

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

N° d'ordre :

Série:

UNIVERSITE CONSTANTINE 1



**FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE, DE LA GEOGRAPHIE ET
DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE
DEPARTEMENT DES SCIENCES GEOLOGIQUES**

THESE

Soutenue pour l'obtention du diplôme de Doctorat ès Sciences

Option : HYDROGEOLOGIE

**ETUDE DE LA VULNERABILITE A LA POLLUTION DE LA
NAPPE ALLUVIONNAIRE D'EL-MILIA (nord-est algérien)**

Présentée par Abdelhafid BOURZAMA

devant le jury:

Président	Nabil CHABOUR	Pr	Université de Constantine 1
Rapporteur	Foued BOUAICHA	MCA	Université de Constantine 1
Examineurs	Abdeslam DEMDOUM	Pr	Université de Sétif 1
	Taha Hocine DEBIECHE	Pr	Université de Jijel
	Abdelhamid KHEDIDJA	Pr	Université de Batna 2
	Abdelaziz LOUAMRI	MCA	Université de Constantine 1

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

N° d'ordre :

Série:

UNIVERSITE CONSTANTINE 1



**FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE, DE LA GEOGRAPHIE ET
DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE
DEPARTEMENT DES SCIENCES GEOLOGIQUES**

THESE

Soutenue pour l'obtention du diplôme de Doctorat ès Sciences

Option : HYDROGEOLOGIE

**ETUDE DE LA VULNERABILITE A LA POLLUTION DE LA
NAPPE ALLUVIONNAIRE D'EL-MILIA (nord-est algérien)**

Présentée par Abdelhafid BOURZAMA

devant le jury:

Président	Nabil CHABOUR	Pr	Université de Constantine 1
Rapporteur	Foued BOUAICHA	MCA	Université de Constantine 1
Examineurs	Abdeslam DEMDOUM	Pr	Université de Sétif 1
	Taha Hocine DEBIECHE	Pr	Université de Jijel
	Abdelhamid KHEDIDJA	Pr	Université de Batna 2
	Abdelaziz LOUAMRI	MCA	Université de Constantine 1

∨ من سورة البقرة TM

بسم الله الرحمن الرحيم

ثم قست قلوبكم من بعد ذلك فهي كالحجارة أو أشد قسوة
و إن من الحجارة لما يتفجر منه الأنهار (système karstique)
و إن منها لما يشقق فيخرج منه الماء (système fracturé)
و إن منها لما يهبط من خشية الله (milieu poreux)
و ما الله بغافل عما تعملون

∨ صدق الله العظيم TM

*à la mémoire de mon père
à celle de ma mère*

Abstract

The most of the Algerian subcoastal regions, especially those in the East of the country, have rugged terrain. The alluvial plain of El-Milia (study area) draining oued El-kébir is encased in "bottom of pan" by reliefs that surround it on all sides and characterized by a particularly humid climate.

In view of the ever-increasing need for groundwater and the overexploitation of the water resources of the surface aquifer contained in El-Milia plain, where intensive agricultural activities in both crops and livestock farming contribute to an already severe pollution of groundwater; these waters, which are subject to industrial pollution, mark the presence of a plant for the production of sanitary ceramics and a tannery and by the recent installation (for a decade) of a colossal steel industry as well as a mega power plant; Faced with all this, the site described is subject to an almost obvious degree of vulnerability, hence the motivated interest in including the present study from a research perspective on the pollution impact on the waters of this free-type aquifer.

To do this, it is first necessary to know the geology of the environment and the lithological nature of the aquifer formations that could be behind the chemical face of the waters and especially particular attention is paid to the dosage of heavy metals in order to arrive at the origin of the undesirable elements that are present in this water; the case in which it would be necessary to circumscribe the areas of vulnerability and the ways in which they are protected.

Keywords : Alluvial plain, El-Milia, Relief, Pollution, Industry.

الملخص

معظم المناطق شبه الساحلية الجزائرية و خاصة تلك الموجودة في شرق البلاد ، لديها تضاريس وعرة . سهل الميلية الغريني (المنطقة محل الدراسة) الذي يصب فيه وادي الكبير هو على شكل "قعر وعاء" بتضاريس تحيط به من جميع الجوانب وتتمتع المنطقة بشكل خاص بمناخ رطب.

نظرا للحاجة المتزايدة للمياه الجوفية والاستغلال المفرط للموارد المائية في طبقة المياه الجوفية والسطحية الموجودة في سهل الميلية ، حيث تساهم الأنشطة الزراعية المكثفة في كل من المحاصيل وتربية الماشية في تلوث شديد بالفعل للمياه الجوفية ؛ هذه المياه ، التي تتعرض للتلوث الصناعي ، تشير إلى وجود مصنع لإنتاج السيراميك الصحي ومدبغة الجلود ومن خلال التركيب الأخير (لمدة عقد من الزمان) لصناعة الصلب الضخمة بالإضافة إلى محطة طاقة كهربائية ضخمة ؛ وفي مواجهة كل هذا، يخضع موقع الدراسة لدرجة شبه واضحة من الضعف، ومن هنا يأتي الاهتمام الدافع بإدراج هذه الدراسة من منظور بحثي بشأن أثر التلوث على مياه طبقة المياه الجوفية الحرة هذه.

للقيام بذلك ، من الضروري أولا معرفة جيولوجيا البيئة والطبيعة الصخرية لتكوينات طبقة المياه الجوفية التي يمكن أن تكون وراء الشحنة الكيميائية للمياه، ويتم إعطاء اهتمام بشكل خاص لجرعة المعادن الثقيلة من أجل الوصول إلى أصل العناصر غير المرغوب فيها الموجودة في هذه المياه؛ الحالة التي ينبغي من الضروري فيها تحديد مناطق الضعف وسبل حمايتها.

الكلمات الدالة : السهل الغريني ، الميلية ، تضاريس ، التلوث ، الصناعة .

Résumé

La plupart des régions subcôtières nord algériennes notamment celles de l'Est du pays disposent de relief accidenté . La plaine alluviale d'El-Milia (terrain d'étude) drainant oued El-Kébir est encaissée en « fond de marmite » par des reliefs qui la ceinturent de toute part et jouissant d'un climat particulièrement humide .

Devant les besoins en eau souterraine sans cesse grandissants et compte tenu de la surexploitation de la ressource hydrique de la nappe superficielle contenue dans la plaine d'El-Milia où les activités agricoles intensives tant en cultures qu'en élevage contribuent à une pollution des eaux de la nappe déjà menacée ; ces eaux sujettes à une pollution industrielle potentielle marquée la présence d'une usine de production de céramique sanitaire ainsi qu'une tannerie mégisserie et par l'installation récente (depuis une décennie) d'une industrie sidérurgique colossale ainsi qu'une méga centrale électrique ; devant tout cela , le site décrit se trouve être soumis à un degré de vulnérabilité quasi évident d'où l'intérêt motivé d'inscrire la présente étude selon une optique de recherche de l'impact pollutionnel sur les eaux de cette nappe de type libre.

Pour ce faire, il est d'abord nécessaire de connaître la géologie du milieu et la nature lithologique des formations aquifères qui pourrait être derrière le faciès chimique des eaux et surtout une attention particulière est accordée au dosage des métaux lourds afin d'aboutir à l'origine des éléments indésirables qui seraient présents dans cette eau ; le cas auquel il faudrait circonscrire les zones de vulnérabilité et discuter leur protection .

