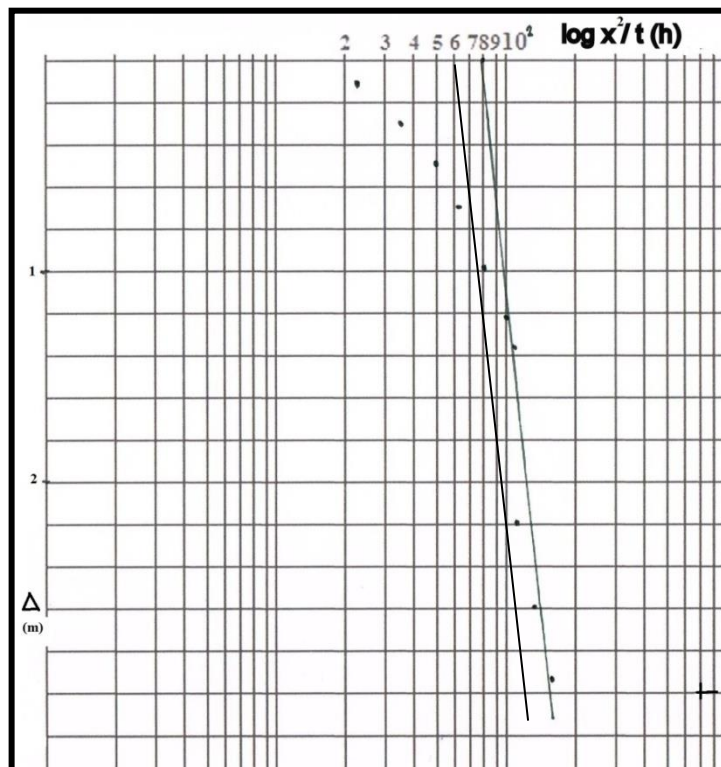
a : est déterminé graphiquement

**b). Calcul du coefficient d'Emmagasinement S :**

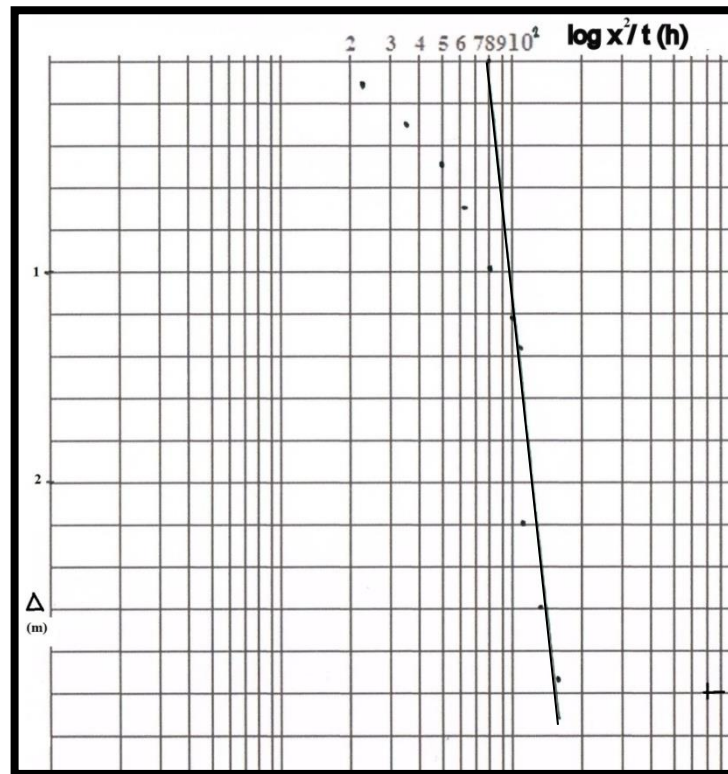
$$S = 2,25 Tt_0 = 0.2\%$$



**Fig.III.9** : Courbe du rabattement (Pz13)  $s=\log t/x^2$



**Fig.III.10.** Courbe du rabattement (Pz10)  $s=\log t/x^2$



**Fig.III.11.** Courbe du rabattement (Pz11)

**c). Les résultats :**

Les calculs ont abouti aux résultats suivants (Tableau.III.2)

**Tableau III.2.** Résultats de calcul

$\Delta \log t/x^2$	
Ouvrage	Transmissivité ( $m^2/s$ )
Pz 10	$4.91 \cdot 10^{-4}$
Pz 11	$4.19 \cdot 10^{-4}$
Pz 13	$3.82 \cdot 10^{-4}$
<b>Moyenne</b>	<b><math>4.30 \cdot 10^{-4}</math></b>
<b>Coefficient d'Emmagasinement</b>	<b>S moy = 0.2%</b>

**III.1.5.6. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS**

D'après les résultats on conclut :

- L'aquifère est peu transmissif et peu capacitif
- Les études hydrologiques effectuées sur la région d'Ain-Azel ont abouti aux résultats suivants :



- Une infiltration faible de l'ordre de 6 % ,
- Une forte évapotranspiration de l'ordre de 90 %.

#### **d'où vient l'eau ?**

L'alimentation se fait par un transfert hydraulique souterrain à travers le réseau de failles des massifs avoisinants et de la nappe barrémienne.

D'après la coupe hydrogéologique, l'exploitation de la mine se fait avec perforation en attaque-descente, c'est-à-dire sans écoulement naturel vers l'extérieur.

En effet, après dix années d'exploitation du gisement (1996-2006), la mine a dû fermer car le système d'exhaure n'est plus adapté. En effet, pour l'assèchement de la zone inférieure du profil 12. L'ENOF et ORGM ont proposé un système de pompage pour le rabattement artificiel qui se fera au moyen de forages d'exhaure (Fig.III.12).

### **III.2. PROPOSITION D'ASSECHEMENT DU GISEMENT CHAABET EL HAMRA ET REPRISE DE L'ACTIVITE MINIERE**

#### **III.2.1. INTRODUCTION**

En application des décisions qui ont été arrêtées lors de la réunion du 13/05/2012, présidée par le secrétaire général du MRE (ministère des ressources en eau), et de la réunion tenue au siège de l'ENOF le 23/05/2012, une commission technique composée de la DREWS (Direction des ressources en eau de la wilaya de Sétif), de l'ANRH (agence nationale des ressources hydrauliques), de l'ADE (algérienne des eaux) et de l'ENOF (entreprise nationale des produits miniers non ferreux) présidée par moi-même, a été désignée pour définir le programme et les actions à engager pour la mise à niveau du système de dénoyage du gisement de Chaâbet-El-Hamra qui permettra :

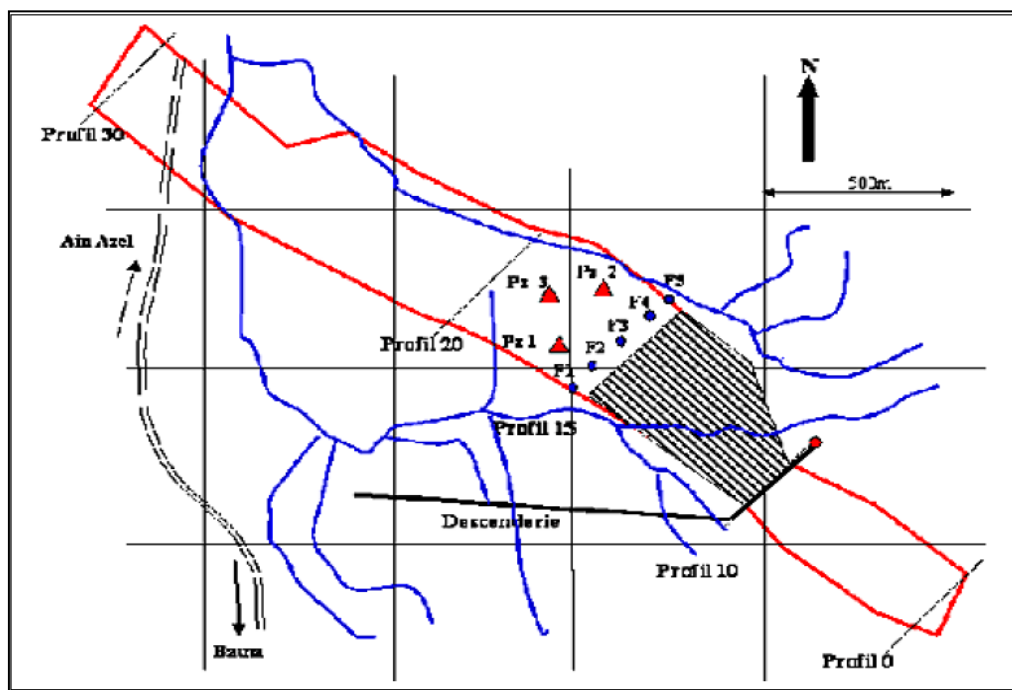
- L'approvisionnement en eau potable de la ville d'Aïn-Azel et des communes avoisinantes.
- Le rabattement effectif de la nappe pour la reprise de l'activité de la mine de zinc de Chaâbet-El-Hamra.

#### **III.2.2. RESULTATS DES ETUDES HYDROGEOLOGIQUES**

##### **ANTERIEURES :**

Les études hydrogéologiques antérieures réalisées par ENOF-ORGM préconisaient un système de pompage composé de (Fig.III.12.) :

- Cinq (05) forages implantés entre le profil 15 et le profil 16, d'une profondeur de 250m chacun avec un débit prévisionnel de 68 m<sup>3</sup>/h par forage (soit 250 m<sup>3</sup>/h pour les cinq forages) pour stabiliser le niveau dynamique de la nappe et un débit de pompage de 79 m<sup>3</sup>/h (soit 395 m<sup>3</sup>/h pour les cinq forages) pour assurer le dénoyage de la mine :
- Trois (03) piézomètres pour le suivi de l'évolution du niveau d'eau.



**Fig.III.12.** situation des ouvrages hydrogéologiques. (D'après l'ENOF)

— Cours d'eau    — Champ de captage    ▲ Piézomètre    ● Forage

Les réserves de la partie supérieure (Profil 0 - Profil 10) ont été exploitées sans difficultés majeures liées à l'eau, mais depuis l'atteinte du niveau hydrostatique par les travaux miniers, un système de pompage a été mis en place pour faciliter les travaux d'exploitation.

Un rabattement de 20 m par rapport au niveau hydrostatique a été maintenu pour sécuriser le champ de travail (circulation du personnel et des engins à sec).

Ce système de pompage a été toujours modifié en fonction de l'avancement des travaux et de l'évolution du débit au front de taille. Les débits ont toujours augmenté avec l'avancement des travaux pour atteindre en 1997 les 100 m<sup>3</sup>/h.

Une approche technique a été élaborée pour prolonger et maintenir l'activité de la mine pendant au moins de 10 ans. Il s'agit en l'occurrence de rabattre le niveau de la nappe

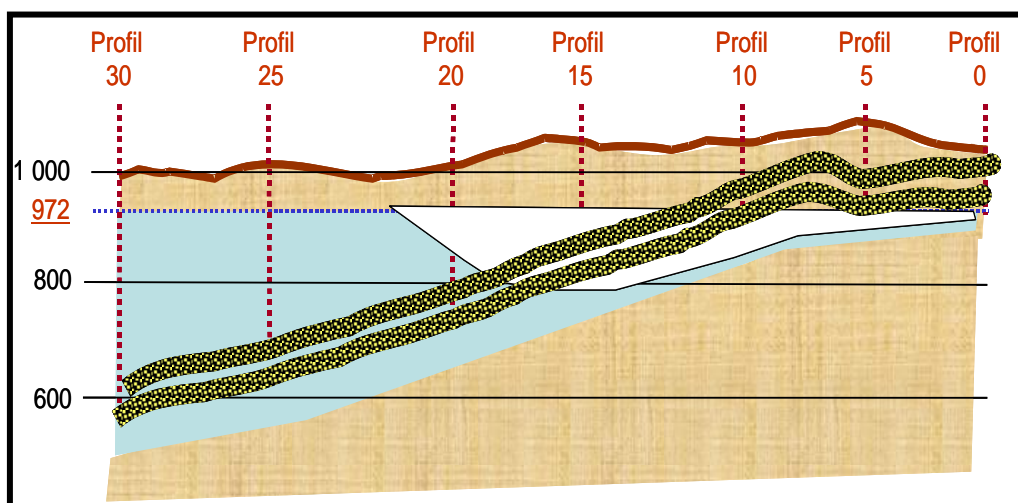
à partir de la surface. La méthode proposée est le rabattement artificiel aux moyens de forage d'exhaure traversant toute la couche aquifère.

La poursuite des travaux sous le niveau hydrodynamique est conditionnée par la réalisation d'un système de pompage rationnel qui permettra le rabattement du niveau d'eau sous le mur de la minéralisation.

On a constaté que le niveau de l'eau varie en fonction du débit d'exhaure :

- |   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| Si $Q < 68 \text{ m}^3/\text{h}$ (par forage) | : Remontée                          |
| Si $Q = 68 \text{ m}^3/\text{h}$ (par forage) | : Stabilisation du niveau dynamique |
| Si $Q > 68 \text{ m}^3/\text{h}$ (par forage) | : Rabattement                       |

Après réalisation et exploitation du système suscité (2008 – 2010), les forages seront équipés de pompes immergées. Le pompage provoque aux environs de la mine un rabattement des niveaux d'eau « cône de dépression », ce qui facilitera l'exploitation du minerai (Fig.III.13).



**Fig.III.13.** Cône de dépression au profil 15

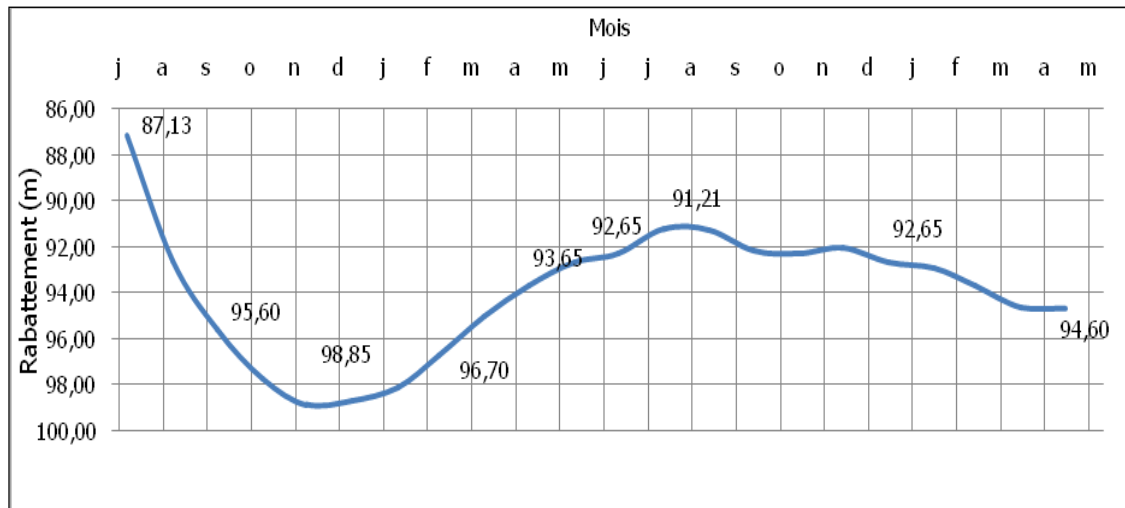
En effet l'ébauche du dénoyage de la mine est constatée malgré un pompage perturbé avec un débit moyen variant entre 56 l/s à 80 l/s. mais malheureusement, ce système d'exhaure était en dessous du seuil exigé :

- Les débits d'exhaure étaient inférieurs aux prévisions,
- Le nombre prévu de forage fonctionnant simultanément n'a pas été atteint,
- Les durées quotidiennes de fonctionnement des pompes n'ont pas été respectées,

- Le débit horaire total prévu à extraire à partir de la mine n'a jamais été atteint.

Plus de deux années de pompage ont permis le constat de la fluctuation du niveau d'eau, dans la mine et ses environs, En effet la gestion de ce système de pompage était assuré par les agents de l'ADE qui ont montré une certaine négligence dans le suivi.

La tendance vers la remontée est perçue dès que les débits pompés diminuent (Fig. III.14)



**Fig.III.14. Evolution du niveau d'eau dans le Piézomètre Pz3**

Après les constatations observées sur ce système de pompage actif utilisé qui a fait ses preuves, la commission a décidé de le valider tout en apportant certaines améliorations.

En effet, le système actif présente plusieurs avantages, dont les plus importants sont :

- Assurer un dénoyage des travaux souterrains avant l'exploitation, pour sécuriser les travailleurs et le matériel,
- Pour éviter la pollution de l'eau par l'exploitation minière,
- Le système passif utilisé à Kherzet Youssef a motivé ce nouveau choix.

### III.2.2.1. RAPPEL DES RESULTATS DES ESSAIS

Un nouvel essai de pompage de 30 jours, du 01-11-2010 au 1-12-2010, a été effectué avec:

- Cinq (05) forages, F01, F02, F03, F04 et F05,
- Deux (02) piézomètres Pz1, Pz3

Le pompage avait bien fonctionné durant le mois d'essai, le débit de pompage réalisé est de 90 l/s (avec les 5 forages) avec un temps perdu négligeable d'une part et il a permis d'obtenir un rabattement de 2,50m durant ce mois.

Cependant on a constaté que durant la période de décembre 2010 à avril 2012, le débit moyen extrait est de l'ordre de 78 l/s (soit 280 m<sup>3</sup>/h) et le rabattement réalisé de 10,85 m. En effet ces résultats ne sont pas probants.

A la lumière de ces résultats la commission a exigé trois conditions nécessaires pour déterminer les délais de dénoyage de la mine de Chaâbet-El-Hamra.

Ces délais seront respectés aux conditions suivantes :

- Un pompage simultané dans les cinq forages principaux,
- Un pompage en continu H24,
- Un débit de 90 l/s.

### **III.2.2.2. REVISION DES DELAIS DU RABATTEMENT**

A cet effet, une autre analyse et interprétation ont été effectuées par la commission technique de suivi de pompage qui a conclu, sur la base des observations enregistrées durant l'année, que le dénoyage de la mine est possible avec les conditions pratiques de fonctionnement, néanmoins un délai corrigé à 24 mois au lieu de 27 mois prévus initialement.

La commission a décidé de faire le diagnostic des forages pour essayer de remédier au dysfonctionnement du système de pompage (Tableau.III.3)

### **III.2.3. PROPOSITION DE MISE A NIVEAU DU SYSTEME DE POMPAGE**

Pour assurer une exploitation de la mine sans risque, la commission a décidé d'une mise à niveau de ce système de pompage qui permettra l'aboutissement aux objectifs fixés initialement.

Après un large débat, les opérations suivantes ont été retenues :

**Tableau III.3.** L'état actuel des forages

Forage	État	Cause	Remède
Forage 1	Opérationnel		
Forage 2	Opérationnel		

Forage 3	Opérationnel	La pompe ne peut pas être installée au delà de 170 m car au-delà de cette côte le <b>forage est rétréci.</b>	A remplacer par un forage nommé F8.
Forage 4	Opérationnel		
Forage 5	Opérationnel	<b>Coincement de la pompe avec sa colonne</b> à 148m. Il ne pourra pas être exploité au delà de cette profondeur.	A remplacer par un forage nommé F9.
Pz3	Opérationnel		
Pz1	Opérationnel		

### III.2.3.1. IMPLANTATION DES FORAGES ET DES PIEZOMETRES

La commission a décidé de réaliser de nouveaux forages et de nouveaux piézomètres dans le carré minier afin de pouvoir faire un suivi minutieux à différents endroits :

#### III.2.3.1.1. AMONT DE L'AXE DU POMPAGE

Réalisation de deux (02) piézomètres, nommés Pz 02 et Pz 03, en amont du champ de captage, qui serviront pour le contrôle de la nappe. La réalisation de ces piézomètres est subordonnée à une autorisation de l'ANRH.

La commission m'a chargé d'effectuer des simulations de rabattement avec la réalisation de deux forages supplémentaires au profil 13 pour voir si cela est justifié.

#### *Une première simulation du rabattement au profil 13*

La réalisation au profil 13, de deux forages de pompage F12 et F13 génère un rabattement prévisionnel illustré dans le tableau (III.4)

Le pompage au profil 16 avec les 5 forages, donnera un rabattement prévisionnel au profil 13 (voir tableau ci-dessous)

Si on pompe simultanément à partir des 7 forages, le rabattement est calculé en appliquant le champ d'interférence réciproque d'après le modèle de H. ASTIE et. CHAMAYOU 1973.

**Tableau. III.4. RABATTEMENT PREVISIONNEL AU PROFIL 13**

Rabattement au profil 13 (m)	Avec 2 forages <b>F12-F13</b>	Avec 5 forages F1-F2-F8-F4-F9	Avec les 7 forages F1-F2-F8-F4-F9 F12-F13
1 mois	29,21	1,05	25,72
2 mois	34,78	14,98	42,30
<b>3 mois</b>	<b>38,04</b>	23,12	51,99
4 mois	40,35	28,9	58,86
5 mois	42,14	33,38	64,19
6 mois	43,61	37,04	68,55

**Conclusion** : La réalisation des deux forages F12 et F13 au profil 13 est justifiée car on aura un gain de 6 mois. La minéralisation sera dénoyée 30 mètres au dessous du mur en trois mois au lieu de 9 mois prévus initialement.

### III.2.3.1.2. AXE DU POMPAGE

- Réalisation de deux (02) forages de remplacement, nommés F08 et F9 respectivement à la place du F03 et du F05 (ces deux forages étaient défectueux),

- J'ai élaboré une seconde simulation, qui consiste à l'opportunité en la réalisation ou non d'un (01) forage complémentaire nommé F10, situé dans le nouvel alignement du champ de captage, qui remplacera le forage F04. Ce dernier sera relégué au rôle de forage de secours.

Les résultats donnent une amélioration très faible estimée de 10% de gain en rabattement en 24 mois.

#### Simulation du rabattement avec remplacement du F4 par F10

Les premières études effectuées par l'ORGM et l'ENOF, avec essais de pompage "longue-durée" en régime transitoire sur la région de Chaâbet avec des piézomètres ont permis de calculer les caractéristiques hydrodynamiques **T** et **S** sur la base des équations de C.E. JACOB. Cette méthode donne une bonne approximation des caractéristiques de l'aquifère. L'utilisation de cette méthode par l'ENOF a donné des résultats acceptables pour ce type d'aquifères c'est pourquoi ces valeurs seront utilisées comme base de données de notre simulation :

$$\mathbf{T} = 4.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \quad \mathbf{S} = 2.10^{-2}$$

T = transmissivité

S= coefficient d'emménagement

Q = 90 l/s

### **Scénario 1**

Dans le cas où on garde le système de pompage actuel : F1, F2, F3, F4, F5

Avec un pompage de 90l/s, on aura un rabattement de 57m/24mois (voir tableau III.5).

Cependant on aura les forages F3 et F5 qui seront dénoyés avant terme.

### **Scénario 2**

Cependant les pompes des deux forages F3 et F5 seront dénoyées respectivement en 7mois et 17 mois ; c'est pourquoi on a décidé de les remplacer pour assurer le dénoyage de la mine. Pour améliorer le système de pompage, l'axe du pompage, sera implanté dans un axe optimum situé le plus proche du carreau minier selon le schéma (voir fig.III.11). Avec ce nouvel axe de pompage (en zigzag, flèche rouge) on aura un rabattement de 75m/24mois

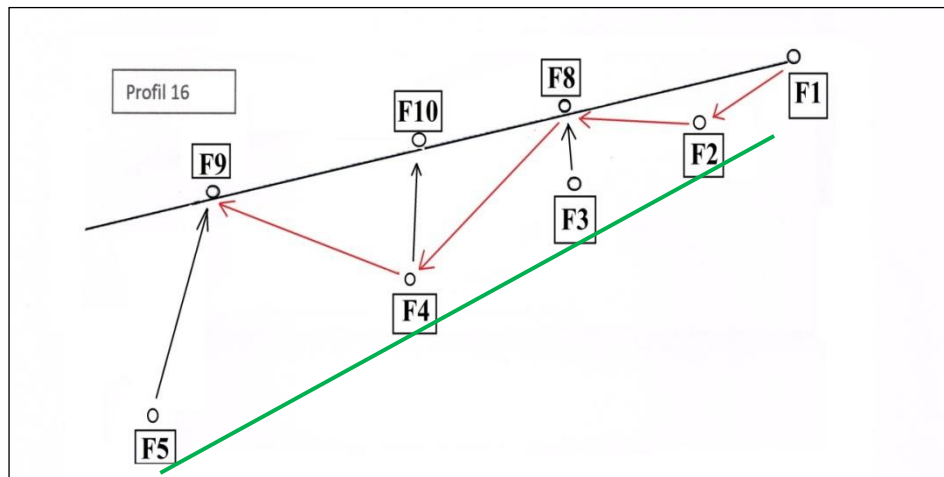
### **Scénario 3**

Dans le cas où le F4 est relégué comme forage de secours et on propose la réalisation d'un forage supplémentaire F10 dans l'axe du pompage, on aura un rabattement de 81m/24mois.

Le F10 présente une amélioration très faible en 24 mois soit un gain estimé à 10% par mois. C'est pourquoi on estime qu'il n'est pas justifié de le réaliser.

L'axe du nouveau système de pompage sera implanté le long du profil 16 dans le même alignement du F01 et du F02. Cet axe paraît plus adéquat que l'axe précédent, car les forages F03 et F05 sont remplacés par les forages F08 et F09 plus proches de la minéralisation.





**Fig.III.15.** Schéma illustrant l'implantation des forages du système de pompage

**Tableau III.5.** Récapitulatif des simulations

Désignation	Axe Actuel (Vert)	Axe en zigzag Avec F4 (Rouge)	Axe rectiligne Avec F10 (Noir)
	<b>Scénario 1</b>	<b>Scénario 2</b>	<b>Scénario 3</b>
Rabatement en m/24mois	57	75	81
Forages concernés	F1, F2, F3, F4, F5	F1, F2, F8, F4, F9	F1, F2, F8, F9, F10
Rabatement moyen mensuel	2.40	3.12	3.37
Constat	F3 et F5 seront dénoyés avant terme	<b>Le remplacement de F3 et F5 est justifié par F8 et F9</b>	F10 n'améliore en rien les délais

Les forages seront équipés de pompes immergées. Le pompage provoque aux environs de la mine un rabattement des niveaux d'eau « cône de dépression », ce qui facilite l'exploitation du minerai.

**Une troisième simulation du rabattement de la nappe au profil 15**

La marge de sécurité sous la minéralisation avec ce nouveau système de pompage donne les résultats suivants (Tableau. III.6):

Une troisième simulation du rabattement de la nappe aux différents profils sous la minéralisation, donne à titre indicatif un tableau prévisionnel des délais de rabattement sous la minéralisation à différents niveaux avec un débit de 90 l/s.

**Tableau III.6.** Délais de rabattement sous la minéralisation au Profil15

Désignation	Temps (mois)
Dénoyage minéralisation de 0m sous la minéralisation	14
Rabattement de 10m sous la minéralisation	18
Rabattement de 20m sous la minéralisation	20
Rabattement de 30m sous la minéralisation	22

**Conclusion :** Dans le cas où toutes les conditions de pompages (90 l/s dans le nouveau système de pompage composé de cinq (05) forages : F01, F02, F08, F09 et F04, en continue sont réunies, le rabattement de la nappe dans le carreau minier sera assuré dans les meilleurs délais (aux bout de 24 mois) et les réserves en eau AEP seront satisfaites.

## *Chapitre Quatrième*

# **ETUDE HYDROCHIMIQUE DES EAUX DE LA MINE DE CHAABET EL HAMRA**

## **INTRODUCTION :**

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

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

L'interprétation des données des analyses physico-chimiques des différents échantillons nous permet de :

- Déterminer la répartition quantitative des éléments majeurs ;
- Déterminer les principaux faciès chimiques des eaux et leur relation avec l'environnement géologique;
- Avoir une idée générale sur la qualité chimique des eaux;
- Et enfin déterminer l'origine des différents paramètres et leur influence sur l'évolution chimique des eaux.

## **IV.1. ETUDE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES**

### **IV.1.1. ETUDE DES PARAMETRES PHYSIQUES**

L'origine de l'eau ainsi que sa solubilité sont gérées par certains paramètres qui sont: La température ( $T^{\circ}\text{C}$ ), le potentiel hydrogène (pH), la conductivité ( $\sigma$ ) et le résidu sec (Rs).

#### **IV.1.1.1TEMPERATURE ( $T^{\circ}\text{C}$ )**

La température joue un rôle important dans la solubilité et la dissolution des sels dissouts, dans la solubilité des gaz, sur la conductibilité électrique et dans la détermination du pH.

La température permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). Ce paramètre est très important à connaître, car il permet de différencier les eaux qui circulent près de la surface de celles qui circulent en profondeur, et donc la qualité de l'eau. En

effet, la variation thermique des eaux souterraines est en fonction de la profondeur de l'aquifère, donc du gradient géothermique.

Les températures des eaux de Chaâbet-El-Hamra varient entre **19** et **25°C**.

De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau.

En rapport avec les normes de potabilités de l'eau fixées par l'OMS (1994), l'eau est :

- Excellente lorsque la température varie entre 20 et 22°C ;
- Passable lorsque la température oscille dans l'intervalle de 22 à 25°C
- Médiocre lorsqu'elle est comprise entre 25 et 30°C

Lorsque la température est supérieure à 30°C, on parle d'une pollution excessive.

De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau.

#### **IV.1.1.2. POTENTIEL D'HYDROGENE (pH)**

Le sigle "**pH**" désigne le Potentiel d'Hydrogène dans l'eau dont dépend l'acidité de l'eau : Une eau acide possède un **pH** bas, une eau trop basique possède un **pH** élevé et on considère une eau neutre celle dont le **pH** est à 7,0.

Donc ; la concentration en ion H<sup>+</sup>d'une solution, c'est-à-dire l'alcalinité ou l'acidité d'une eau.

Par définition le pH est le logarithme décimal de l'inverse de la concentration.

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

L'échelle du pH varie de 1 à 14 en fonction de la force ionique, si :

- $[H^+] < [OH^-] \Rightarrow pH > 7$  : l'eau est **basique** ;
- $[H^+] > [OH^-] \Rightarrow pH < 7$  : l'eau est **acide**;
- $[H^+] = [OH^-] \Rightarrow pH = 7$  : l'eau est **neutre**.

Pour les eaux de Chaâbet-El-Hamra, les différents pH mesurés varient entre **7,04** et **7,27** ce qui permet de dire que l'eau est basique, voir tableau IV.1.

En général, la modification du pH dans l'eau est liée à la perte du gaz carbonique. Il convient aussi de signaler que la valeur du pH est fonction de la matière organique thermostable dissoute ou non dans l'eau. A partir du PH, on peut classer les eaux de la manière suivante :

- pH inférieur à 5 : acidité forte
- pH égal à 7 : neutralité (eau pure)
- pH de 7 à 8 : neutralité rapprochée (eau de surface)
- pH de 5.5 à 8 : majorité des eaux souterraines
- pH supérieur à 8 : alcalinité, évaporation intense

**Tableau IV.1.** Caractère de l'eau selon les valeurs des pH mesurés.

Forages	PH	Caractère de l'eau
F1	7.35	alcaline
F2	7.35	alcaline
F3	7.30	alcaline
F4	7.22	alcaline
F5	7.23	alcaline

Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique. La valeur du pH altère la croissance et la reproduction des micro-organismes existants dans une eau, la plupart des bactéries peuvent croître dans une gamme de pH comprise entre 5 et 9, l'optimum est situé entre 6,5 et 8,5, des valeurs de pH inférieures à 5 ou supérieures à 8,5 affectent la croissance et la survie des micro-organismes aquatiques selon l'organisation Mondiale de la Santé (OMS).

#### **IV.1.1.3. CONDUCTIVITE ( $\sigma$ )**

Elle mesure la capacité de l'eau à conduire le courant électrique (C'est la conductance électrique d'une eau). Elle dépend de la concentration totale et la nature des ions présents dans l'eau. Sa variation permet de suivre l'évolution d'une pollution chimique. La conductivité permet d'apprécier la teneur d'une eau en sels dissouts, elle est d'autant plus élevée que la minéralisation est importante (la plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement). La conductivité varie proportionnellement avec les fluctuations de la température. Ce paramètre renseigne aussi sur les zones de mélange ou d'infiltration.

Elle s'exprime en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (microsiemens par centimètre). La classification des eaux en fonction de la conductivité se présente de la manière suivante :

- Conductivité égale à 0.05 : eau déminéralisée
- Conductivité de 10 à 80 : eau de pluie

- Conductivité de 80 à 100 : eau peu minéralisée
- Conductivité de 300 à 500 : eau moyennement minéralisée
- Conductivité de 600 à 800 : eau minéralisée (**eau potable**).
- Conductivité de 1000 à 3000 : eau saline
- Conductivité supérieure à 3000 : eau de mer.

La minéralisation des eaux de Chaâbet-El-Hamra sont reportées sur le Tableau. IV.2.

**Tableau IV.2.** Les valeurs de la conductivité des différents forages dans la zone d'étude. (Période avril 2012)

Date d'échantillonnage	Forage	Conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$
Avril 2012	F1	740.00
	F2	690.00
	F3	730.00
	F4	750.00
	F5	770.00

Ces valeurs sont celles **d'une eau potable**.

#### IV.1.1.4. LE RESIDU SEC (Rs)

La minéralisation d'une eau représente la totalité des substances et les matières en suspension quelles soient organiques ou minérales qu'elle contient. Elle est exprimée en mg/l.

L'eau de pluie est légèrement acide du fait de sa teneur en  $\text{CO}_2$  dissous. Au cours de son infiltration dans le sol et le sous-sol, elle se charge en ions et acquiert des propriétés physiques et chimiques qui caractérisent l'eau de la nappe qu'elle forme. Les eaux souterraines sont plus ou moins minéralisées en fonction:

- de la nature des roches traversées et des minéraux rencontrés au cours de l'infiltration;
- du temps de contact de l'eau avec les minéraux, donc de la vitesse de percolation de l'eau dans le sous-sol;
- du temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration.