Mots clés : plaine alluviale El-Milia , nappe libre , pollution industrielle , tannerie mégisserie, vulnérabilité , impact pollutionnel , métaux lourds , éléments indésirables, protection.

Table de Matières

Introduction Générale	2
Chapitre I : Présentation du secteur d'étude	3
I.1. Situation géographique	3
I.2. Paramètres socio économiques	5
I.2.1. Population	5
I.2.2. Couvert végétal et activité agricole	5
I.2.3. Activités industrielles (historique, inventaire et production).....	5
I.3. Géomorphologie de la zone d'étude.....	6
I.3.1. Délimitation du bassin versant	6
I.3.2. Morphométrie du bassin versant	6
I.3.2.1. Réseau hydrographique.....	6
Chapitre II : Contexte géologique	8
II.1. Géologie régionale	8
Introduction	8
II.1.1. Le domaine Interne.....	8
II.1.1.1. Le socle Kabyle	8
II.1.1.2. La dorsale Kabyle.....	8
II.1.1.3. Le domaine des flyschs	10
II.1.2. Le domaine externe	11
II.1.2.1. Les séries telliennes	11
II.1.2.2. Les séries de l'avant pays.....	12
II.1.3. Cadre tectonique et géodynamique	12
II.2. Géologie Locale	14
II.2.1. Schéma général de la stratigraphie el-milienne	14
II. 2.1.1. Formations du socle kabyle.....	14
II.2.1.2. Formation de la dorsale kabyle	14

II.2.1.3. Domaine médian (formation des flyschs)	17
(a) Le flysch maurétanien	17
(b) Le flysch massylien	19
II. 2.1.4. Les séries des écailles de Moul ed demamene	19
II.2.1.5. La série tellienne	22
II.2.1.6. Les séries stratigraphiques (du lutétien sup. au burdigalien basal)	22
1. Le Nummulithique II	22
2. L'Oligo-Miocene Kabyle (OMK)	22
3. Le Numidien	23
II.2.1.7. Les formations post-nappes.	23
1. Le Miocène marin	23
2. Le Pliocène	23
II.2.1.8 Le Quaternaire	24
II.2.1.9 Les formations éruptives miocènes	24
II.3 Conclusion	24
Chapitre III : Les ressources hydriques	28
III.1 Introduction et présentation de l'hydrologie des cours d'eau :	28
III.2 Hydroclimatologie	30
III.3 Etude des paramètres climatiques	30
III.3.1 Les précipitations atmosphériques	30
III.3.1.1 Les précipitations moyennes mensuelles	31
III.3.1.2 Les précipitations moyennes saisonnières	32
III.3.2 Les températures	33
III.3.2.1 Les températures moyennes mensuelles	33
III.3.2.2 Les écarts et les extrêmes des températures	34
III.3.3. L'humidité relative	34
III.3.4. Les vents	36
III.3.4.1. La vitesse des vents	36
III.3.5 La durée de l'insolation	37
III.3.6 Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gaussens	37
III.3.7. Indice d'aridité de Demartone	38
III.3.8 La méthode d'Euverte	39

III.3.9. L'évapotranspiration potentielle	41
III.3.9.1 Calcul de l'ETP et l'ETR.....	42
III.3.9. Calcul du bilan hydrique selon le concept Thornthwaite:	48
III.4. Conclusion.....	50
Chapitre IV : Contexte hydrogéologique	51
Introduction	51
IV.1 Les composantes des unités hydrogéologiques	51
IV.2 L'outil de prospection	52
IV.2.1 L'apport de l'outil géophysique	53
IV.2.1.1 Examen de la carte des résistivités en ligne AB = 40 m (figure IV. 4.).....	56
IV.2.1.2 Conclusion aux résultats géophysiques.....	64
IV.2.2 Caractéristiques de l'aquifère	64
IV.2.2.1 La porosité de l'aquifère	64
IV.2.2.2 Limites et épaisseurs de l'aquifère.....	65
IV.2.3 La piézométrie	65
IV.2.3.1 Chronique piézométrique	65
IV.3 Conclusion.....	70
Chapitre V : Les Caractéristiques Hydrogéochimiques.....	71
Introduction	71
V.1 Etude des paramètres physico-chimiques.....	75
V.1.1 Etude des paramètres physiques	75
V.1.1.1 La température	75
V.1.1.2. Le potentiel Hydrogène pH	76
V.1.1.3 La conductivité électrique - CE (σ).....	76
V.1.1.4. Dureté et alcalinité des eaux	77
V.1.2. Etude des paramètres chimiques	79
V.1.2.1. Les cations majeurs	79
V.1.2.2 Les anions majeurs	81
V.1.2.3 Les éléments traces métalliques (ETM)	83
V.1.2.4. Résultats des analyses	93
V.1.3. Classification des eaux	95
Classification suivant la méthode de Piper	97

V. 1.4 Conclusion	104
Chapitre six : Impact des éléments indésirables et autres métaux lourds sur les eaux et vulnérabilité de la nappe.....	106
VI.1. Introduction :	106
VI.1.1 Polluants physiques :.....	106
VI.1.2. Polluants chimiques :	106
VI.1.3. Polluants biologiques	106
VI.2. Mode de transfert et d'allègement du polluant en milieu souterrain.	106
VI.2.1 Mécanisme de transport du polluant.....	106
VI.2.1.1 Une zone non saturée	107
VI.2.1.2 Une zone saturée.....	107
VI.3 Rappel et définition :.....	108
VI.3.1 Rappel historique du modèle exécuté	108
VI.3.1.1 Les cartes thématiques de zonation hydrogéologique :.....	110
Conclusion	127
Conclusion générale	128
Références bibliographiques	130
Annexes.....	134

Liste des figures

Figure I.1 Image satellite montrant le site étudié dans son cadre méditerranéen.....	3
Figure I.2 Image satellite de la plaine et les installations industrielles (source Google earth).....	4
Figure I.3 Carte du bassin versant montrant l'hydrographie à El-Milia.(source A.B.H)	7
Figure II.1 l'orogène alpin périméditerranéen et situation de la transversale par M.D-Delga	9
Figure II.2 Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides	9
Figure II.3 Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébides (M.Durand-Delga 1969).	10
Figure II.4 Carte géologique du secteur du bassin versant étudié (M.Durand-Delga 1955).	15
Figure II.5 Coupe synthétique du massif de Moul ed demamène (M.Durand-Delga 1955)	16
Figure II.6 Colonne stratigraphique des flyschs maurétanien série des achaïches, massif (mouled demamene Bouillin 1977).....	18
Figure II.7 Colonne stratigraphique synthétique de la série tellienne de Tissimiran (d'après les données de M.Durand-Delga thèse,1955.)	20
Figure II.8 Carte géologique et schéma simplifié N-S des écaïles inférieures de (Moul ed demamène (J-P Bouillin 1977).....	21
Figure II.9 Coupe géologique Est-Ouest dans le massif de microgranite d'El-Milia	26
Figure II.10 Colonne stratigraphique et hydrogéologique	27
Figure III.1 Précipitations moyennes mensuelles.....	32
Figure III.2 Précipitations moyennes saisonnières	33
Figure III.3 Courbe de variations des températures moyennes mensuelles.....	34
Figure III.4 Humidité moyenne mensuelle en % (2001 – 2021)	35
Figure III.5 Moyenne mensuelle de la vitesse des vents	36
Figure III.6 Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gausson.....	37
Figure III.7 Abaque de Wundt modifié par Coutagne donnant le déficit d'écoulement	45