On voit l'importance des minéraux solubles des roches et de la perméabilité de l'aquifère dans la minéralisation de l'eau.

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 hydrochimique.

Les résultats d'analyse sont portés sur le tableau IV.3.

**Tableau IV. 3.** Les valeurs des résidus secs des différents forages dans la zone d'étude.  
(Période avril 2012)

Date d'échantillonnage	Forage	Résidus secs à 105°C en mg/l
Avril 2012	F1	460
	F2	440
	F3	454
	F4	474
	F5	522

De 51 et 500 mg / litre : l'eau est faiblement minéralisée (Chaâbet-El-Hamra).

De 501 et 1500 mg / litre : l'eau est moyennement minéralisée

>1501 mg / litre : l'eau est fortement minéralisée.

#### **IV.1.2. ETUDE DES PARAMETRES CHIMIQUES**

Lors de son transit, l'eau acquiert une composition chimique liée à la nature lithologique du terrain traversé. Les valeurs des caractéristiques physico-chimiques des eaux provenant du système de pompage sont indiquées sur le tableau IV.4.

##### **IV.1.2.1. CATIONS**

###### **a) Le Calcium (Ca<sup>++</sup>)**

C'est un élément de la dureté totale. Son origine naturelle provient essentiellement de l'attaque des formations carbonatées par le gaz carbonique.



Dans la zone d'étude, le Calcium provient des massifs entourant la plaine.

Il provient aussi de la dissolution du Gypse (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O).

###### **b). Le Magnésium Mg<sup>++</sup>**

C'est aussi un élément de la dureté totale. Il provient de la dissolution des formations dolomitiques en présence du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et de la dissolution des roches magnésiennes et aussi de la dissolution des formations gypsifères et argileuses. Sa dissolution est beaucoup plus longue que celle du calcium.

Dans notre aire d'étude, les résultats d'analyse sont portés sur le tableau IV.4.

###### **c). Le Sodium et le Potassium (Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>)**

Le Sodium est beaucoup plus abondant que le Potassium. Il est toujours présent dans les eaux naturelles avec des teneurs variables.



Ces ions sont généralement peu abondants dans les terrains carbonatés.

Tableau IV.4 Tableau Récapitulatif des caractéristiques physico-chimiques des eaux des Forages du gisement Chaâbet-El-Hamra (Période avril 2012).

VARIABLES	F1	F2	F3	F4	F5	Moy
PH	7.35	7.35	7.30	7.22	7.23	
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> mg/l	30.00	18.00	20.00	20.00	21.00	
méq/l	1.30	0.78	0.86	0.86	0.91	
%éq	10.24	10.70	10.58	10.40	10.64	<b>10.51</b>
Ca <sup>++</sup> mg/l	63.65	66.80	74.75	77.20	78.00	
méq/l	3.19	3.34	3.74	3.86	3.90	
%éq	42.30	45.80	46.00	46.67	45.56	<b>42.26</b>
Mg <sup>++</sup> mg/l	36.30	38.00	42.35	42.60	44.80	
méq/l	3.05	3.17	3.53	3.55	3.75	
%éq	40.45	43.48	43.42	42.93	43.80	<b>42.81</b>
∑ Cations mg/l	130.00	123.00	137.10	134.80	143.8	
méq/l	7.54	7.29	8.13	8.27	8.56	
%éq	92.99	99.98	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>95.58</b>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	311.10	299.00	311.10	323.3	293.00	
méq/l	5.10	4.90	5.10	5.30	4.80	
%éq	66.23	68.72	64.23	64.20	58.75	<b>64.43</b>
Cl <sup>-</sup> mg/l	40.00	35.00	40.00	40.00	50.00	
méq/l	1.13	0.98	1.13	1.13	1.41	
%éq	14.67	13.75	14.23	13.70	17.25	<b>14.72</b>
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> mg/l	70.00	60.00	82.00	88.00	94.00	
méq/l	1.46	1.25	1.71	1.82	1.96	
%éq	18.96	17.51	21.54	22.10	24.00	<b>20.82</b>
∑ Anions mg/l	421.10	394.00	393.14	451.3	437.00	
méq/l	7.70	7.13	7.94	8.25	8.17	
%éq	99.86	99.98	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>99.97</b>
Minéralisation mg/l	551.10	517.00	530.24	5888.8	580.8	<b>553.60</b>
méq/l	15.24	14.42	16.07	16.52	16.73	<b>15.80</b>

Leur présence n'est pas généralement associée à  $\text{Cl}^-$ , mais comme constituants des minéraux silicatés (argiles et marnes, qui sont souvent intercalés dans les calcaires), exceptées dans certaines conditions particulières de gisement (Diapir triasique).

A l'état solide, ces ions sont souvent associés et constituent les évaporites

(NaCl, KCl) possédant un réseau cristallin que l'eau peut facilement détruire. Ces ions existent en faible quantité dans les eaux des pluies qui lessivent les poussières atmosphériques.

L'ion potassium est moins abondant. Cependant l'ion calcium est plus présent dans ces eaux, et il doit provenir du Trias salifère qui affleure à plusieurs endroits dans la zone d'études. Il constitue la semelle plastique du front Sud-Sétifien. Ils proviennent également du lessivage des formations riches en NaCl (argile et marne) qui sont intercalées dans les calcaires.

#### IV.1.2.2. LES ANIONS

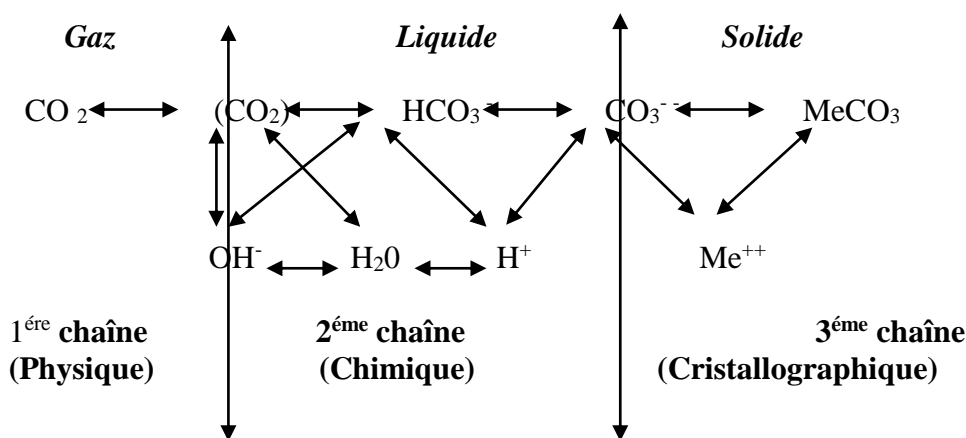
##### a). Les Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )

Les bicarbonates de calcium et de magnésium sont des sels peu solubles cependant. Ils occupent une part importante dans la minéralisation des eaux souterraines.

Leur mise en solution fait intervenir trois phases :

- une phase solide bicarbonée (roche)
- une phase liquide (eau)
- une phase gazeuse ( $\text{CO}_2$ ) qui accroît considérablement les possibilités de mise en solution.

La dissolution ou la précipitation d'un carbonate fait intervenir une longue chaîne de réactions chimiques entre les différentes phases :



Des expériences théoriques réalisées sur des roches carbonatées (F.FORTI.1974 & H.ROCHES.1976-in BAKALOWICS-1979), montrent que la vitesse de mise en équilibre entre la phase liquide et la phase solide est très lente devant celle de la dissolution du CO<sub>2</sub>. Le temps de réalisation des 90% de l'équilibre est de l'ordre de quelques jours (5 à 10 jours).

Ce système CO<sub>2</sub> –H<sub>2</sub>O –HCO<sub>3</sub> permet de mettre en évidence des eaux à vitesse de transit rapide, se déplaçant en quelques heures ou en quelques jours dans l'aquifère.

Leur origine principale est la dissolution des roches carbonatées, ainsi leur concentration dans l'eau est fonction de :

- La nature des terrains traversés ;
- La température de l'eau ;
- La pression du CO<sub>2</sub> dissout.

#### b). Les Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>)

La concentration des eaux naturelles en Sulfates est très variable. Ils résultent de :

- La solubilité des gypses (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O) ;
- L'utilisation des engrais chimiques;
- Des eaux de pluie où le Soufre présent dans l'atmosphère subit une oxydation ;
- Du lessivage des terrains argileux et marneux.

Par contre, la faible concentration en sulfate suggère un long séjour de ces eaux dans des formations carbonatées minéralisées (en PbS et ZnS) et argileuses qui doivent être à l'origine.

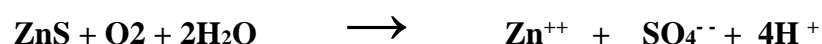
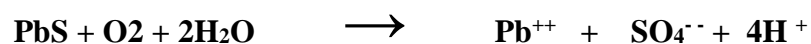
Dans les eaux des gisements carbonatés, les sulfates sont souvent plus abondants que les bicarbonates. A l'état solide, lié au calcium, ils constituent le gypse (CaSO<sub>4</sub>) qui n'est pas la seule source des sulfates

La source la plus probable de l'ion Sulfate est le minéral sulfuré:

Sphalérite (ZnS), Galène (PbS), Baryte (BaSO<sub>4</sub>), Pyrite (FeS<sub>2</sub>.)

Les sulfures en présence d'eau s'oxydent en donnant des sulfates.

L'ensemble des réactions chimiques peut être résumé de la façon suivante :



L'Oxydation du soufre de la blende est de la galène conduit à la mise en solution du zinc et du plomb (dont les hydroxydes sont insolubles :  $Zn(OH)_2$  et  $Pb(OH)_2$  et libère en abondance des ions  $H^+$  qui rendent l'eau agressive.

Cela explique la présence des vides karstiques observés dans les carottes de forage et dans les galeries de la mine lors de l'exploitation. Cette dissolution locale conduit à la formation de poches karstiques isolées les unes des autres. L'aquifère Hauterivien serait ainsi 'fissuré et karstifié'. A ne pas confondre avec le 'karst' ou la dissolution apparaît comme un phénomène évolutif conduisant à une hiérarchisation des écoulements vers un drain unique.

Dans la chaîne des réactions chimiques, l'oxydation du plomb et du zinc est extrêmement lente, l'équilibre n'est atteint qu'en quelques mois (100 jours environ). Donc, la mise en solution de l'ion  $SO_4^{2-}$  par oxydation du minerai sulfuré est une réaction lente. Elle devrait permettre de caractériser des eaux ayant séjourné plusieurs semaines ou plusieurs mois dans l'aquifère.

#### **c). Les Chlorures ( $Cl^-$ )**

La teneur en chlorure a augmenté généralement avec le degré de minéralisation d'une eau, généralement les chlorures présents dans les eaux proviennent essentiellement de :

- Les dissolutions des engrais chimiques utilisés en agriculture.
- La dissolution des sels naturels pour lessivage de terrains salés.

#### **d). Les Nitrates $NO_3^-$**

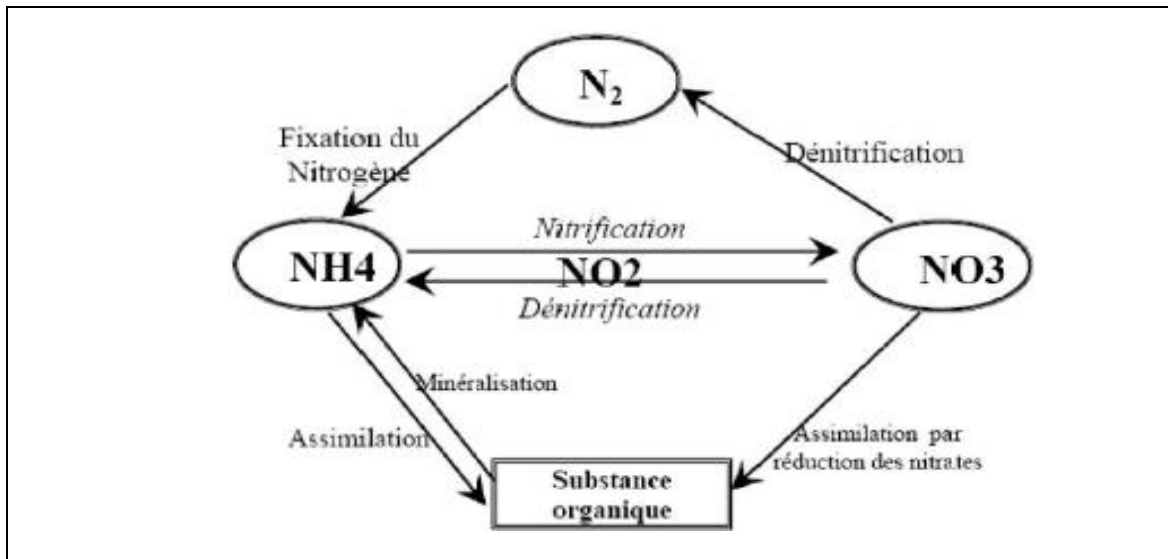
Les nitrates ( $NO_3^-$ ) constituent le stade final d'oxydation de l'azote organique. Les nitrates sont abondamment répandus dans le sol, dans la plupart des eaux et des plantes où ils sont nécessaires à la synthèse des végétaux. Soluble dans l'eau, ils se retrouvent naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines et les eaux de surface.

Les sources d'azote peuvent être :

- La matière organique du sol par la minéralisation ;
- Les amendements organiques comme le fumier et les autres déchets
- Les engrais azotés.

Ces derniers donnent naissance aux nitrates par les processus de nitrification qui correspondent à l'oxydation biologique de l'azote ammoniacal en azote nitrique  $NO_3^-$

(Fig. IV.1) .Les étapes successives de la nitrification se font par l'intermédiaire de deux familles de bactéries principalement présentes dans les sols: *Nitrosomonas* pour la nitrification (transformation de  $\text{NH}_4^+$  en  $\text{NO}_2^-$ ) et *Nitrobacter* pour la nitrification (transformation de  $\text{NO}_2^-$  en  $\text{NO}_3^-$ ).



**Fig. IV.1.** Le cycle de l'azote dans le sol (Hill, 1991)

La concentration « naturelle » en nitrates des eaux souterraines en l'absence de fertilisation va de 5 à 15 mg/l ( $\text{NO}_3$ ). Mais la source majeure provient de l'apport d'engrais azotés. Cet apport peut se faire soit directement sous forme de nitrates, soit sous forme d'ammoniac, ou d'urée, lesquels se transforment dans le sol en nitrates. Certains engrais associent les deux formes, comme le nitrate d'ammonium, qui dans les sols libère immédiatement des nitrates, avant de générer plus lentement des nitrates issus de l'oxydation de l'ammoniac.

D'après ces résultats, l'azote semble provenir des pluies. En effet, l'azote minéral; qui provient essentiellement des pluies; se transforme par le processus de nitrification sous l'intervention des bactéries aérobiques en Nitrites ( $\text{NO}_2$ ) et en Nitrates ( $\text{NO}_3$ ).

## IV.2.CLASSIFICATION DES EAUX

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux des Forages du gisement Chaâbet-El-Hamra Période avril 2012 sont portées sur le Tableau IV.4.

#### IV.2. 1. FACIÈS DES EAUX : DIAGRAMME DE PIPER

Cette méthode est basée sur la représentation des résultats des analyses chimiques sur *le diagramme de Piper* qui permet de classer et comparer les eaux entre elles.

Le diagramme de Piper permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global. Le principe consiste à représenter dans chaque triangle équilatéral les quantités en réaction par rapport à la concentration totale des anions et des cations, on obtient ainsi deux points représentatifs indiquant la dominance d'un anion ou d'un cation.

La composition de l'eau peut être figurée sur le losange par un point unique correspondant à l'intersection des parallèles depuis ces deux points aux côtés du losange qui représente la nature chimique de l'échantillon.

La représentation des point d'eau sur le diagramme triangulaire de PIPER pour la période Avril 2012, montre la tendance vers le pôle magnésien et le pôle calcique dans le sous triangle des cations, alors que les anions montrent une dominance bicarbonatée pour certains points, et des autres points montrent la tendance vers le pôle carbonatée. Le diagramme global fait ressortir le faciès suivant: **bicarbonaté magnésien et calcique** (Fig. IV.2).

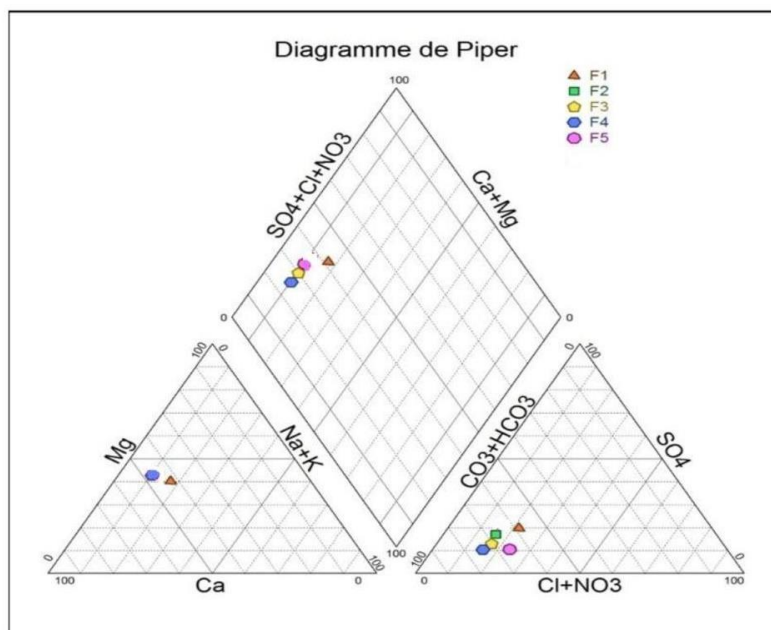


Fig.IV.2. Classification des eaux de Chaabet –El-Hamra selon Piper (Avril 2012)

#### IV.2.2. FACIÈS DES EAUX: FORMULE CARACTERISTIQUE DE STABLER

Cette classification permet de connaître les différents faciès chimiques des eaux, où nous avons convertir les masses pondérales de chaque élément en (méq/l), puis on réduit ces derniers en pourcentage (%) du nombre total du (méq/l). On classe par ordre de grandeur, d'abord les anions suivis des cations.

De ce classement, nous définissons les eaux de la mine de Chaâbet-El-Hamra pour la période Avril 2012, voir tableau suivant :

**Tableau IV.5.** Classification des eaux selon Stabler (Période avril 2012)

Formule caractéristique		Faciès chimique
$r \% \text{HCO}_3^- > r \% \text{SO}_4^{2-} > r \% \text{Cl}^- > r \% \text{NO}_3^-$	$r \% \text{Mg}^{++} > r \% \text{Ca}^{++} > r \% (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	Bicarbonaté magnésien et calcique

On observe que le faciès dominant qui est le bicarbonaté calcique et magnésien, ce qui confirme l'influence de la lithologie sur le chimisme des eaux. On note là aussi que le faciès de ces eaux est en relation directe avec les formations carbonatées riches en magnésium, donc les formations calcaires dolomitiques sont à l'origine de ces faciès.

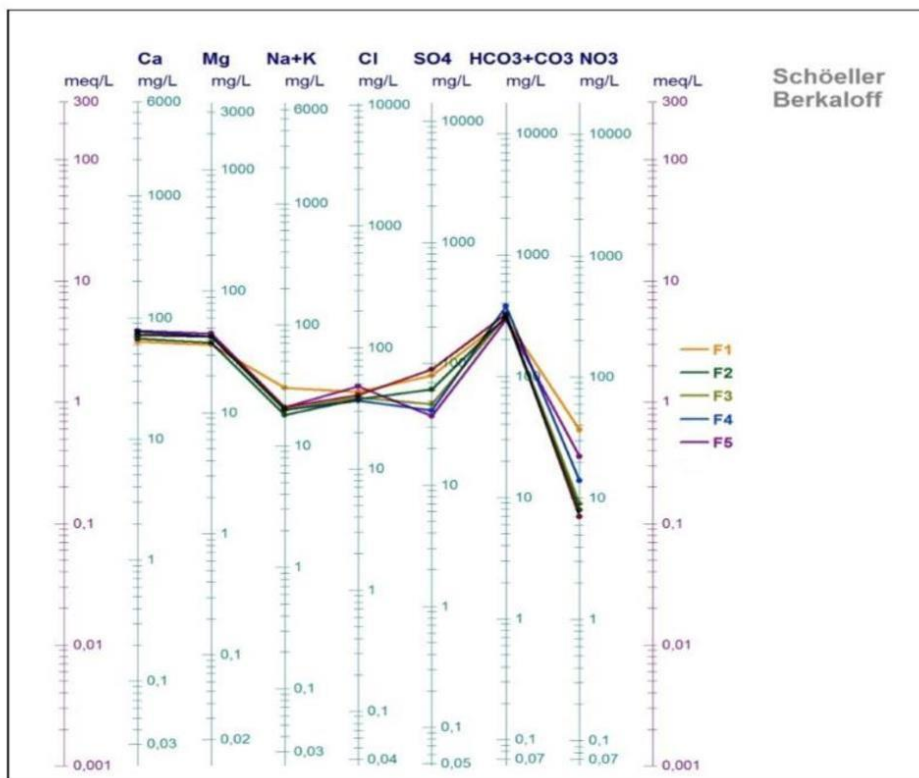
#### IV.2.3. FACIÈS DES EAUX: DIAGRAMME DE SCHOELLER-BERKALOFF

Le diagramme de Schoëller-Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques.

La classification des eaux dans ce diagramme est basée sur le positionnement des différents éléments analysés sur les règles graduées

Les diagrammes tracés pour la période Avril 2012 (Fig.IV.3), confirment la prédominance des faciès **bicarbonaté magnésien et calcique**, permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée essentiellement aux ions  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$ .

D'une manière générale, on peut dire que ces eaux ont évolué, dans des formations carbonatées dolomitiques.



1 Fig.IV.3. Classification des eaux de Châabet El Hamra selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Avril 2012)

#### IV. 2.4. CONCLUSION

L'eau souterraine en circulation est non seulement un créateur, mais aussi un vecteur d'information. L'étude du comportement des substances dissoutes et/ou transportées permet de renseigner sur le fonctionnement hydrochimique des aquifères.

La qualité et la quantité des substances en solution dans l'eau permettent de renseigner sur les minéraux qui ont été dissouts et, par conséquent, sur la nature des terrains traversés par l'eau.

L'abondance relative de ces solutés peut aussi fournir des indications sur les lieux les plus favorables à la mise en solution.

L'eau contient donc en solution une information très complète, concernant l'essentiel de son histoire souterraine. En effet les réactions chimiques en particulier celles de la dissolution, de même que les processus physiques, ne sont pas instantanés. La réalisation complète de l'ensemble des réactions d'un système chimique aboutissant à la dissolution ou à la précipitation, demande un temps plus ou moins long. Le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre entre tous les réactants en présence dépend d'un



certain nombre de facteurs : pression, température, nature et concentration des réactants, la surface de contact eau\_ roche.

La quantité de roche dissoute en un temps donné, à partir d'une surface déterminée, dépend de certaines conditions locales : climat, structure et nature de la roche, morphologie du bassin versant et de la nature des pluies....

La connaissance précise des réactions chimiques aboutissant à la solubilité des différentes substances, permet de faire apparaître l'expérimentation comme un recours précieux dans l'interprétation des données de terrain

### IV.3. METAUX LOURDS

Le terme métal lourd regroupe les métaux de densité supérieure à 5 g/cm<sup>3</sup>, à l'exception des alcalino-terreux.

En général, les éléments suivants sont cités comme étant des métaux lourds : bismuth (Bi), cadmium (Cd), chrome (Cr), cobalt (Co), cuivre (Cu), étain (Sn), fer (Fe), manganèse (Mn), mercure (Hg), molybdène (Mo), nickel (Ni), plomb (Pb), et zinc (Zn). Puisque ce gisement est destiné à l'exploitation du Zinc, des analyses des métaux lourds sont donc obligatoires pour confirmer la dissolution ou la non-dissolution de ces derniers.

Le tableau (IV.7) suivant, récapitule les teneurs des métaux lourds (en mg/l) et surtout le Zn, Pb et Fe des forages testés après la mise à niveau du pompage continu

**Tableau. IV.7.** Les teneurs des métaux lourds dans les forages (Période avril 2012)

<b>Métaux lourds Forages</b>	<b>Zn mg/l</b>	<b>Pb mg/l</b>	<b>Fe mg/l</b>	<b>Cr mg/l</b>	<b>Mn mg/l</b>	<b>Cd mg/l</b>
<b>F1</b>	0	<b>Non décelable</b>	0.073	<b>Non décelable</b>	0.009	<b>Non décelable</b>
<b>F2</b>	0.007		0.071		0.014	
<b>F3</b>	0.035		0.085		0.014	
<b>F4</b>	0.048		0.307		0.017	
<b>F5</b>	0.001		0.065		0.008	

### IV.4. POTABILITE DES EAUX DE LA MINE DE ZINC DE CHAABET-EL-HAMRA (NORME ET QUALITE):

Les eaux souterraines ne sont pas des eaux pures (bonne qualité), car la minéralisation intervient directement dans la qualité chimique des eaux et donne une

certaine : saveur, odeur et couleur .C'est pour cela l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S) a établi des normes de potabilité des eaux en fonction de la teneur des éléments chimiques.

Le tableau (IV.8) montre que les eaux du terrain d'étude sont très chargées, ces eaux peuvent devenir dangereuses à la consommation si les teneurs des éléments sont excessivement élevées et dépassant largement les normes requis.

- D'après la Norme Algérienne(Na) et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), la comparaison des eaux de forage de notre zone d'étude, nous indique que ces eaux sont dans les normes.

- La comparaison des eaux de forage (voir Tableau IV.8) de la zone d'étude à la norme algérienne et celle de l'OMS n'enregistre aucune anomalie, **ce qui permet de dire que ces eaux sont dans les normes.**

**IV. 8.** Comparaison des eaux souterraines du gisement de Chaâbet-El-Hamra avec la norme Algérienne (NA) et les normes OMS.

Eléments chimiques mg/l	Normes Algériennes mg/l	Normes OMS mg/l	Teneurs du gisement de Chaâbet-El-Hamra mg/l
PH	6.5 - 8.5	6,5 - 9,225	7,22 - 7,35
conductivité (µS/cm)	2800	≥ 1500	690 - 770
RS à 105°C	2000	1500	440 - 522
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	200/400	250	70 - 94
Cl <sup>-</sup>	200/500	200	35 - 50
CA <sup>++</sup>	75/200	500	75,51 - 85,84
Mg <sup>++</sup>	150	50	36,03 - 44,85
NA <sup>+</sup>	200	100	17 - 91
K <sup>+</sup>	20	12	1 - 4
Nitrates (No3)	50	20	31 - 1
Zinc mg/l	5	3	0-0,904
Plomb	0.05	0.01	Non décelable
Fer mg/l	0.3	0,3	0,002-0,307
Manganèse	0.5	0,4	0,008-0,018
Cadmium	0.01	0,003	Non décelable
Chrome	0.05	0,05	

## IV. 5. CONCLUSION

Les analyses physico-chimiques des eaux souterraines du gisement de Chaâbet-El-Hamra montrent que cet aquifère renferme des eaux basiques bicarbonatées calciques et magnésiennes selon la classification de *Piper et schoeller-Berkaloff*.

Sa conductivité et ses résidus secs sont en diminution au cours du temps.

De plus, l'analyse des métaux lourds confirme la faible présence de ces derniers dans ces eaux, ce qui permet de dire que le corps minéralisé du gisement ne se décompose pas.

La comparaison des teneurs enregistrées avec les normes de potabilité, soit Algériennes (NA) 6360 ou celle de l'OMS n'enregistre aucune anomalie ce qui implique sa potabilité.

Non seulement la réalisation des forages hydrauliques dans le gisement de zinc de Chaâbet-El-Hamra est pour le dénoyage de la mine afin de continuer les travaux d'exploitation, mais aussi la gestion de ces eaux pour alimenter en eau potable les communes avoisinantes. On a donc un intérêt double.

Quant aux eaux de Kherzet Youssef, les eaux ne sont pas potables pour l'AEP mais elles restent très bonnes pour les besoins agricoles. En effet, au vu des débits important qu'elle peut fournir (plus de 2000m<sup>3</sup>/h). il serait judicieux d'établir un système de drainage pour l'irrigation des hautes plaines Sud sétifiennes (Guellal, Mezloug, Beida-Bordj, Aïn-Lahdjar et la plaine d'Aïn-Azel). Nous savons que ces régions sont vouées à la céréaliculture. Mais un programme d'irrigation bien établi pourrait contribuer au développement des cultures maraichères et par conséquent subvenir à l'autosuffisance de la wilaya en produits agricoles.

## *Chapitre Cinquième*

# **ETUDE D'IMPACT DES DECHETS DE LA MINE DE KHERZET YOUSSEF SUR L'ENVIRONNEMENT**

## **V.1. DEVENIR DES METAUX LOURDS PROVENANT DES HALDES**

### **MINE DE KHERZET YOUSSEF**

#### **V.1.1. INTRODUCTION**

En Algérie, il existe de nombreux sites miniers qui ont été abandonnés et qui devront être restaurés. En effet, ces sites génèrent des quantités importantes de contaminants et pourraient avoir des impacts négatifs sur l'environnement : pollution des sols, destruction ou perturbation d'habitats naturels, impact visuel sur le paysage, enfin contamination des eaux superficielles et souterraines, etc..... La mine Kherzet Youssef, située à 50Km au Sud Est de Sétif, en est un exemple.

Le Sud Sétifien est considéré comme la plus importante région minière du domaine hodnéen pour le Zinc et le Plomb. La principale période d'activité de la mine sont les années 1975-1990 ; ensuite, la mine a été fermée (juin 1990) par suite d'inondation qui a fait des victimes parmi les miniers.

Au cours de cette période, la mine avait produit d'importantes quantités de déchets de nature diverse : exhaures de la laverie et stériles riches en sulfures, déposés et accumulés aux alentours immédiats de la mine. La laverie est restée opérationnelle pour traiter le minerai transporté par camion en provenance de Chaâbet-El-Hamra. Cette dernière est une nouvelle mine située à quelques km au Sud d'Aïn-Azel. En instance de traitement, le minerai brut est stocké à l'air libre avec les différents rejets.

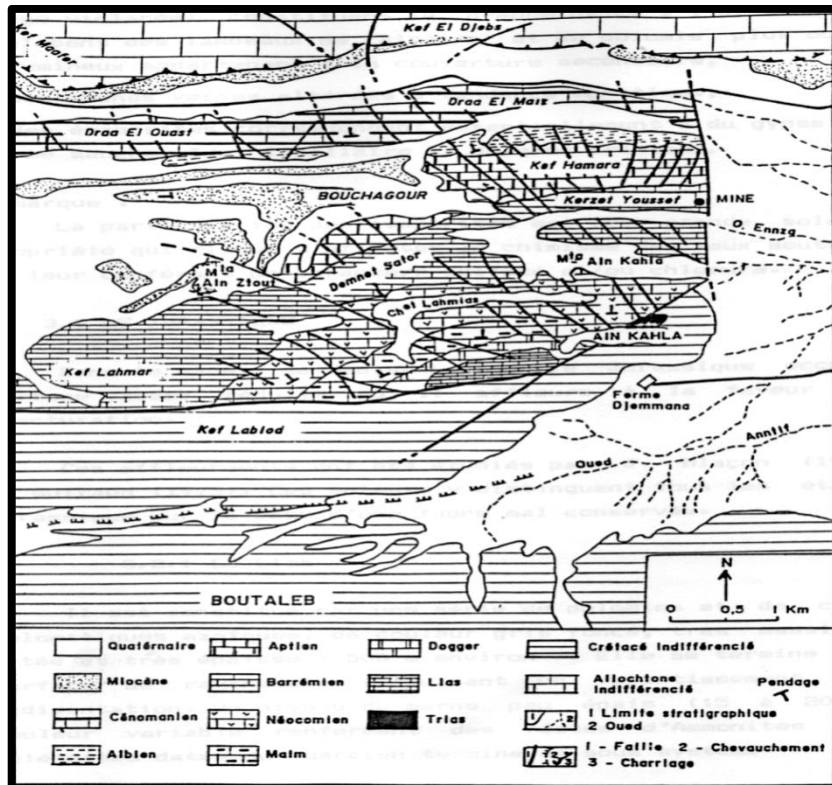
Tous ces produits reçoivent des apports en pluies. Par conséquent, les phénomènes de formation du drainage minier acide (DMA) s'enclenchent. Il peut être une source de pollution des eaux souterraines et de surface.

En effet le flux de métaux transportés par les eaux de surface drainant des districts miniers ne sont pas sans un impact sur les sites 'avals' et peuvent être catastrophiques pour les écosystèmes : sols de la plaine, eaux superficielles, eaux souterraines, santé publique et nuisance paysagère. En outre, la durée de vie des contaminants peut durer plusieurs siècles et leur potentiel de pollution peut être transféré à une échelle régionale. C'est pourquoi le traitement des sites miniers abandonnés est une priorité du siècle.

### V.1.2. RAPPEL SUR LE GISEMENT DE KHERZET YOUSSEF

La mine de Kherzet Youssef est un gisement souterrain polymétallique (Zn, Pb), stratiforme à structure monoclinale, encaissé dans des formations barrémiennes à dominante carbonatée.

La carte géologique (Fig.V.1) montre une fracturation intense. Parmi cette fracturation la faille de «Kherzet Youssef » présente une singularité dans le paysage et joue un rôle important dans la structure de la région, puisqu'elle constitue la limite mine-plaine. C'est une faille normale méridienne subverticale (pendage 65° à 80° Est).