Figure IV.1 Plan de positionnement des profils des sondages électriques	54
Figure IV.2 Coupes géoélectriques relatives aux profils géophysiques H , J , M et P.....	55
Figure IV.3 Coupes géoélectriques relatives aux profils géophysiques E , F et G.	57
Figure IV.4 Carte des résistivités en ligne AB = 40 m	57
Figure IV.5 Coupes hydrogéologiques AA' et BB'	59
Figure IV.6 Carte du mur des alluvions grossières	61
Figure IV.7 Carte d'isopièzes de l'année de 2001	66
Figure IV. 8 Carte d'isopièzes de l'année de 2011	67
Figure IV.9 Carte piézométrique de l'année 2021	69
Figure V.1 Carte de dispersion des points d'échantillonnage d'eau	74
Figure V.2 Carte d'iso teneur en fer	85
Figure V.3 Carte d'iso teneur en cuivre.....	86
Figure V.4 Carte d'iso teneur en nickel.....	87
Figure V.5 Carte d'iso teneur en cadmium.....	88
Figure V.6 Carte d'iso teneur en zinc.....	89
Figure V.7 Echantillon 1 chromatogramme	91
Figure V.8 Echantillon 2 chromatogramme	92
Figure V.9 Echantillon 3 chromatogramme.....	92
Figure V.10 Echantillon 4 chromatogramme.....	92
Figure V.11 Diagramme de Stabler.....	96
Figure V.12 Diagramme de Piper.....	98
Figure V.13 Droite de regression du couple $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$	99
Figure V.14 Droite de regression du couple $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^+$	100
Figure V.15 Droite de regression du couple $\text{HCO}_3^-, \text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$	101
Figure V.16 Droite de regression du couple Na/Cl.....	102

Figure V.17 Formule caractéristique	103
Figure VI.1 Mécanismes et facteurs de la pollution de l'eau souterraine (Castany,1982).....	107
Figure VI.2 Carte de répartition des valeurs de l'indice de profondeur d'eau dans l'aquifère....	112
Figure VI.3 Carte de répartition des valeurs de l'indice recharge de l'aquifère	114
Figure VI.4 Carte de répartition des valeurs de l'indice lithologie de l'aquifère.....	117
Figure VI.5 Carte de répartition des valeurs de l'indice type de sol	119
Figure VI.6 Carte de répartition des valeurs de l'indice topographique.....	121
Figure VI.7 Carte de répartition des valeurs de l'indice de la zone non saturée.....	123
Figure VI.8 Carte de répartition des valeurs de l'indice de perméabilité	125
Figure VI.9 Carte de la vulnérabilité à la pollution selon la modèle DRASTIC.....	126

Tableau V.5 Coordonnées et piézométrie des points d'eau échantillonnée.....	73
Tableau V.6 Concentrations anionique et cationique des eaux échantillonnées (en mg/l).....	79
Tableau V.7 Récapitulation des paramètres physico-chimiques des eaux échantillonnées (2021) .	82
Tableau V.8 Teneurs en métaux lourds dans les eaux échantillonnées (en mg/l).....	84
Tableau V.9 Normes OMS (mise à jour 2006) et algérienne des teneurs en métaux lourds dans l'eau potable (en mg/l) et µg/l.....	90
Tableau V.10 Listing des produits chimiques utilisés dans la tannerie	90
Tableau V.11 Normes OMS et algérienne des teneurs des métaux lourds dans l'eau potable ...	93
Tableau V.12 Normes OMS et algérienne des valeurs des paramètres physico-chimiques et teneurs en métaux lourds dans l'eau potable en mg/l et µg/l	94
Tableau V.13 Classification des faciès	103
Tableau VI.1 Cotation du paramètre profondeur de l'eau	111
Tableau VI.2 Valeurs de la profondeur de l'eau au niveau de la nappe	111
Tableau VI.3 Cotation du paramètre recharge de l'aquifère.....	113
Tableau VI.4 Cotation du paramètre lithologie de l'aquifère	116
Tableau VI.5 Cotation du paramètre type de sol.....	118
Tableau VI.6 Cotation du paramètre pente de terrain	120
Tableau VI.7 Cotation du paramètre Impact de la zone vadose	122
Tableau VI.8 Cotation du paramètre conductivité électrique	124

Problématique

Initialement, le site de plaine étudiée la zone économique de libre échange a été décrétée et installée sur la plaine alluviale de l'oued El-kébir à hauteur de la ville d'El-Milia et a été baptisée zone franche Bellara d'El-Milia, puis ultérieurement convertie en zone industrielle où il a été créé rapidement une unité de production sidérurgique (Algerian Qatari Steel) entrée en production au cours de l'année 2018. Aussi il a été créé dans cette zone industrielle une importante centrale électrique (Hyundai) qui devra être cédée dans les années à venir à la société nationale Sonelgaz. Ces deux entreprises étant installées sur la rive gauche de l'oued El-kébir, il existe sur la rive droite une entreprise nationale de production de la céramique sanitaire ainsi qu'une tannerie mégisserie plus à l'aval produisant du cuir fini à partir des peaux animales brutes; ajouté à ces industries, notons la présence d'une agriculture paysanne représentée par l'élevage de la volaille et des bovins ainsi que quelques vergers d'agrumes. Toutes ces activités industrielles et agricoles sus-citées sont installées sur la plaine alluviale et il va de soi que les rejets des effluents sont déversés à même l'oued el-kébir drainé par la nappe phréatique qui s'y trouve dans la plaine alluvionnaire constituant l'assiette de cette zone industrielle.

A partir des données hydrologiques et climatiques, de la géologie du bassin versant dans sa globalité, on essaiera de comprendre les mécanismes de circulation des eaux souterraines dans ce milieu, de déterminer l'existence d'aquifère tant du point de vue extension et puissance avec l'apport de l'outil géophysique que du point de vue qualitatif chimique avec pour objectif de déterminer les origines et les interactions écoulement superficiel et aquifère en relation avec les différents faciès chimiques en différents points de la nappe sous le regard des normes de potabilité algérienne et de celle de l'Organisation Mondiale de la Santé. Dès lors que des carences de pollutions sont suspectées, élaborer un test statistique par un modèle approprié pour les circonscrire et établir un plan pour parer à ces menaces de pollutions.

Introduction Générale

D'un point de vue de recherche cette étude pourrait constituer un test sur la qualité des eaux souterraines contenues dans cette plaine alluviale avec pour objectif si elles seraient polluées ou contaminées par des éléments minéraux néfastes rejetés dans les effluents des unités industrielles installées sur cette plaine qui abritait initialement une zone franche destinée aux échanges économiques puis vite transformée en zone industrielle installée sur la rive gauche de l'oued el kébir en sus d'un certain nombre d'exploitations agricoles en rive droite de l'oued , produisant essentiellement des agrumes et également de l'élevage bovin et aviaire et enfin la présence aussi d'une unité de traitement industriel de peaux animales jusqu'à la transformation du cuir fini ainsi qu'une unité de production de la céramique sanitaire.

D'un point de vue pédagogique, la présente étude pourrait être une contribution à une approche à ces aspects de recherche et d'évaluation des contaminations et des pollutions des eaux souterraines en milieu poreux.

Le volume de cette thèse s'articule sur six chapitres . Naturellement la localisation du terrain d'étude contenant la plaine intéressante dans son contexte physiographique, la nature industrielle et l'activité socio-économique qui y sont pratiquées sont présentées en premier chapitre . Le second chapitre décrit le contenant géologique aquifère des eaux souterraines de cette plaine alluviale ainsi que la géologie générale du bassin versant du site étudié et sa géologie locale pour conclure avec une colonne stratigraphique et hydrogéologique . Le troisième chapitre est réservé au contexte hydroclimatologique pour situer le type de climat de la région et établir une approche du bilan hydrique .

Le quatrième chapitre présente des données piézométriques comparatives distantes de deux décennies et avec l'appui de quelques données géophysiques , schématiser la géométrie de l'aquifère. Un cinquième chapitre a été consacré à la caractérisation physicochimique des eaux contenues dans la plaine et éventuellement déceler et repérer la position des faciès de cette ressource d'eau qui sortiraient des seuils de tolérance et de l'habituel notamment en métaux lourds et cela à travers l'établissement cartographie hydrochimique de la nappe.

A travers le sixième chapitre et par le moyen d'un traitement statistique reposant sur la cartographie hydrochimique élaborée on ressort une carte de risque ou de vulnérabilité devant la menace des eaux de cette nappe par le test de la méthode DRASTIC pour suggérer une perspective de protection de la ressource d'eau.

Chapitre I : Présentation du secteur d'étude

I.1. Situation géographique

Selon ses aspects géographique, géomorphologique et géologique, le secteur objet de la présente étude appartient au Nord Constantinois dans l'Est algérien non loin de la rive sud méditerranéenne, au pied de la ville d'El-Milia.



Figure I.1 Image satellite montrant le site étudié dans son cadre méditerranéen.

Sa latitude Y se situe entre les parallèles $36^{\circ} 43'N$ et $36^{\circ} 46'N$ et sa longitude X entre les méridiens $6^{\circ} 14'E$ et $6^{\circ} 16'E$ ou encore en coordonnées UTM entre la latitude 248 180 et 262 720 et la longitude 406 402 et 407 772 tandis que l'altitude Z de ce secteur s'élève à 35 mètres au-dessus du niveau de la mer et constituant une plaine alluviale de forme irrégulière plus ou moins triangulaire dont la pointe du triangle est dirigée vers le Sud. Orographiquement, le bassin versant de cette plaine est ceinturé par des reliefs tout autour faisant de la plaine un «fond de casserole». Les reliefs dominant cette plaine étant djebel Tanefdour et djebel Tasselet par le Nord, à l'Est djebel Benkara et ouled Salah et Sahridj et à l'Ouest par chouf et oued Adder.



Figure I.2 Image satellite montrant la plaine alluviale drainée par oued El-Kébir avec les installations industrielles (source Google earth).

La plaine constituant le terrain d'étude de type alluviale drainant l'oued El-Kébir à hauteur d'El-Milia avait une vocation agricole spécialisée en productions de légumes et d'agrumes durant l'occupation coloniale puis vouée initialement en une zone franche pour échanges économiques internationaux ensuite sa vocation a basculé en zone industrielle abritant aujourd'hui une grosse usine de fabrication sidérurgique (Algerian Qatari Steel) ainsi qu' une méga centrale électrique (Hyundai) en rive gauche de l'oued El-Kébir en plus d'une tannerie mégisserie pour le traitement des peaux animales jusque le cuir fini et une usine de fabrication de la céramique sanitaire en rive droite de cet oued.

I.2. Paramètres socio économiques

I.2.1. Population

Le paramètre population restant toujours important sous tous ses aspects : démographique ,mode de vie , culture , du fait qu'il soit lié de façon intrinsèque à la consommation en eau pour le cas de l'étude hydrogéologique El-Milia étant une ville effectivement importante et s'alimentant de cette seule nappe aquifère abritée par la nappe alluviale objet de cette étude . La vocation sociale de départ de cette communauté étant naturellement l'agriculture et l'élevage puis l'industrialisation installée progressivement dans le secteur a vite muté les besoins eu eau et commence désormais à effrayer voire même menacer la qualité des eaux.

I.2.2. Couvert végétal et activité agricole

Du fait de la pluviosité abondante de secteur de la petite Kabylie d'El-Milia et Collo jouissant d'un microclimat permettant la prolifération et le développement d'un couvert végétal dense et varié d'où l'intérêt de l'interaction sol-plante-atmosphère générant l'évapotranspiration de l'ambiance végétalo-atmosphérique. Cette évapotranspiration est la synthèse des paramètres climatiques tels que la température, l'insolation, la vitesse des vents et elle demeure une composante indispensable du bilan d'eau et se trouve être à la fois la cause et la conséquence du climat . Le bassin versant est quasi-totalement couvert de maquis , d'oliviers de manière permanente et par une variété de végétation sauvage telle que buissons, arbuste et autre végétation forestière telle que chêne liège, zen ,...

I.2.3. Activités industrielles (historique, inventaire et production)

La plaine objet de cette étude de type alluviale drainant l'oued el-kébir à hauteur d'El-Milia avait une vocation agricole spécialisée en productions de légumes et d'agrumes durant l'occupation coloniale puis vouée initialement en une zone franche pour échanges économiques internationaux ensuite elle a basculé en zone industrielle abritant aujourd'hui une grosse usine de fabrication sidérurgique , une méga centrale de production électrique (Hyundai) , une tannerie mégisserie pour le traitement des peaux animales jusque le cuir fini et une usine de fabrication de la céramique sanitaire .

I.3. Géomorphologie de la zone d'étude

I.3.1. Délimitation du bassin versant

L'influence des caractères physiques et morphologiques du bassin versant est évidente sur l'écoulement et le ruissellement de part sa nature, sa forme et son extension, d'où la forme du bassin versant arrondie ; sa superficie, le relief abrupt et les pentes influent sur le ruissellement superficiel et sur l'infiltration en combinaison avec d'autres facteurs parmi lesquels la nature des roches encaissantes.

I.3.2. Morphométrie du bassin versant

I.3.2.1. Réseau hydrographique

Hydrographiquement la plaine est drainée sur toute sa longueur par oued El-Kébir qui conflue au Nord avec oued Bou-Siaba et se détache de ces reliefs au Nord-Ouest pour partir se jeter dans la mer après une course d'environ 7 kilomètres. Autour de l'oued El-Kébir et son confluent Bou-Siaba s'organise un chevelu d'écoulements fluviaux naturels dense entre petits oueds et chaabats du fait de la nature orographique accidentée et de la pente accentuée des reliefs encaissant la plaine alluviale de l'oued El-Kébir.