**Fig.V.1.** Carte géologique modifiée et complétée (in Bellouche 1996)  
(D'après la carte géologique au 1/50.000 d'Aïn-Azel, Sonatrach, 1977)

Du point de vue hydrogéologique, cette faille juxtapose des aquifères de nature et d'âge différents Fig.V.3 :

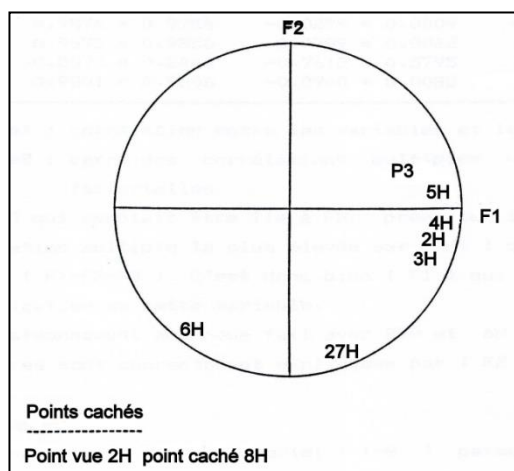
-Le premier situé à l'ouest de la faille : les formations sont d'âge Barrémien supérieur. Les logs stratigraphiques montrent une alternance de couches perméable (grés, calcaires, dolomies) et des couches imperméables (marnes et argiles). Cela traduit, dans le détail la présence d'un aquifère multicouches (Unité A). Toutefois, cette structure lorsqu'elle est considérée dans son ensemble, présente une certaine

homogénéité. En effet les fissures karstifiées mettent en relation les différents niveaux aquifères et donne lieu à un seul aquifère fissuré et karstifié

. Le second réservoir à l'Est : les formations détritiques argilo-sableuses, sont d'âge Néogène (Unité B). Leur puissance s'accroît lorsqu'on s'éloigne de la faille vers l'Est (passant de 100m à plus de 300m). Elles sont favorables au développement d'un aquifère libre poreux.

Le recoupement de différentes études hydrogéologiques semblent attester de l'étanchéité de la faille de « Kherzet Youssef ».

- 1- La piézométrie indique une circulation lente et indépendante dans les deux aquifères
- 2- Une approche en composantes principales a été réalisée sur l'étude de l'évolution des niveaux d'eaux dans les sondages (fig. V.2), permet de distinguer deux ensembles de variables obéissant chacun à des phénomènes différents.
  - Le premier ensemble constitue des variables P3, 2H, 3H, 4H, 5H, 8H situés tous dans l'encaissant, dans les formations carbonates, présente des variations de niveaux d'eau liées à la circulation des eaux vers les ouvrages de captage sous l'influence du pompage d'exploitation.
  - Le second ensemble, comprenant les variables 6H et 27H, creuse dans les formations détritiques de la plaine, présente des variations des niveaux d'eaux dues au régime naturel des eaux souterraines.



**Fig. V.2.** Cercle des corrélations dans l'espace des variables (A.C.P.)

Après la catastrophe, le schéma hydrogéologique du gisement a complètement été bouleversé par l'arrivée soudaine d'une trombe qui a noyé la mine en quelques heures.

En effet, un forage profond de trois cent mètres réalisé dans la plaine a permis de montrer un nouveau horizon aquifère méconnu jusque là. Le log stratigraphique montre qu'après 120m de néogène, on traverse un niveau d'argile rouge de 20m d'épaisseur. Ensuite, une perte totale de boue. Le refoulement de la boue fait remonter des cutting de calcaire dolomitique. On est donc en présence d'un karst noyé (Unité C). Ce troisième aquifère karstique insoupçonné vient s'ajouter au schéma hydrogéologique de la mine (Fig.V.3). Le pompage de dénoyage à 2000m<sup>3</sup>/h n'a pas pu dépasser le rabattement escompté pour récupérer les victimes. A la suite de moult tentatives infructueuses, la mine a été fermée et abandonnée.

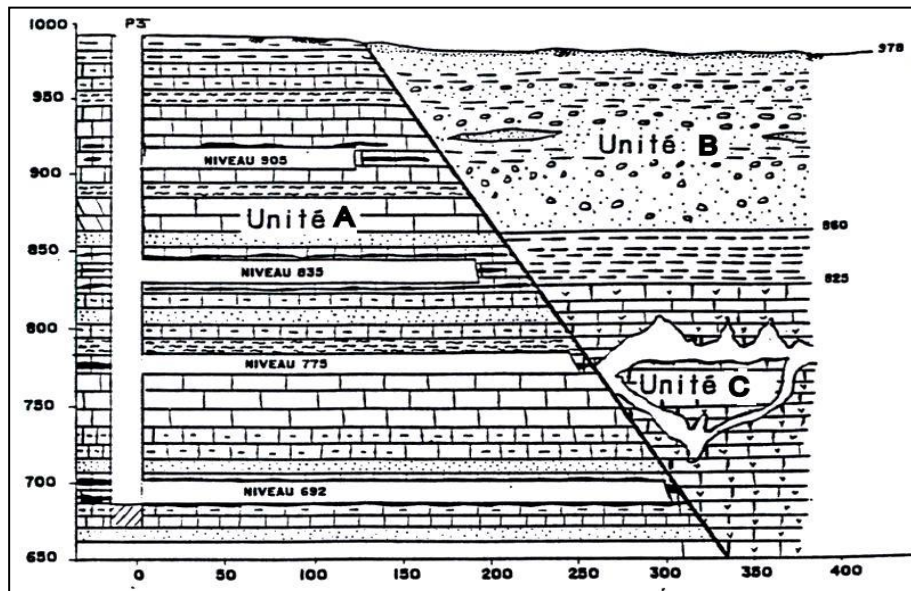


Fig. V.3. Schéma hydrogéologique possible du gisement

### V.1.3 ORIGINE DU PROBLEME DE LA POLLUTION

Les minéralisations du sous-sol sont dues à des circulations de fluides qui transportent des cations métalliques qui vont être piégés dans les horizons réducteurs. Or l'exploitation minière va brusquement modifier les conditions d'oxydo-réduction

Ces matériaux extraits de la mine sont de diverses natures : encaissant parfois relativement riche en sulfures (stérile), minerais pauvres en sulfures (haldes), ou encore rejets de traitement du minerai riche en sulfure. Les quantités produites et stockées peuvent atteindre plusieurs millions de tonnes. Ainsi, les déchets de flottation de la



laverie rejetés dans le bassin (bac) d'évaporation occupent une surface non négligeable aux abords de la mine.

Ces produits, déjà stockés humides, reçoivent aussi les pluies. Ainsi le phénomène biologique et chimique de la formation du drainage minier acide (DMA) s'enclenche alors par suite de suintement ou ruissellement sur le lieu de stockage.

#### **V.1.3.1 MODE D'EXTRACTION DU MINERAI**

Le Zinc et le Plomb sont habituellement intégrés dans une gangue dolomies sulfuré (Blende et Galène). L'obtention du Plomb ou du Zinc relativement pur se fait surtout avec des procédés de préparation et de concentration. Plus spécifiquement, les phases de concentration suivantes sont réalisées :

Après concassage et broyage, la concentration du minerai est effectuée par flottation. Les particules minérales sont plongées dans un bassin d'eau contenant des agents chimiques (en particulier du cyanure). En raison d'un phénomène de charges électriques, les particules de minerai Zn ou Pb s'attachent à des bulles d'air, montent à la surface et sont écumées

Ce procédé est à l'origine d'une pollution de l'eau, utilisée par la laverie à la suite de l'écoulement des solutions acides et cyanurées.

En plus de cela, l'industrie minière en général, consomme une importante quantité d'eau pour le traitement du minerai. La laverie de Kherzet Youssef, utilise environ 100m<sup>3</sup>/h d'eau pour le traitement du minerai brut.

Parmi les polluants pouvant se retrouver dans les effluents miniers, mentionnons les matières en suspension, divers métaux lourds provenant de la gangue ainsi que des déchets toxiques. Les exhaures et les stériles occasionnés par l'exploitation du gisement minier contenant des minéraux sulfurés, constituent à long terme le problème environnemental le plus grave de l'industrie minière Sud Sétifienne.

#### **V.1.3.2.DRAINAGE MINIER ACIDE**

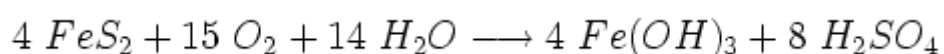
Un **drainage minier acide (DMA)** est une solution minérale acide qui s'écoule régulièrement en conséquence d'une mine. Le phénomène en cause est spontané sur les affleurements de minéraux sulfurés, naturellement sujets à une oxydation par contact avec l'air et l'eau : de manière lente, il y a production par oxydation d'acide sulfurique et solubilisation des métaux présents.

Lors des travaux miniers (excavations et pompages), l'équilibre chimique de ces affleurements et des gisements profonds de sulfures métalliques est perturbé par des conditions oxydantes soudaines ; cette réaction prend une ampleur suffisante pour entraîner des écoulements importants.

### Catalyse

Les réactions chimiques principales qui donnent lieu à un DMA sont l'oxydation de la pyrite (sulfure de fer).

Cette réaction a lieu en présence ou en absence de bactéries selon l'équation :



Il ne s'agit bien sûr que d'une équation bilan : le processus d'oxydation de la pyrite varie en fonction de l'évolution du pH. La particularité de cette réaction est d'être auto-catalysée, ce qui permet au phénomène de production de DMA de se propager de façon similaire à un incendie (la combustion produit de la chaleur qui déclenche la combustion d'autres matériaux) ; l'oxydation des sulfures de fer produit du fer ferrique qui entraîne l'oxydation des sulfures.

L'apparition des DMA est favorisée par la présence de microorganismes qui tirent l'énergie nécessaire à leur croissance des réactions d'oxydoréductions métalliques.

Ces bactéries agissent comme de véritables catalyseurs des réactions chimiques qui se déroulent à la surface des minéraux et en solution.

Les détails de ce phénomène sont encore mal compris et font l'objet de polémiques pour déterminer la réaction prédominante entre oxydation directe et indirecte (c.à.d. avec contact direct ou non des bactéries à la surface des sulfures).

## **V.1.4. POLLUTIONS INDUITES PAR LES DMA IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT**

Les DMA sont une source de pollution acide et métallique pour les milieux aquatiques et les aquifères. Ils sont capables, pour les cas les plus sévères, de libérer plusieurs tonnes de composés métalliques toxiques par jour dans le système hydrographique.

Les métaux des effluents miniers acides sont généralement des poisons du métabolisme, en particulier les métaux lourds. La présence simultanée de plusieurs métaux peut engendrer une toxicité supérieure à celle de chaque métal séparé.

Par exemple, le Zinc, le Cadmium et le Cuivre sont toxiques aux faibles pH et agissent en synergie pour inhiber la croissance des algues et affecter les poissons

En effet, L'acidification est directement à l'origine d'une mortalité importante des populations de poissons, de perturbations de leur taux de croissance et de leur reproduction. Les effets indirects de l'acidification sont la dégradation de l'habitat des poissons et des modifications des relations entre prédateurs et proies (interruption de la chaîne alimentaire). Presque aucune espèce ne survit à un pH inférieur à 5.

Cependant, dans es régions constituées de terrains acides, l'acidité des eaux est conservée et les métaux lourds sont transportés sous forme soluble à de grandes distances.

En revanche dans les régions constituées de terrains calcaires (basiques) comme c'est le cas de notre mine, les eaux acides sont rapidement neutralisées par les roches carbonatées, et la plupart des métaux restent insolubles. Lors des crues, les particules solides riches en métaux (fragments détritiques de minerai ou minéraux métalliques précipités) seront entraînées très loin en aval et peuvent parfois redevenir solubles si les caractéristiques des eaux changent. Il y a aussi le problème liés aux sulfates, présents en forte teneur, ils induisent une pression osmotique importante, qui va déshydrater les plantes.

Enfin, notons que les DMA ont également un impact sur les paysages : il s'agit de l'impact visuel que constitue les dépôts de couleur rouille des lits des cours d'eaux ou l'aspect dénudé des stocks déchets miniers.

La pollution par les métaux est aussi ancienne que l'activité minière. Bien que ce type de pollution a longtemps été occulté pour ne pas entraver le développement industriel : la prise de conscience de la lutte contre la pollution des DMA est assez récente.

En fait, il a fallu deux accidents majeurs pour que cette problématique touche l'opinion mondiale :

-sur le site de la mine d'Aznalcóllar (Espagne), en 1998, l'effondrement d'un terril a entraîné le déversement de 4 millions de m<sup>3</sup> de DMA dans un fleuve adjacent.

-A **Baia Mare** (Roumanie), en 2000, un incident similaire entraîna le déversement de 100 000 m<sup>3</sup> de DMA contenant entre 50 et 100 tonnes de cyanure, qui ont contaminé le Danube sur plus de 2000Km.

La recherche sur les DMA, débutée dans les années 1970, s'est organisée à la fin des années 1980 avec l'avènement de grands programmes de recherche internationaux.

#### **IV.6. CONCLUSION**

À l'abandon d'une mine, le meilleur moyen d'éviter la pollution de la nappe et des cours d'eaux voisins est de renoncer à l'ennoyage et de poursuivre l'exhaure : c'est une solution contraignante mais il est facile d'en évaluer le coût financier et de constituer une provision. Cette option paraît particulièrement pertinente quand l'eau d'exhaure trouve une utilisation lucrative. Dans notre cas, il est préférable de traiter le site en drainant et dérivant les eaux de ruissellement et en aspergeant les stocks de déchets miniers de Chaux.

D'autre part, l'exhaure intensif dans les bassins miniers conduit souvent à un abaissement général du niveau de la nappe avec formation de cuvette piézométrique (cône de dépression) autour de la mine. Après ennoyage, les bassins miniers retrouvent un nouvel équilibre hydrodynamique non influencé, exempt de toute surexploitation.

Cet équilibre est différent de celui qui prévalait avant ou pendant l'exploitation minière (du fait des vides laissés par l'exploitation), mais il est définitif dans le sens où le désordre hydraulique retrouve des conditions réductrices et la qualité des eaux du nouveau réservoir s'améliore d'abord rapidement (quelques mois à quelques années) puis plus lentement (quelques dizaines à quelques centaines d'années). Cependant les dégâts causés par l'exploitation dans le sous-sol sont irréversibles. Au fil du temps, il est difficile d'évaluer le délai de retour du circuit à une qualité suffisante pour l'adduction d'eau potable : cela dépendra de beaucoup des particularités du site considéré.

## **V.2. DEVENIR DES METAUX LOURDS PROVENANT DE LA MINE DE KHERZET YOUSSEF**

### **V.2.1. INTRODUCTION**

Le drainage minier acide est donc le résultat d'un ensemble complexe de réactions chimiques et microbiennes qui nécessitent la présence d'oxygène (le stérile est

aussi riche en métaux lourds). Une oxydation microbienne du soufre élémentaire (pyrite du stérile par exemple) produit aussi de l'acide sulfurique.

Toutefois, la solubilisation de divers métaux lourds : Certains métaux sont plus solubles (Zn, Cd) que d'autres (Pb); et dépend aussi des caractéristiques des eaux (acidité, oxygénation). La présence l'aluminium, l'arsenic, le cadmium, le cuivre, le plomb, le nickel et le zinc qui se retrouvent dans des cours d'eau, est susceptible de causer des problèmes plus en aval. Pour prévenir à ce problème, on a aménagé un bassin d'évaporation qui récupère le drainage acide de la laverie.

Tel qu'il a été mentionné, l'exploitation minière engendre le rejet de métaux lourds dans les effluents miniers. À cet égard, le « *Règlement sur les effluents liquides des mines* » impose des normes quant au rejet de certains métaux dont les concentrations maximales autorisées.

**Tableau.V.1.** Valeurs limites de concentration admise en éléments traces dans les sols : moyenne mensuelle en mg/kg

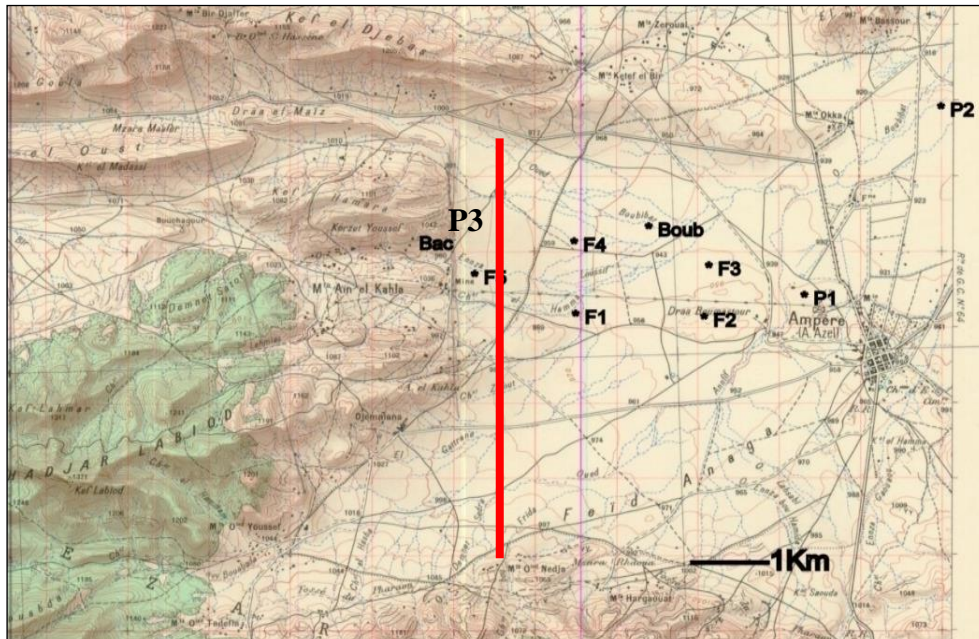
Eléments traces	Cadmium Cd	Cuivre Cu	Chrome Cr	Nickel Ni	Plomb Pb	Zinc Zn
Teneur mg/kg	2	100	150	50	100	300

### V.2.2. ECHANTILLONAGE

Des prélèvements (Fig.V.4) ont été effectués dans cinq fosses profondes de 1.5m environs et creusées à la pelle mécanique, d'aval en amont dans la plaine. Ainsi donc, la fouille n°1 sera la plus éloignée et la fouille n°5 sera la plus proche de la mine.