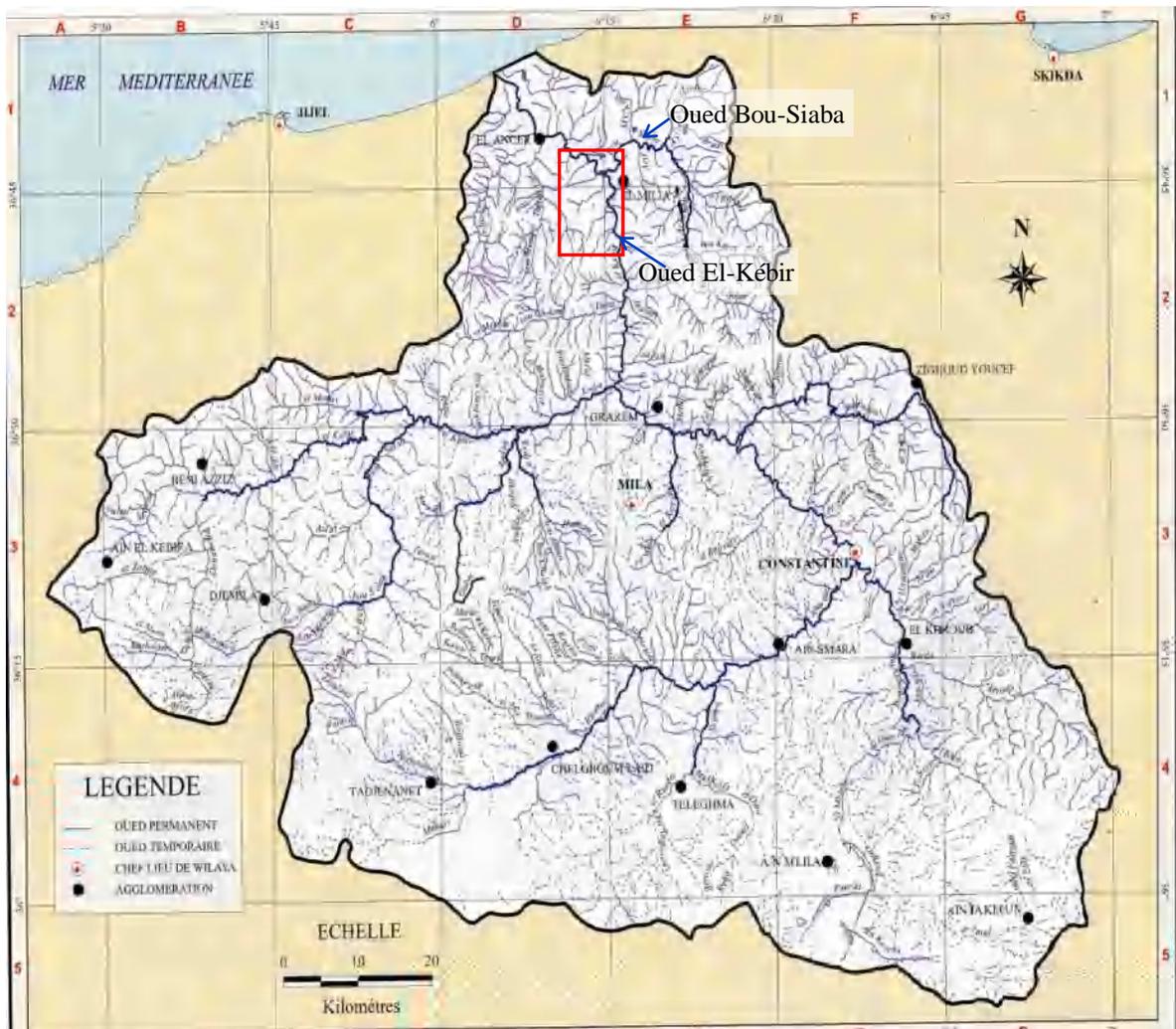


Figure I.2 Carte du bassin versant comprenant le réseau hydrographique de la plaine d'El-Milia.(source A.B.H)

Chapitre II : Contexte géologique

II.1. Géologie régionale

Introduction

La chaîne des Maghrébides (Figure II.1), s'étend sur près de 2000 km de l'arc de Gibraltar à l'arc Calabrais. Elle comprend d'Ouest en Est, l'arc orogénique Bético-Rifain, le Tell Algéro-Tunisien et se poursuit plus à l'Est jusqu'aux Apennins en formant l'arc Calabro-Sicilien (Durand-delga 1955, Bouillin1977, Durand-delga et Fontboté, 1980). En Algérie par exemple, cette chaîne est composée de l'atlas tellien, des hauts plateaux et de l'atlas saharien. Le système tellien est composé du nord au sud par les trois domaines que sont : le domaine interne représenté par les kabyliques (grande et petite Kabylie) , le domaine des flyschs et le domaine externe. Notre secteur d'étude appartenant à la petite Kabylie présente un vaste domaine constitué dans sa majeure partie de roches métamorphiques formant le socle kabyle, dorsale kabyle et flyschs. Les études anciennes menées sur cette région citées notamment par Vila 1980, tel que (Durand-delga 1955, Wildi 1983, Roubault 1934, Joleaud 1912, Raoult 1974, Deleau 1934, Ehrman 1928, Hilly 1952 et 1957, Kieken 1962). D'après Durand-Delga 1955 l'Algérie septentrionale est subdivisée en trois domaines: interne, médian (Flyschs) et externe (Figure II.2).

II.1.1. Le domaine Interne

II.1.1.1. Le socle Kabyle

C'est un ensemble cristallophyllien composé à sa base par de roches gneissiques avec des intercalations parfois de marbre et de roches ultrabasiques. Des pointements granitiques indiquant un volcanisme acide (Bouillin, 1979) dans la région de Jijel (Ehrman, 1928) Collo (Roubault 1934, Bouillin 1977) Filfila (Raoult 1974, Hilly 1952 et 1957) et Cap de fer à Annaba (Hilly 1952 et 1957) indiquant un magmatisme.

La partie supérieure du socle comporte des schistes satinés ou phyllades, des grés et des porphyroïdes œillés (Bouillin 1977 et Raoult 1974)

II.1.1.2. La dorsale Kabyle

Sur sa partie méridionale se trouve la dorsale kabyle ou chaîne calcaire (Glangeau 1933), Flandrin (1952) qui rappelle qu'elle est la couverture normale des terrains paléozoïques, très peu ou pas métamorphisés, surmontant un substratum métamorphique plus profond. Elle

affleure dans les environs de la grande Kabylie (Djurdjura) au centre et à djebel Sidi driss limitrophe de secteur étudié à l'Est . Nous citons parmi les travaux anciens sur la petite Kabylie les travaux de (Deleau 1938) sous l'angle stratigraphique ; Durand-Delga 1955, 1969, analyse de la chaine calcaire repris par Vila 1966, 1969, 1971, 1980 et Raoult 1974). La chaine calcaire ne comporte pas de couverture mésozoïque (Roubault,1952 et Durand-Delga,1955)

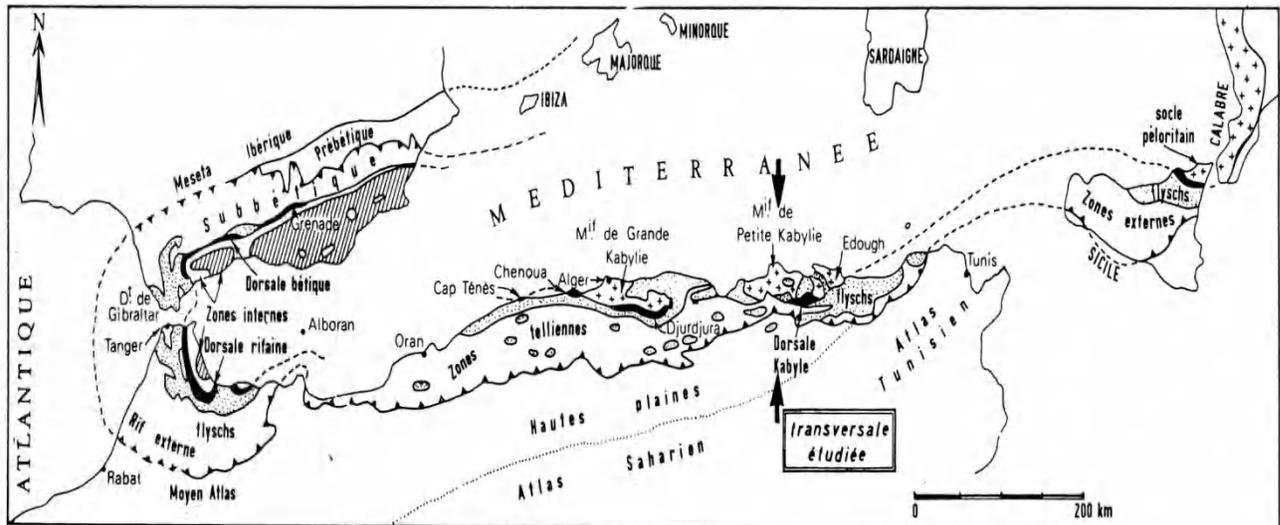


Figure II.1 : l'orogène alpin périméditerranéen et situation de la transversale établie par M.Durand-Delga (1969).

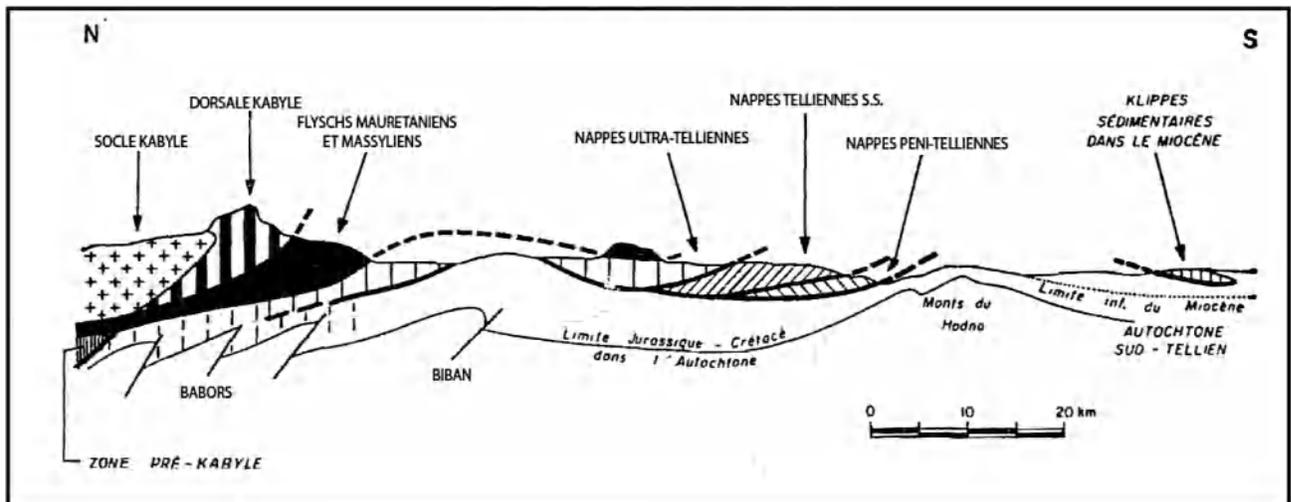


Figure II.2 Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (modifiés d'après M.Durand-Delga(1969), les Bibans et les Babors étaient considérés comme autochtones des nappes telliennes)

I.1.1.3. Le domaine des flyschs

Il 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. (Bouillin 1977, Durand-Delga 1969, Wildi 1983) Ces flyschs se présentent de trois manières (Figure II.2) :

(a) en position interne, superposés aux massifs kabyles, c'est-à-dire rétrocharriés sur les zones internes et appelés flyschs nord kabyles (Gélard 1969) ;

(b) en position relativement externe à la bordure sud de la dorsale kabyle (flyschs sud kabyle) (Raoult 1969).

(c) et enfin en position très externe, sous forme de masses isolées flottantes sur le tell et charriées jusqu'à une centaine de kilomètres au sud. On distingue du Nord au Sud deux grands groupes de flyschs: les flyschs maurétaniens et les flyschs massyliens auxquels s'ajoute un troisième groupe de flyschs plus récent, les flyschs numidiens d'âge Oligocène supérieur – Burdigalien inférieur.

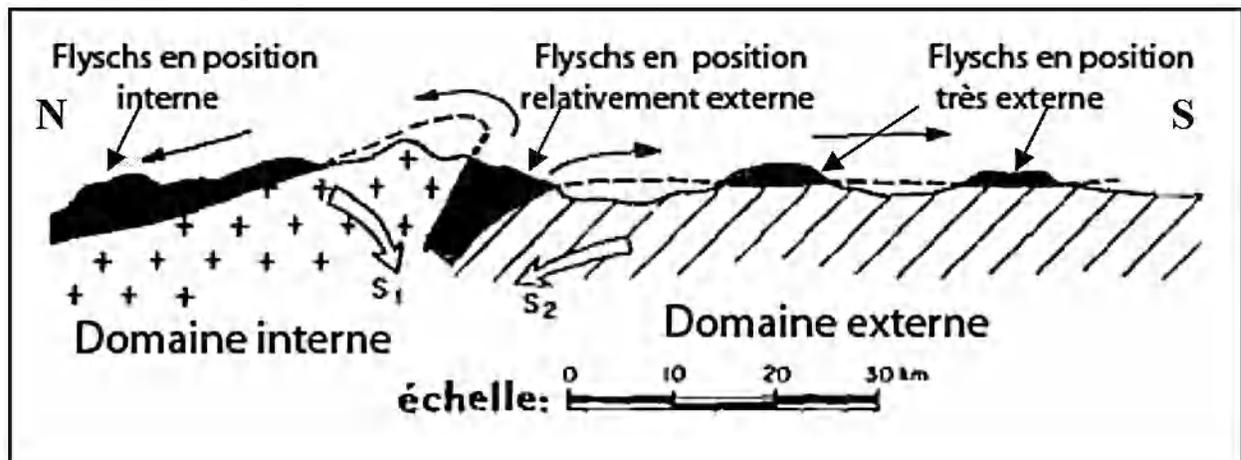


Figure II.3 Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébides (Durand-Delga 1969).