L'échantillonnage des fouilles s'est fait selon des horizons de sols définis à partir de la couleur et de la nature du sol.

Pour les eaux, deux échantillons ont été pris dans chacun des puits de la plaine, du puits de mine et dans le bassin d'évaporation. L'un des deux échantillons a été acidifié pour conserver les métaux lourds.



**Fig. V.4.** Situation des points de prélèvement des eaux et des sols  
(D'après carte topographique au 1/50000)

## V.2.2. LES ANALYSES

Les analyses physico-chimiques des échantillons ont été réalisées par le laboratoire d'analyses de la faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale (AGRO), département des sciences du milieu et de l'aménagement du territoire (MILA), ULC, Belgique.

### V.2.2.1. ANALYSES DES EAUX

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux et des sols de Kherzet Youssef sont rassemblés dans les tableaux suivants :

**Tableau. V.2.** Analyses des eaux souterraines : teneur en métaux  
(Exprimée en ppb = microg/l)

Ech	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	P	Pb	Sb	Se	Zn
P2	19	<10	47	<1	<1	<1	<1	24	4	<5	<20	<5	<5	<10	<1
P1	26	<10	18	<1	<1	<1	<1	127	3	<5	<20	<5	<5	<10	<b>257</b>
bac	53	<10	22	5	<1	<1	20	<1	32	<5	<20	20	<5	34	1921

**Tableau. V.3.** Analyses des eaux souterraines : teneur anions exprimée en ppm = mg/l

échantillon	Ca	K	Mg	Na	Si
P2	158.6	4.4	81.4	74.8	6.5
P3	202.1	8.1	92.0	93.6	9.9
bac	627.7	23.7	21.8	99.0	0.405

**Tableau. V.4.** Analyses des eaux souterraines : teneur cations exprimée en ppm = mg/l

échantillon	Fluorures	Chlorures	Sulfates	Nitrates
P1	0.47	123	<b>455</b>	44
P3	0.72	335	330	24

L'examen du tableau IV.4 montre que la composition chimique des eaux est d'une forte concentration de sulfates (d'oxydation des sulfures sont à l'origine des teneurs élevées en sulfates), de chlorures de magnésium et de calcium dans tous les points d'eaux échantillonnés.

Dans le cas des sulfates, les fortes teneurs s'expliqueraient par dissolution des minéraux contenus initialement dans les rejets miniers et des phases minérales secondaires, et le lessivage des terrains triasiques pour le puits (P1) situé à environ trois km de la mine.

Pour les métaux lourds, seul le puits P2 présente une teneur au dessus de la norme en Zinc, cela s'explique par sa situation géographique, c'est à dire à l'aval proche du bassin (bac) d'évaporation.

### **CONCLUSION :**

Les résultats obtenus ont montré que seules les eaux souterraines, de la plaine au voisinage de la mine ont été contaminées. Il s'agit notamment des sulfates, et du zinc dont la concentration est de 257 µg/l (teneur au dessus des normes).

Les origines de la pollution des eaux sont le drainage minier acide et la dissolution, lors d'un événement pluvial, des phases minérales secondaires.

Afin de réduire l'extension et la gravité des impacts du drainage acide sur les eaux de surface et souterraines, des efforts importants doivent être consentis afin de développer des méthodes de restauration efficaces et économiques. En ce qui concerne le cas étudié, le climat semi-aride de la région et la richesse des stériles en calcaire neutralisent les drainages miniers acides.

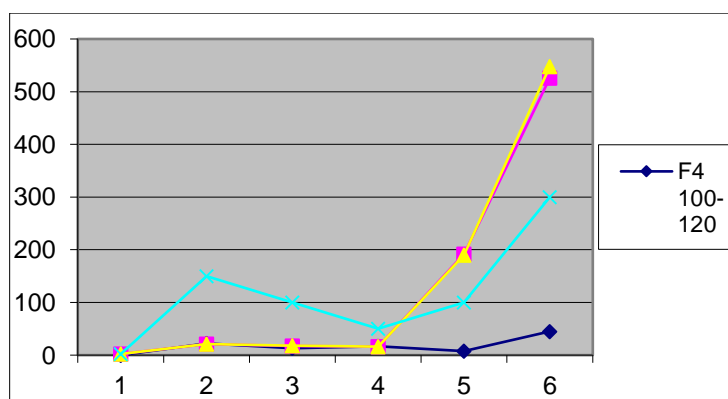
### V.2.2.2. ANALYSES DES SOLS

Les résultats des analyses physico-chimiques des sols de Kherzet Youssef sont rassemblés dans les tableaux ci-dessous.

**Tableau .V.5.** Teneur exprimée en mg/kg de matière sèche à 105°C. Attaque à l'eau régale reprise dans 200ml. Les profondeurs sont exprimées en cm

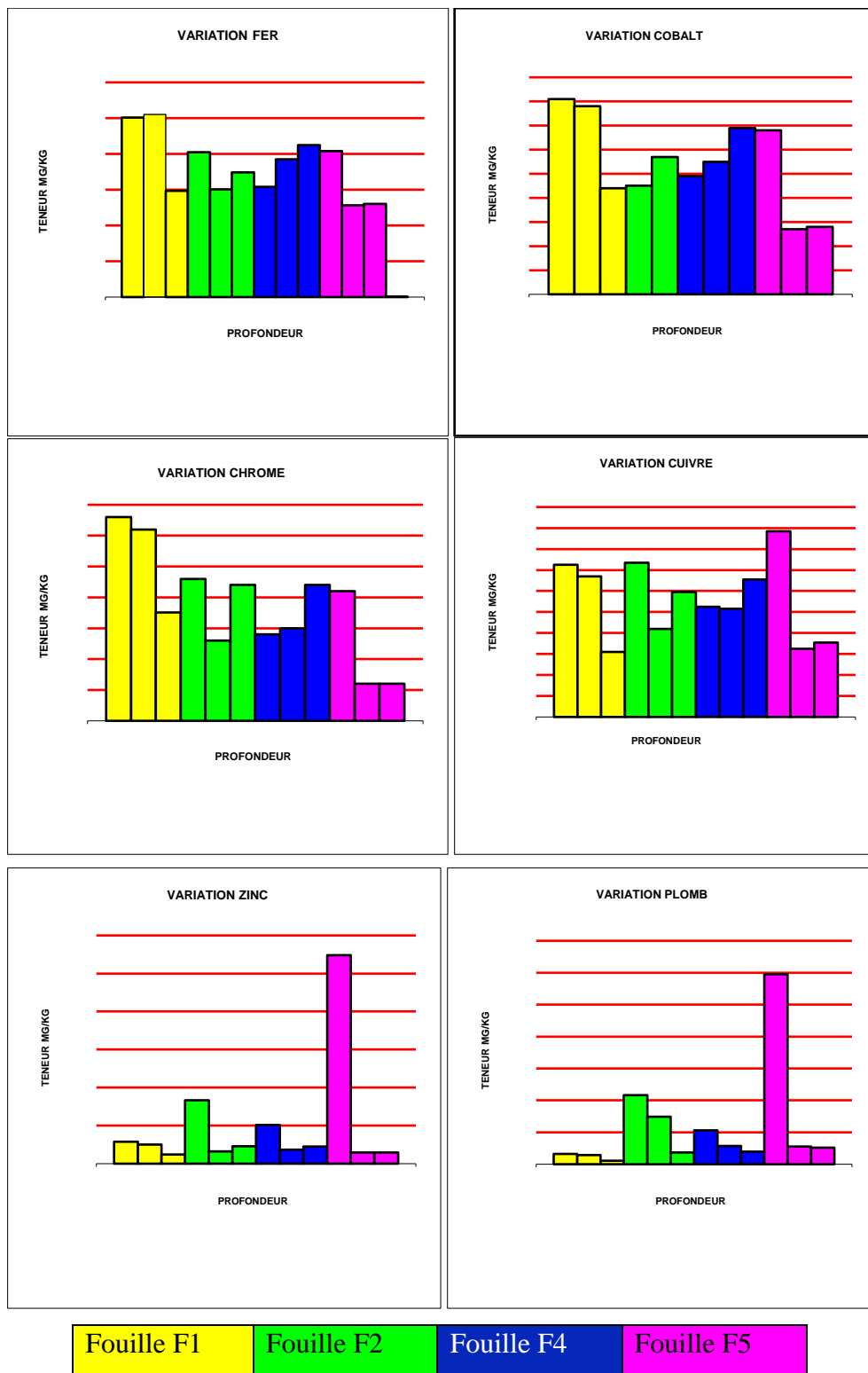
éch	Fe	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Ti	ZN
F1 0-40 1	23182	<0.15	6,7	28	12	284	17	3,6	175	38
F1 0-40 2	25093	<0.15	8,1	33	14,5	353	20	6,4	218	58
F1 40-100	25514	<0.15	7,8	31	13,4	335	19	5,7	194	50
F1100-120	14860	<0.15	4,4	17,5	6,2	146	11	2,2	99	24
F2 0-40	20252	<0.15	6,6	23	14,7	348	17	43,3	189	167
F2 40-100 1	12612	<0.15	3,7	13	7,4	205	9	5,6	83	29
F2 40-100 2	15039	<0.15	4,5	13	8,4	226	10	29,7	93	32
F2 100-120	17418	<0.15	5,7	22	11,9	300	14	7,3	166	46
F3 70-80 1	15909	<0.15	5,7	18	10,7	266	14	7,5	137	39
F3 70-80 2	16063	<0.15	5,7	19	10,9	271	14	7,6	139	37
F4 0-38	15397	<0.15	4,9	14	10,5	257	12	21,3	124	102
F4 38-100 1	20588	<0.15	5,3	14	10,3	265	13	7,1	123	34
F4 38-100 2	19249	<0.15	5,5	15	10,3	265	13	11,4	126	37
F4 100-120	21255	<0.15	6,9	22	13,1	325	17	7,9	147	45
<b>F5 0-39 1</b>	<b>20300</b>	<b>2.3</b>	<b>6,48</b>	<b>21</b>	<b>17,5</b>	<b>375</b>	<b>16</b>	<b>119,8</b>	<b>179</b>	<b>526</b>
<b>F5 0-39 2</b>	<b>20385</b>	<b>2.3</b>	<b>6,8</b>	<b>21</b>	<b>17,7</b>	<b>390</b>	<b>16</b>	<b>119,1</b>	<b>186</b>	<b>548</b>
F5 39-100	12834	<0.15	2,7	6	6,5	215	8	11	47	29
F5 100-130	13029	<0.15	2,8	6	7,1	236	8	10,4	49	29
Norme(Afnor)		2	30	150	100		50	100		300

D'après le graphique (Fig. V.5), nous remarquons à titre comparatif que la fouille F4 est présente une teneur en Zinc largement inférieure à la norme (Afnor). Cependant la fouille F5 présente des valeurs de teneur en Zinc largement supérieures à la norme. Cette valeur m'a paru très élevée au départ, c'est pourquoi j'ai réalisé une deuxième analyse sur l'échantillon pour confirmer qu'il ne s'agit pas d'une erreur de manipulation.



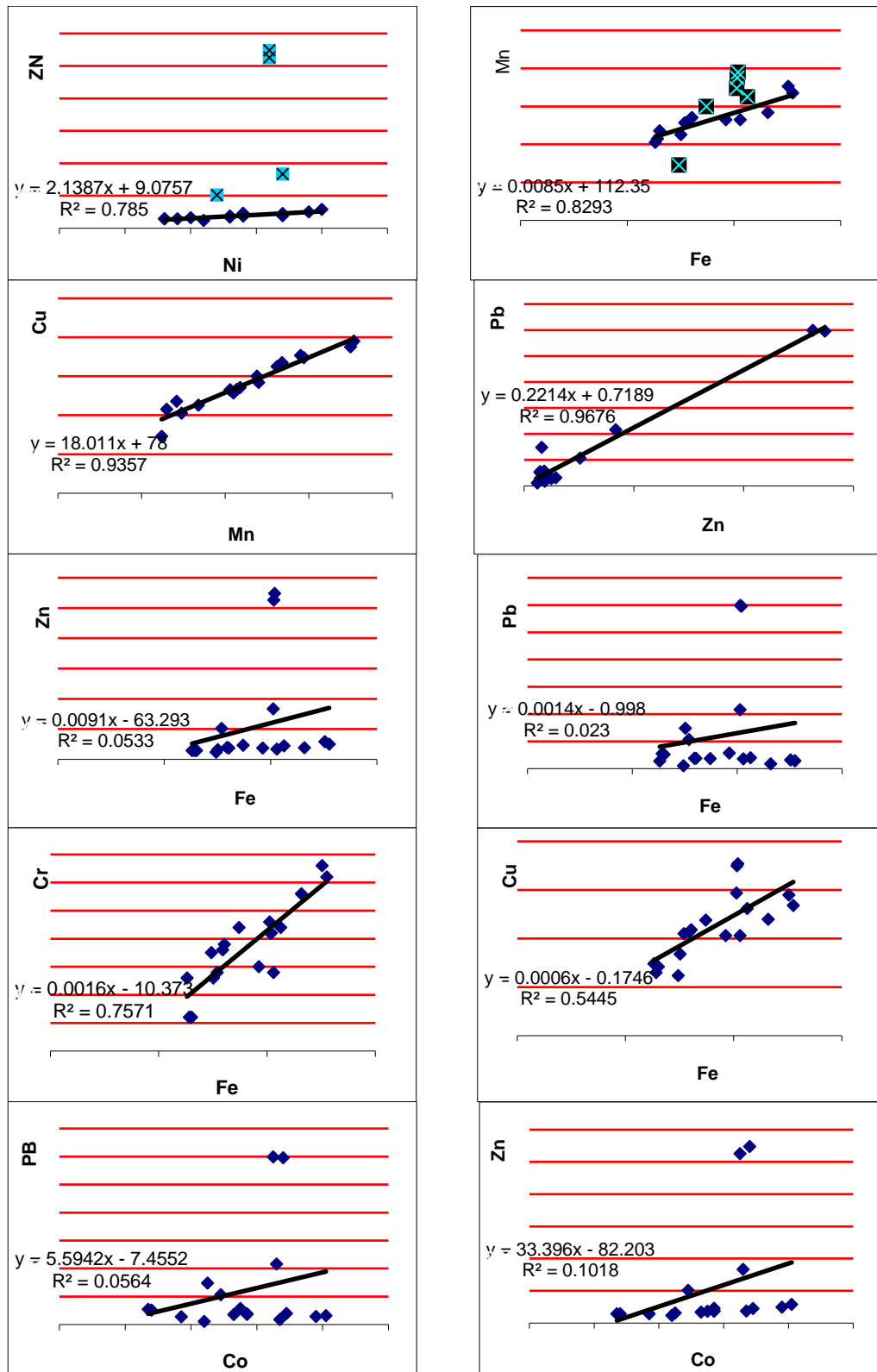
**Fig. V.5.** Graphique des teneurs en zinc dans les fouilles F4 et F5





**Fig. V.6.** Variations des teneurs en métaux lourds en fonction de la profondeur (0 à 40cm - 40 à 100cm - 100 à 120cm)

D'après ces graphiques (Fig.V.6), on constate que les teneuses en Plomb et en Zinc dans la fouille F5 sont très élevées au niveau du sol superficiel (0 à 40cm).



**Fig. V.7.** Droite de régression entre les différents métaux lourds

Des droites de régression réalisées à titre d'exemple comparatif pour voir la corrélation qui existe entre les différents éléments de métaux lourds (Fig. V.7).

On constate que le fer par exemple est très corrélé avec le cuivre, le manganèse et le chrome ( $R^2 > 0.5$ ).

Par contre il n'a aucune relation avec le Plomb et le zinc ( $R^2 < 0.05$ ). Cependant, on constate qu'il y a une bonne relation entre le plomb et le zinc ( $R^2 = 0.965$ ).

Ces constatations nous permettent de confirmer que les deux éléments ne sont pas 'autochtones' du sol mais proviennent du bac d'évaporation, car les teneurs sont nettement supérieures à celles contenues dans le sol des autres fouilles. En effet, Ils ont été transportés par l'eau de débordement du dénoyage de la mine juste après la catastrophe.