1. Les flyschs maurétaniens : sont relativement épais et occupent une position interne dans le domaine des flyschs. Ils sont composés d'alternances de bancs argileux, calcaires et gréseux. La série débute par des radiolarites rouges du Dogger-Malm et se termine par des niveaux conglomératiques du paléocène.(Durand-Delga 1969, Gélard 1969)

2. Les flyschs massyliens : occupent une position externe dans le domaine des flyschs et comportent une série péliito-quartzitique d'âge Crétacé inférieur surmontée par une série péliito-microbréchiqque d'âge Crétacé supérieur.(Durand-Delga 1969, Raoult 1972)

3. Les flyschs numidiens : constitués de niveaux gréseux d'âge Oligocène terminal–Aquitaniien épais de plusieurs centaines de mètres qui reposent sur des argilites versicolores oligocènes. Ces flyschs reposent anormalement à la fois sur les zones internes et sur les zones externes.(Durand-Delga 1955 et 1969, Vila, 1980)

I.1.2. Le domaine externe

Le domaine externe représente la marge téthysienne du continent africain, on peut distinguer deux grands types de séries:

- Les series telliennes
- Les séries de l'avant pays

I.1.2.1. Les séries telliennes

En Algérie orientale et aux confins algéro-tunisiens, les séries telliennes ont été découpées par les phases tectoniques tertiaires en trois grandes entités, dont les limites suivent à peu près les lignes paléogéographiques du Crétacé, du Paléocène et de l'Éocène. Ce sont du Nord vers le Sud comme suit (Wildi 1983 , Vila 1980) :

- Les unités ultra-telliennes dont les formations typiques du Crétacé inférieur et sont constituées par des marno-calcaires clairs.
- Les unités telliennes sensu-stricto, avec un Crétacé inférieur plus ou moins riche en dépôts terrigènes où les enchevêtrements de faciès néritiques restent modérés du Crétacé supérieur à l'Éocène.
- Les unités péni-telliennes et les unités méridionales à nummulites, à faciès néritique prépondérant du Crétacé supérieur à l'Éocène. Ces dernières séries montrent de grandes affinités

avec celles de leurs avant-pays méridionaux, les unités sud-sétifiennes et l'unité néritique constantinoise.

I.1.2.2. Les séries de l'avant pays

La chaîne des Maghrébides est bordée au sud par des avant-pays de nature et de comportement tectonique variables d'après Durand-Delga (1969), Vila (1980), Chadi (1991) et Coiffait (1992) et Joleau (1912). On peut considérer successivement d'Est en Ouest les unités et domaines suivants :

- Unité néritique constantinoise
- Unités sud- sétifiennes Savornin
- Unités des Sellaoua
- Le para autochtone nord-aurésien
- L'autochtone nord-aurésien

I.13. Cadre tectonique et géodynamique

La structure actuelle des Maghrébides débute au Crétacé par une première étape caractérisée par l'affrontement des deux plaques africaine et européenne qui est le produit de plusieurs épisodes de coulissage sénestre conduisant à leur collision et la disparition progressive de l'océan tethysien.

Cette collision s'intensifie au Crétacé supérieur (Dewey *et al.*, 1973 ; Taponnier, 1977). Aussi il faut signaler qu'au Tithonien-Néocomien il y a eu individualisation du sillon des flyschs mauritanien et massylien entre la microplaque Alboran (massifs internes actuels) et l'Afrique du Nord. (Durand-Delga 1969 et 1980 ; Durand-Delga et Fontboté, 1980).

Une deuxième étape divisée en deux phases tectoniques successives détruit le dispositif paléogéographique mésozoïque mis en place par la première étape pour aboutir à la chaîne actuelle. Durant l'Éocène la convergence est principalement accommodée par les Pyrénées, déformation qui cessera à la fin de l'Oligocène (25 M.A). Pendant ce temps-là la chaîne des Atlas est soulevée durant une première phase tectonique à l'Éocène moyen-Aquitainien et à la fin de l'Oligocène un prisme d'accrétion (formée des unités de Flyschs) se développe entre les Kabylies et la marge africaine.

La phase fini-lutétienne est une phase tectonique majeure entraînant le chevauchement de l'ensemble socle et couverture sur les flyschs mauritaniens et le début du chevauchement de cet ensemble vers les zones externes (Raoult 1974). Il reste à remarquer que cette phase

correspond à au début de la collision du « microcontinent des zones internes » avec les masses continentales africaine et européenne « sous-plaque ibérique » et la formation d'un arc de Gibraltar embryonnaire (Paquet, 1974).

Les kabyliques sont totalement accrétés à la plaque africaine vers le Sud au tortonien (vers 16 Ma) au moment où se termine l'ouverture du bassin algéro-provençal. C'est à cette période que de grands mouvements décrochant entraînent le bloc Alboran vers l'Ouest et la Calabre vers l'Est.

La phase Oligo-miocène est une importante phase de serrage qui se termine à l'Aquitaniens. Elle est caractérisée par le chevauchement de l'ensemble des zones internes sur le domaine tellien, tandis que la nappe numidienne se superpose aux olistostromes par glissement gravitaire vers le Nord. Cette période de compression se succède par un épisode de relaxation (Suzzoni *et al.*, 1992) avec formation de bassins discordants où s'est mise en place une sédimentation burdigalienne et langhienne.

Enfin, il faut signaler une tectonique plio-quadernaire compressive qui se manifeste de nouveau marquée par une sismicité traduisant le rapprochement des deux plaques africaine et eurasiatique et par des plissements à grand rayon de courbure suivie de fracturations de direction E-W et NE – SW. Cette phase a un rôle très important dans l'apparition des intrusions magmatiques comme le cas des Iles Habiba en Algérie et l'île de la Galite en Tunisie.

II.2. Géologie Locale

II.2.1. Schéma général de la stratigraphie el-milienne

Le bassin versant étudié d'El-Milia est limité par le socle dans sa partie nord et le début du domaine externe au Sud, une zone connue par un serrage tectonique des chaînes de montagnes, un relief accidenté et des faciès très diversifiés où on note la présence des formations suivantes :

II. 2.1.1. Formations du socle kabyle

Dans la région d'El-Milia les formations du socle kabyle constituent une unité charriée sur des terrains mésozoïques et cénozoïques par l'intermédiaire d'une zone broyée et minéralisée dont l'épaisseur dépasse 50 mètres et parfois ils sont séparés par des failles tardives subverticales. La limite Sud du socle apparaît dans la ville d'El Milia, elle a une direction Est-Ouest, et qui chevauche au Sud directement les flyschs (Durand-Delga,1955). Ces formations correspondent à de vastes terrains métamorphiques. Pour l'essentiel, un ensemble de gneiss surmonté par des schistes « satinés » ou phyllades qui traduisent un métamorphisme de basse pression déterminant une zone inférieure à biotite et une zone supérieure à chlorite. Ce métamorphisme s'associant à des effets mécaniques se trouve néanmoins certainement très faible. Il est apparu antérieurement au silurien contenant des graptolites qui présente une légère schistosité (Durand-Delga 1955, Raoult 1974, Vila 1980) (Figures II.5 et II.6)

II.2.1.2. Formation de la dorsale kabyle

Elle vient en couverture méridionale du socle kabyle. Elle comporterait des formations depuis le permo-trias jusqu'au Lutétien englobant les fractions interne, médiane et externe. Les formations de la dorsale n'affleurent pas dans la région étudiée (Durand-Delga 1955, Raoult 1969, Vila 1980, Bouillin 1977)