### ***DISCUSSIONS ET CONCLUSION***

D'après les documents de la mine, on a mentionné lors du pompage de dénoyage de la mine après la catastrophe, dans le but de repêcher les victimes dans le niveau 835, on a utilisé plusieurs pompes dont le débit total dépasse les 2000m<sup>3</sup>/h.

En conséquence, le bac d'évaporation n'a pas pu contenir ces débits engendrant ainsi un débordement de l'eau sur la plaine aux environs de la mine. La fouille F5 et le puits P1 situé dans cette zone envahi par le débordement de l'eau de la mine par suite du pompage de dénoyage ont été contaminés par cette eau qui est chargée de Plomb et Zinc, qui peuvent être aussi bien sous forme solide que dissoute.

### **IV.3.LA GESTION DE L'EAU DES MINES ABANDONNÉE**

L'exploitation d'une mine souterraine perturbe l'équilibre hydrogéologique en créant des drains artificiels qui modifient les écoulements naturels et qui nécessitent d'évacuer l'eau (l'exhaure) s'écoulant par gravité vers les points les plus bas des travaux. Pendant la période d'exploitation, une mine de Kherzet Youssef, de grande dimension produit, en climat semi-aride, plus d'eau que de minerai. Cette mine produit en fin d'exploitation, 900 m<sup>3</sup>/h d'eau dont 100m<sup>3</sup>/h devaient être pompés pour le traitement du minerai. Après la catastrophe qui a mis fin à l'exploitation, l'arrêt de l'exhaure a entraîné une montée du niveau de l'eau dans les réseaux de galeries et dans les aquifères autour de la mine.

Un nouvel équilibre hydrogéologique, différent de l'équilibre naturel avant exploitation va alors progressivement se mettre en place.

#### **IV.3.1. LA GESTION DE L'EAU PENDANT LA PERIODE D'EXPLOITATION (L'EXHAURE).**

Les galeries constituent des drains où l'eau s'écoule plus rapidement que dans les aquifères environnants, alors que les techniques d'exploitation utilisant le foudroyage (Effondrement provoqué par torpillage des piliers), déstructurent les terrains au toit des galeries et créent des courts-circuits hydrauliques entre la surface et les travaux miniers.

L'exhaure repose sur un système complexe de drains qui convergent vers des albraques (réservoirs souterrains) qui servent de réserve d'eau pour les pompes d'exhaure regroupées dans des salles souterraines à différents niveaux jusqu'à 200 m de profondeur). La puissance totale des pompes permet d'extraire un débit équivalent aux pics de l'arrivée d'eau du niveau 775 (environ 1200m<sup>3</sup>/h). Trois réseaux d'alimentation en énergie électrique sont mis à la disposition (réseau de Sétif, réseau d'Aïn-Azel et une station de groupe électrogène) des pompes pour parer à toute panne d'énergie. En effet un arrêt des pompes de quatre heures entraîne un ennoyage de la mine. Pendant l'exploitation, l'eau d'exhaure est rejetée dans l'oued Enza

#### **IV.3.2. LA GESTION DE L'EAU A L'ABANDON DE LA MINE : (L'ENNOYAGE).**

L'arrêt de l'exploitation minière suite à une brutale venue d'eau survenue le 2 juin 1990. Le débit de cette venue d'eau estimé à partir du volume des ouvrages miniers, est de plus de 2000m<sup>3</sup>/h, ce qui correspondrait à la rupture d'une digue de barrage "Faille de Kherzet Youssef ou Faille Barrage", en conséquence cela a conduit à l'ennoyage rapide de la mine.

#### **IV.3.3. LA QUALITE DE L'EAU DE LA MINE PENDANT L'EXPLOITATION**

Avant l'ouverture de la mine, la roche est en équilibre chimique dans son environnement géologique. Après l'ouverture des galeries, cette roche est brutalement mise en contact avec l'oxygène de l'air qui circule dans les travaux miniers. Des réactions d'oxydation des sulfures contenus dans la roche (comme la pyrite) se produisent alors avec production d'acide sulfurique.

Ce type de réactions très répandu produit les effluents acides des mines, connus sous le nom de drainage minier acide (DMA). Les tas de stériles en surface soumis au lessivage par la pluie sont le siège des mêmes réactions d'oxydation. L'augmentation de l'acidité de l'eau, dont le pH peut atteindre dans les cas extrêmes des valeurs inférieures

à 2, va favoriser l'attaque des minéraux de la roche avec mise en solution de contaminants comme le plomb, l'arsenic, le zinc, le cuivre... qui seront alors transportés vers les rivières et les aquifères. Le drainage minier acide est un des problèmes majeurs de l'industrie extractive et peut atteindre une ampleur catastrophique comme, par exemple, dans les mines métalliques de la ceinture pyriteuse Sud ibérique.

Dans notre contexte géologique particulier, la présence de minéraux carbonatés ou silicatés dans la roche permet une neutralisation naturelle in situ de l'acidité de l'eau. La réaction de neutralisation par dissolution de ces minéraux est observée, dans les mines de charbons en Ecosse, dans la mine métallique ainsi que dans les mines de fer de Lorraine où le pH est proche de 7 (Collon et al.,2004). Ce type de mécanisme est appelé drainage minier neutre (DMN). Mais le pH neutre ne rend pas pour autant l'eau potable : cette eau est en effet généralement fortement sulfatée et peut contenir des éléments chimiques qui la rendent impropre à la consommation.

#### **IV.3.4. LA QUALITE DE L'EAU DE LA MINE A L'ARRET DE L'EXPLOITATION**

L'envoyage des mines n'est pas sans conséquence sur la qualité de l'eau. Pendant la phase de remplissage, l'eau va lessiver les parois des galeries et la roche fragmentée des zones foudroyées. Ces zones, où la fragmentation de la roche augmente la réactivité, sont à l'origine de l'élévation rapide des concentrations en éléments chimiques dans l'eau.

Par ailleurs, l'envoyage des travaux miniers freine l'oxydation des minéraux sulfurés, car l'oxygène ne diffuse que très lentement dans l'eau. Il existe plusieurs techniques de remédiation du drainage minier acide en surface. Le traitement des effluents par ajout de chaux est classique, mais il conduit à la précipitation de boues riches en sulfate et en métaux lourds. L'utilisation de zones humides artificielles, par l'action conjuguée du système racinaire des végétaux, des bactéries et de la matière organique, permet un traitement efficace des effluents miniers. Cependant, un nouveau problème apparaît concernant la stabilité à long terme des composés organiques ou minéraux qui ont piégé les contaminants au cours de ces traitements. Une modification ultérieure du milieu par assèchement ou apport d'eau, peut entraîner un relargage des contaminants dans l'environnement.

### **V.3.5. LA GESTION DE L'EAU DES MINES ABANDONNEE :**

#### **(L'EVOLUTION DE LA QUALITE DE L'EAU).**

L'ennoyage des travaux provoque une modification de la qualité de l'eau dans la mine par rapport à la période d'exhaure. Les concentrations, notamment en sulfate, ont augmenté à l'ennoyage et ont atteint des valeurs supérieures aux normes de potabilité, rendant l'eau de la mine impropre à la consommation. Pour les pouvoirs publics, la conséquence directe a été la réalisation d'un réseau de drainage et d'irrigation pour la mise en valeur des terres de la plaine d'Aïn-Azel.

La question qui se posait alors était de savoir si l'eau de ces réservoirs redeviendrait potable et dans quel délai. Cette question se pose à chaque ennoyage de mine même s'il n'existe pas de réponse générale, valable pour tous les sites. En effet, chaque mine s'inscrit dans un contexte hydrogéologique et géochimique qui lui est propre et qui contrôlera l'évolution de la qualité de l'eau du réservoir. La démarche de prévision de l'évolution reposera, d'une part, sur une reconnaissance des écoulements dans le réservoir de la mine ennoyée, et d'autre part, sur une caractérisation des réactions chimiques contrôlant la composition de l'eau. Les modèles actuels permettent de prédire l'évolution de la qualité de l'eau au point de débordement des mines dans différents contextes : mines de charbon en Angleterre et en Ecosse (Adams et Youger, 2001), mine métallique de l'Argentière en Haute-Savoie (Schmitt et al. 2003), mines de fer de Lorraine (Collon, 2003).

Mais dans le cas de Kherzet Youssef qui constitue un réservoir de grandes amplitudes, la seule prévision de la qualité de l'eau au puits pompage P3 ne suffit pas. Il est alors nécessaire de prendre en compte la répartition spatiale des caractéristiques hydraulique et géochimique dans la mine afin d'établir un modèle prédictif de la qualité de l'eau. Le développement de ces outils d'aide à la gestion de ces grands réservoirs fait partie de mes travaux en cours et de mon attachement scientifique sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains.

### **V.3.6. CONCLUSION**

L'augmentation de l'acidité des drainages des districts miniers peut accroître la mobilisation des métaux lourds qui s'y trouvent (dans les stériles, les exhaures de traitement du minerai....) comme le Plomb (Pb), le Zinc (Zn) et qui sont donc plus en

mesure de s'écouler dans le bassin d'évaporation et les cours d'eau. Comme bon nombre de métaux lourds, le plomb est toxique et il reste en solution dans l'eau libre lorsque l'acidité est élevée.

La vulnérabilité ou la résistance du sol aux drainages acides des mines n'est pas toujours la même. Par exemple, un sol où la concentration de carbonate de calcium (y compris le calcaire et la dolomite) est plus élevée résiste davantage aux drainages acides parce que le carbonate de calcium neutralise chimiquement les acides. C'est pourquoi le «chaulage» est utilisé comme méthode de restauration écologique pour ajuster le pH des lacs touchés par les pluies acides. On peut donc conclure que le sol où la concentration de carbonate de calcium est moins élevée est particulièrement vulnérable.

## *Conclusion Générale*

L'étude entreprise constitue une contribution à la connaissance des problèmes de l'eau dans les mines et les travaux souterrains ainsi que l'impact des stériles et des haldes minières les nappes d'eau souterraines et sur l'environnement.

Du point de vue morphométrique, la région étudiée se présente comme une surface plane parsemée de quelques reliefs (Djebel Youssef, Djebel Sekrine, Hadjar Labiod etc..) et qui la bordent vers le Sud ( Boutaleb).

Notre secteur d'étude correspond à un vaste bassin versant (1600 Km<sup>2</sup>). La conjugaison des phénomènes topographiques et la semi-aridité du climat ont donné naissance à un phénomène d'endoréisme qui se traduit par la présence de cuvettes fermées (sebkhas, Chotts) qui jalonnent d'Ouest en Est le pays des lacs. Les dépressions correspondent à des bassins d'effondrement qui ne s'expliquent essentiellement que par la tectonique.

L'altitude moyenne des sous-bassins du Pays des lacs est de 980 mètres alors que l'altitude maximale correspond au sommet du Djebel Fourhal avec 1748 mètres.

Dans l'ensemble, les pentes sont faibles et dépassant rarement les 12%. La valeur de l'indice de compacité a montré des formes assez allongées favorisant la concentration des eaux de ruissellement.

La description lithostratigraphique et tectonique nous a permis de distinguer trois groupes d'unités hydrogéologiques :

- Les formations carbonatées du Jurassique et du Crétacé constituant les reliefs suivants : Hadjar Labiod ( Kherzet Youssef), Rahbet-Talkhemt Kalaoun et Djouzi ( Chaâbet-El-Hamra) ou bien l' ensemble allochtone Sud sétifien formé d'écailles réparties à travers toute la plaine Dj.Sekrine, Dj Youssef....

La tectonique cassante a haché ces massifs et a permis un développement d'aquifères fissurés et karstifiés.

Le Sud Sétifien est caractérisé par un climat semi-aride et soumis essentiellement aux influences méditerranéennes se traduisant par l'alternance d'un hiver relativement froid et d'un été très chaud et sec ; avec des précipitations moyennes annuelles variant entre 300-400 mm. La température moyenne annuelle est de 15.5°C. En conséquence, la plus grande partie de la lame d'eau moyenne précipitée s'évapore, soit près de 90% et ne s'infiltré que 5% environ.



### Pour le gisement de Chaâbet-El-Hamra

L'étude piézométrique de la nappe hauterivienne, gisement à partir de la montre que la direction d'écoulement est vers la partie centrale du gisement, vers les profils 15 et 16.

Les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère déterminés sur la base des données des sondages hydrogéologiques Pz10, Pz12, Pz13 et H3 (puits de mine) implantés dans le site du gisement, l'analyse des graphiques réalisés à partir d'essai de pompage de longue durée nous ont permis de déterminer les caractéristiques hydrogéologiques de la nappe. C'est un aquifère peu transmissif et faiblement capacitif. A cause des problèmes de venue d'eau au profil 12, L'exploitation minière a été arrêtée.

D'après les résultats, on conclut :

-L'aquifère est peu transmissif et peu capacitif :

- Les études hydrologiques effectuées sur la région d'Aïn-Azel ont abouti aux résultats suivants :

- Une infiltration faible de l'ordre de 6 %,
- Une forte évapotranspiration de l'ordre de 90 %.
- Les débits d'exhaure étaient considérables (100m<sup>3</sup>/h au profil 12)

#### **D'où vient l'eau ?**

Les propriétés hydrodynamiques (la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement) de l'aquifère Barrémien de Kherzet Youssef et Hauterivien de Chaâbet-El-Hamra ont été déterminés par des essais de pompage.

La transmissivité est faible de l'ordre  $4.3.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , et le coefficient d'emmagasinement très faible 0.2%, ce qui traduit que les deux aquifères se ressemblent et sont peu transmissifs et très peu capacitifs.

Les débits d'exhaure sont considérables 90l/s actuellement à Chaâbet-El-Hamra nous renseigne que ces eaux souterraines proviennent d'un transfert hydraulique souterrain. Alimenté par les reliefs limitrophes.

Comme les débits d'eau sont considérables et que le faciès chimique de l'eau est bicarbonaté calcique et magnésien et que les teneurs en métaux lourds de ces eaux sont trop faibles, négligeables et même non décelables, ce qui reflète la non-dissolution des corps minéralisés par ces eaux.

Le ministère des ressources en eaux a décidé de l'utilisation de ces eaux pour

l'alimentation de la ville d'Ain-Azel en eau potable. Mais la direction générale de l'ENOF envisageait la réouverture du gisement.

Pour cela un système constitué d'une batterie de cinq forages et deux piézomètres ont été réalisés au profil 16.

La mine de Chaâbet-El-Hamra à arrêté ses travaux à cause de cette eau puisque la minéralisation se trouve en dessous du niveau statique de la nappe Hauterivienne, c'est pour cette raison que les responsables ont décidé de trouver des solutions qui favoriseraient la continuité de l'exploitation de cette mine avec le rabattement de la nappe par le pompage actif d'une part et en plus de l'eau qui est pompée sera utilisée pour l'approvisionnement en eau potable de la ville d'Aïn-Azel.

Comme ce premier alignement de forage n' pas donné satisfaction. Une commission a été désignée pour la mise à niveau du système d'exhaure afin de rabattre la nappe de 30m sous minéralisation. Le deuxième alignement réajusté a donné de bons résultats aussi bien en eaux pour l'AEP que pour la réouverture de la mine, puisque le rabattement escompté était dans les délais fixés.

### **Pour le gisement de Kherzet Youssef,**

L'analyse des sols avoisinants le gisement ainsi que les eaux souterraines des puits n'ont pas montré une pollution significative par les métaux lourds. Toutefois, l'exploitation des mines souterraines se présente comme une activité ayant d'importantes répercussions sur l'environnement.

En effet les ponctions minières contribuent à l'épuisement des ressources naturelles. Les modifications apportées au milieu géologique et aux eaux souterraines, l'altération de la qualité de l'air, le bruit ; les poussières ; la dégradation des eaux de surface et l'atteinte de l'intégrité du paysage sont d'autant de facteurs qui entrent dans la le changement global de l'environnement et sa dégradation.

La mort des 19 mineurs à la mine de Kherzet Youssef en juin 1990, suite à l'inondation de la mine et bien d'autres accidents miniers, atteste que ce domaine est loin d'être aux normes de sécurité approuvées.

En plus de ce déficit sécuritaire s'ajoute le problème du rejet des déchets (toxiques) de la mine de Chaâbet-El-Hamra directement dans la nature, sans se soucier de l'environnement. A ces déchets s'ajoutent ceux de la décharge communale située aux environs immédiats de la mine. Pourtant en Algérie tous les textes qui

réglementent le traitement des déchets existents. En effet en 2001, la loi de finance de décembre a permis un début d'application du principe Pollueur-Payeur.

### **Pour le gisement de Châabet El Hamra,**

Tenant compte des problèmes sécuritaires et environnementaux qu'a connus le gisement de Kherzet Youssef, nous recommandons aux responsables de la mine de Châabet el Hamra de tirer leçon en réglant certains problèmes et en prenant en compte certains points susceptibles de régler quelques problèmes spécifiques en conformité avec les normes d'hygiène et de sécurité fixées par la réglementation minière algériennes telle que :

#### **Sur le plan exploitation ;**

- La mine de Chaabet El Hamra doit réviser la méthode utilisée pour l'extraction du Zinc, en soutenant les galeries par des boulons d'ancrage précontraints, appliqués directement dans les zones d'exploitation par chambres et piliers. Ces boulons doivent être placés immédiatement après l'abattage et le chargement du minerai.
- Des contres métalliques sont utilisés également pour le soutènement et le renforcement des ouvrages miniers, en raison de leur rigidité. Il faudra prendre soin de bien les appuyer et les bloquer afin de parer à la déformation de l'encaissant et éviter l'effondrement et l'affaissement.

#### **Sur le plan environnemental ;**

- L'imperméabilisation des digues de stériles par un tapis d'argile, pour éviter les risques de pollution des eaux souterraines ;
- La surveillance et le contrôle systématique des déchets et des exhaures miniers, afin d'éviter la pollution par infiltration,
- Le reboisement du site minier, pour éviter l'érosion du sol et minimiser la pollution de l'air,
- La réhabilitation des sites fermés, comme c'est le cas de Kherzet Youssef : protection du puits de mine, drainage des eaux de pluie, couverture et chaulage des digues et suivi permanent de la qualité des eaux de surfaces et souterraines,
- Vérification périodiques des équipements de traitement du minerai,
- Et enfin, pourquoi ne pas recycler l'eau du bac de décantation riche en réactifs et la réutiliser dans la laverie.

*« On est arrivé à une époque où l'eau devient très précieuse (Or bleu), surtout avec ce réchauffement climatique, ses perturbations et ses dérèglements atmosphériques. C'est pourquoi il est recommandé d'utiliser les grands moyens pour l'étude des eaux souterraines, tels utilisés pour la prospection et l'exploitation du pétrole et de l'or. »*

*Pour les miniers, l'eau est une compagne inséparable tel un fauve qui les guette à chaque coin de galerie, pour le vaincre il faut l'apprivoiser où bien l'éliminer. Dans tous les cas de figure, il faut bien le connaître (bien étudier les eaux souterraines) pour ne pas oublier la mine de Kherzet Youssef, car la vie humaine n'a pas de prix.*

## *Références Bibliographiques*

ADAMS R., YOUNGER P.L., (2001). A strategy for modelling ground water rebound in abandoned deep mine systems, *Groundwater*, Vol. 39, No 2, p. 249-261.

AISSAOUI D., (1984) - Les structures liées à l'accident Sud-atlasique entre Biskra et le Djebel Mandra, Algérie. Evolution géométrique et cinématique. Doctorat de 3<sup>ème</sup> CYCLE, STRASBOURG. 105P.

ALPERS, C. N., BLOWES, D. W., NORDSTROM, D. K., JAMBOR, J. L., (1994). Secondary minerals and acid-mine water chemistry. In *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine Wastes*,

ARIS Y., (1994) : Etude tectonique et micro tectonique des séries jurassiques à plio-quadernaire du Constantinois central (Algérie Nord orientale) caractérisation des différentes phases de déformations. Doctorat d'université, Nancy I, 215p.

ARIS Y., COIFFAIT Ph.-E. and GUIRAUD M., (1998). Characterisation of Mesozoic-Cenozoic deformations and palaeostress fields in the Central Constantinois, northeast Algeria. *Tectonophysics* 290, 59-85.

ATTEIA. O., (2005): Chimie et pollution des eaux souterraines, Lavoisier –édit, France.

ATTOUCHEIK, L., (2006). Etude géochimique des rejets du complexe minier de Kherzet Youssef (SETIF) et son impact sur l'environnement, Mémoire de magistère, IST.USTHB, Algérie

BAKALOWICZ M. (1979), Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère et de la karstification, Thèse de doctorat Es sc.univ P et M Curie, Paris VI France 260p

BAKALOWICZ M., FORD D. C., MILLER T., PALMER A.N., PALMER M.V., (1989) Thermal genesis of dissolution caves in the Black Hills, South Dakota. *Geological Society of America Bulletin*, 99: 729-738.

BELKHIRI, L., (2011). Étude de la pollution des eaux souterraines : cas de la plaine d'Ain-Azel -Est Algérien, Thèses Doctorat en sciences. Université de Batna, Algérie.

BELLOUCHE. M.A., (1996) : L'eau dans les mines et les travaux souterrains :cas de la mine de Kherzet Youssef (Ain Azel –Sétif), Mémoire de magister en hydrogéologie, Université de Constantine.

BENAISSA A., (1989) : Contribution à l'étude des mouvements de terrain de la région de Constantine (Algérie).thèse magister .univ. Joseph Fourier-Grenoble 1. 124p.

BENZERGA. M., (1975): Première contribution à l'étude géologique et métallogénique des chainons intermédiaires au sud de Sétif (Algérie), Thèse 3<sup>ème</sup> cycle présenté à l'université de Nancy 1.

BERTRANEU. J., (1955): L'étude géologique des monts du Hodna, *bulletin de service de la carte géologique de l'Algérie, Nouvelle série N°4*.

BERTRANEU. J., (1958): Tectonique et minéralisation. Traits commun à la plupart des gites téléthermaux d'Afrique du nord, *Rev. Indust. Minérale, Paris, N° spécial*.

BORDELLE. J & MARGAT. J., (1980): L'eau souterraine en France, Paris: Masson.

BOUFTOUHA. Y., (1981). Contribution à l'étude géologique et gîtologique de l'indice zincifère de Chaâbet El Hamra – Région d'Ain Azel – Hodna, Projet de Fin d'Etudes, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Algérie, pp10-18.

BOUILLIN. J.P, (1986) : Le bassin maghrébin une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'Ouest des Alpes. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (8), t. II, n° 4, pp. 547-558.

BOUSDIRA D., (2009). Etude des impacts des activités d'exploitation des mines Polymétalliques (Pb-Zn) sur l'environnement de la région de Kherzet Youssef (Wilaya de Sétif). Mémoire de Magister ENP.

BOUTALEB, A., (2001). Les minéralisations à Pb-Zn du domaine Sétifien-Hodna: Géologie, pétrographie des dolomies, microthermométrie et implications métallogéniques, Thèse de docteur d'état en géologie minière. IST. USTHB, Algérie.

CASTANY G ET MARGAT J., (1977) : Dictionnaire français d'hydrogéologie, BRGM, SGN, Orléans France.

CASTANY. G., (1967) : Traité pratique des eaux souterraines, Paris: Dunod,p.

CASTANY. G., (1968) : Prospection et exploitation des eaux souterraines, Paris: Dunod.

CASTANY. G., (1980) : L'eau propre, Paris: Hachette.

CASTANY. G., (1982): Principes et méthode de l'hydrogéologie. Paris: Dunod.

CHADI M., SHOUT H. et MARMI R., (2006) : Evolution post-aptienne de la plateforme constantinoise (Algérie Nord-orientale). Communication orale au 8<sup>th</sup> International Conference of the Geology of the Arab World (GAW 8), Cairo University, Egypt, 13-16 février 2006.

COIFFAIT Ph.-E., (1992). Un bassin post-nappe dans son cadre structural : l'exemple du bassin de Constantine (Algérie Nord-orientale). Thèse de Doctorat ès Sciences, Université de Nancy I, 501p.

COIFFAIT.Ph.-E., (1992): Un bassin post-nappe dans son cadre structural l'exemple du bassin de Constantine (Algérie Nord Orientale). Thèse Sciences. Nancy, 502p.

COLLON. P., (2003). Evolution de la qualité de l'eau dans les mines abandonnées du bassin ferrifère lorrain. De l'expérimentation en laboratoire à la modélisation in situ. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 246 p.

COLLON. P., Fabriol R., Bues M., (2004). Ennoyage des mines de fer lorraines : impact sur la qualité de l'eau. C. R. Geoscience Vol 336, Issue 10, p 889-899.

DEMDOUM.A., (2010): Étude hydrogéochimique et impact de la pollution sur les eaux de la région d'el Eulma, thèse doctorat d'état en hydrogéologie, université de Constantine.

DURAND DELGA. M. et FONTBOTE., (1980). La méditerranée occidentale : étapes de sa genèse et problèmes structuraux liés à celle-ci. Mémo. H. s. Soc. Géol. Fr. n°10, 203-224.

DURAND DELGA. M., (1969). Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, N. S., Bull. n°39, pp 89-131, 9 fig.

DURAND DELGA. M., (1969): Étude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique bulletin N° 24.

ENOF (1993): Plans et coupes des corps minéralisés et leurs travaux miniers.

ENOF (1995): Rapport géologique des travaux miniers du gisement de Chaâbet- El-Hamra.

EREM (1992): Rapport final sur les travaux d'évaluation du gisement de Chaâbet-El-Hamra Avec calcul de réserve. Tome 1.

FARAH. A. S., (1991) : Etude du comportement hydrochimique d'un Oued en zone méditerranéenne semi-aride d'Afrique du Nord et de ses causes naturelles et anthropiques: l'Oued Rhumel, Constantinois Algérie, Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, France.

FLAGEOLET. J.C., (1989). Les mouvements de terrain et leur prévention. Paris. Masson, 520p.

FRIZON de LAMOTTE. D., GHANDRUCHE. H., MORETTI. F., (1990) - La flexure saharienne: trace d'un chevauchement aveugle de flèche plurikilométrique au Nord du Sahara. (Aurès) C.R.A.S., t. 310, série 2, pp. 1527-1532.

GHANDRUCHE.H. (1991) – Modalités de la superposition des structures de plissement-chevauchement d'âge alpin dans les Aurès (Algérie). Doctorat, Université Paris-Sud Orsay, France, 189p.

GILLIÉ, MANGAN.C, MUDRY.J., (2004): Hydrogéologie, Objets, Méthodes et Application. Paris, Dunod.

GLAÇON.J., (1958): Les monts du Hodna (Partie orientale), XIXème congrès géologique international, Monographie régionale 1, sérié, Algérie N° 7.

GLAÇON.J., (1967): Recherche sur la géologie et les gites métallifères du tell Sétifien (Algérie), Tome 2, bulletin N° 32, Publication du service géologique de l'Algérie.

GUIRAUD. R., (1973) - Evolution post-Triasique de l'Avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse ès Sciences, Université de Nice, 270 p, 114 fig., 12 pl. h.t.

GUIRAUD. R., (1975): L'évolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du et des régions voisines, Revue de Géographie physique et de géologie dynamique (2), Vol. XVII, Paris.

GUIRAUD. R., (1990) - Evolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Bulletin du Service Géologique d'Algérie, Alger; 271p

GUIRAUD. R., BELLION Y., BALLAIS J.L., (1998) - Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, feuille « Les Tamarins » SGA, 1 carte et 1 notice, 17p.

GUIRAUD. R (1971): Aperçu sur les principaux traits du Hodna et des régions voisines, bulletin de service de l'Algérie N° 41, nouvelle série.

HAKKOU. R., BENZAAZOUA. M. et BUSSIERE. B., (2006). Minéralogie secondaire associée au drainage minier acide du site abandonné de Kettara. 1er Congrès International Mines : Exploration, Exploitation et impact Environnemental (M3E). 14-15 Avril 2006, Bouznika (Maroc).

HENNI. A., (1984): La minéralogie, les particularités géochimiques et la genèse du gisement de Kherzet Youcef. PH-D Université de l'état de LENINGRAD.

HERKAT. M. et DELFAUDJ., (2000) - Genèse des séquences sédimentaires du Crétacé supérieur des Aurès (Algérie). Rôle de l'eustatisme, de la tectonique, de la subsidence : une mise au point. C. R. Acad. Sci. Planetary Science Vol. 330, Issue 11, 785-792.

JÉBRAK. M. (2007): Manuel de gîtologie Version 3.1, Université du Québec.

JÉBRAK. M., Marcoux. E., (2008): Géologie des ressources minérales. Association géologique du Canada, Ressources naturelles et Faune Québec, Gouvernement du Québec.

KAZI-TANI. N., 1986 : Evolution géodynamique de la bordure Nord Africaine le domaine intra-plaque Nord orientale. Approche méga séquentielle.

KHALDI. A., (1987): Le gisement de Kherzet Youssef, une minéralisation Pb-Zn, Fe (Ba) stratiforme dans le membre médian marno- carbonaté du Barrémien de la région de Aïn-Azel (Hodna, Algérie), Analyse, interprétation, typologie, genèse, thèse doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, LNP de LORRAINE.



- KWONG, Y.T.J., 1993, 'Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective, MEND Report 1.32.1 CANMET, Ottawa, 7 p.
- LAFFITTE. R., (1939) - Etude géologique de l'Aurès. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, 2ème série, N°15, 451p
- LIAMAS. J (1993): Hydrologie générale (principes et application), Gaetan Morin éditeur.
- LUCAS.G, GRAS. P, LUNG. G., (1976): Les roches sédimentaires, étude microscopique des roches meubles et consolidées, Tome I et II, édition Douin, Paris.
- MABILLOT. A., (1980): Le forage d'eau, Edition Offset à Saint-etienne (Loire), France.
- MARMI. R., GUIRAUD.R., (2006) - End Cretaceous to Recent polyphased compressive tectonics along the « Môle Constantinois » and foreland (NE Algeria). Journal of African Earth Sciences, 45, 123-136.
- MARSILY de G., (1981): Hydrogéologie quantitative. Paris: Masson.
- MEBARKI . A., ( 2005 ) : Hydrologie des bassins de l'Est Algérien : Ressources en eau, aménagement et environnement, thèse de doctorat, Université de Constantine.
- MEBARKI. A., (1982): Le bassin du Kebir - Rhumel (Algérie). Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau, Thèse de Doctorat de 3e Cycle, Université de Nancy II, 304 p.
- MEDKOUR,N.,1994, Influence des eaux minières sur les sols et contamination par le plomb et le zinc dans la région d'Ain Azel (Wilaya de Sétif), Magistère en science du sol, Institut National Agronomique, Algérie, 162.
- NEZZAL. F., (1989): Étude sédimentologique et paléogéographique de l'Albo-Aptien dans les hautes plaines Constantinoise, thèse de Magister, I.S.T, Université de Constantine.
- OUCHENE. M & MIDOU. Z., (2010): Contribution à l'étude géologique et géostatistique de la minéralisation à Pb-Zn de la mine de Chaâbet-El-Hamra (Sétif), Mémoire d'ingénieur. USTHB, Alger.
- POPOV, A., (1968): Les types morphologiques et la répartition des gisements de zinc et de plomb en Algérie. Ann. Mines. Géolo. Tunis, n° 23.
- RAOULT. J. F., 1974. Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord-constantinois, Algérie. Mem.Soc.Geol.Fr., N.S., T.LIII, n 121, 164 p, 62fig. 11 pl.h.t.120.
- RAY. F., (2007): Ressources en eau souterraine dans les chaînons béarnais (Pyrénées-Atlantiques, France) Géométrie et fonctionnement hydrogéologique de quatre aquifères carbonatés, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1.

REZIGAT. N & IMCHAL. K., (2008): Contribution à l'étude des problèmes environnementaux et de sécurité sur l'exemple de la mine souterraine de Chaâbet El-Hamra (Aïn-Azel, Wilaya de Sétif) , Mémoire d'ingénieur, UFAS, Sétif.

SAMSON, I.M. AND RUSSELL, M.J., (1987): Genesis of the Silvermines zinc- lead-barite deposit, Ireland : fluid inclusion and stable isotope evidence: *Economic Geology*, vol. 82.

SANGSTER. D. F., (1976): Carbonate hosted Pb-Zn deposits. Sulphur and Pb isotopes in stratabound deposits, in K. H. Wolf ed., *Handbook of stratabound and stratiform ore deposits*; Amsterdam, Elsevier, vol. 2.

SAVORNIN. J.,(1920): Étude géologique de la région du Hodna et du plateau Sétifien: Stratigraphie, description régionale, bull, serv, Géol, de l'Algérie, 2<sup>ème</sup> série, N° 7.

SIDAM (1992): Étude de développement du gisement zincifère de Chaâbet-El- Hamra, INC, experts-conseils, tome I.

TALBI. A., (1993): Métallogénie des gîtes à Pb-Zn-Ba du Sétifien-Hodna-Aurès. in: *Proceedings of Workshop MVT. Mississippi Valley Type Deposits in Europe and North Africa, comparaisons with North American Deposits, constraints on modeling paleo-circulations*.Thèse. Sc. Univ. Pau. Et des pays de l'Adour. 886p.

TOUAHRI. B., (1983): Le gîte de zinc-plomb d'EI Abed (Wilaya de Tlemcen, Algérie): une minéralisation "sous inconformité" en environnement dolomitique épicontinental; contribution à une recherche des guides de prospection. Thèse de doctorat d'ingénieur. Université de Paris VI.

VILA. J. M., 1977 : Carte géologique de l'Algérie au 1/200000, feuille N° P-Q\_3-4, Constantine avec la notice explicative détaillée. serv. Carte géol. Algérie. SONATRACH

VILA. J. M., (1977): Notices explicatives des cartes géologiques de Sétif, Ain Lahdjar, Aïn-Azel, échelle 1/50.000 et 1/200.000.

VILA. J. M., (1980): La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens, Thèse de Doctorat d'Etat ,Université de Paris VI, p. 663.

WILDI, W., (1983):La chaîne tello-rifaine (Algérie – Maroc -Tunisie), Structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, Vol. 24, Numéro spécial.