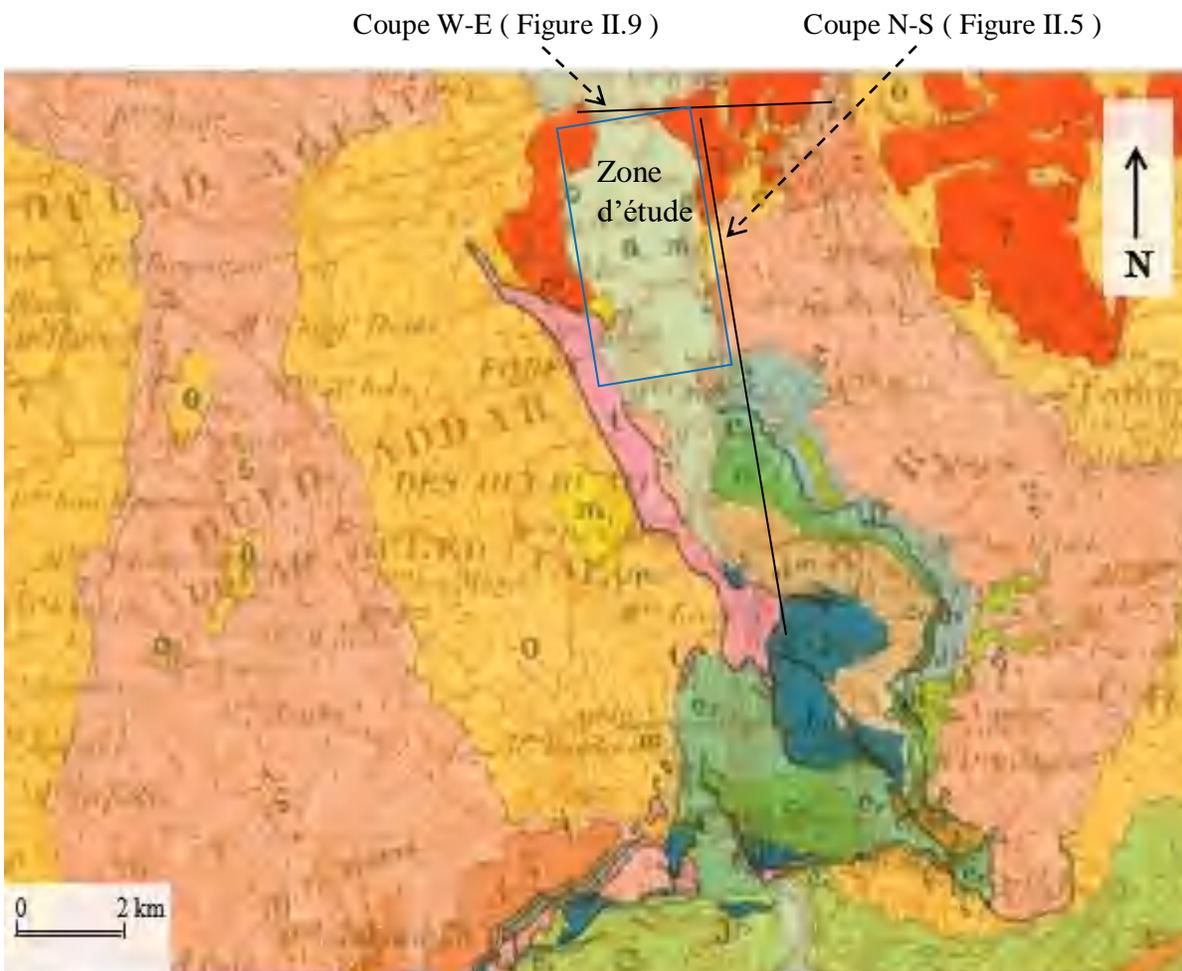


Figure II.4 Carte géologique du secteur du bassin versant étudié (Durand-Delga 1955).

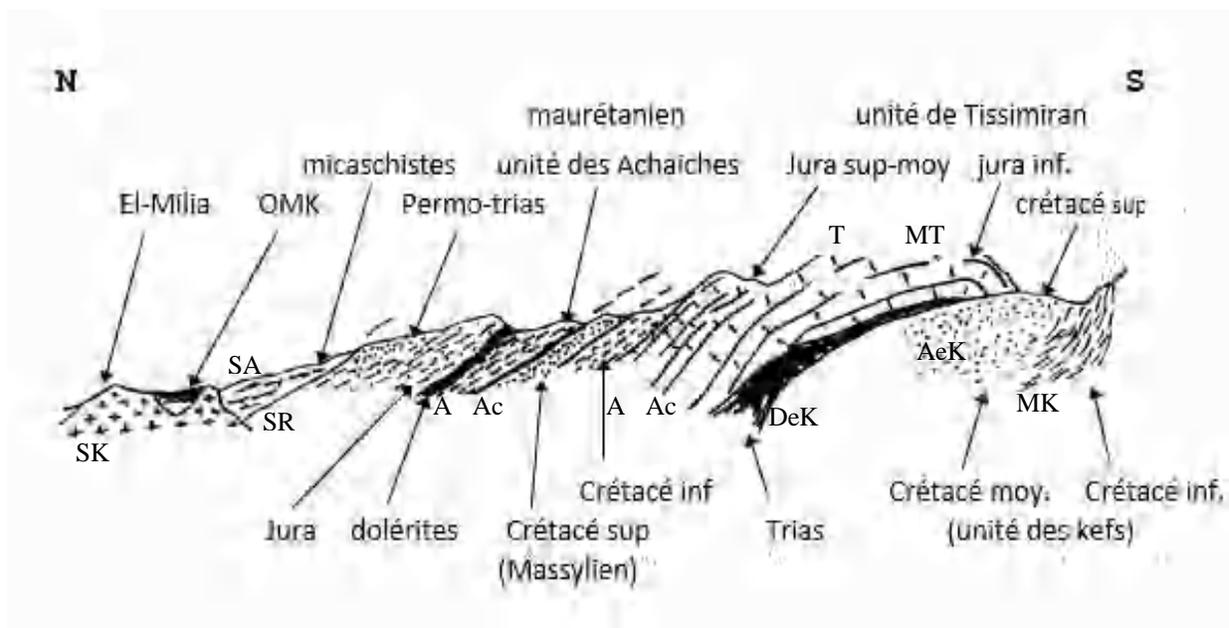


Figure II.5 Coupe synthétique du massif de Moul ed demamène (Durand-Delga 1955)

SK: socle kabyle

Unités maurétaniennes épimétamorphiques :

SA: unité de sidi Ahmed (paléozoïque + trias); série inverse .

SR: unité de S idi Rahiat (malm à Éocène); série normale .

A: unité des Achaïches At: Trias à Tithonique; Ar: radiolarites du Malm

Ac: flysch du crétacé inférieur (série de Boukhedèche)

Écailles inférieures : écaille de Drâa El Kasba :

DeK: série de Drâa El Kasba: trias à tithonique (?); origine tellienne?

MDeK: petit copeau de flysch massylien surmontant la série de Drâa el kasba

Écaille de Tissimiran:

t:série de tissimiran (tellien);Tl:lias ; Tj: dogger et malm, avec Tr: niveau de radiolarites verdâtres; Tn: néocomien- barrémien, avec localement des conglomérats de base; Ts: crétacé supérieur

MT: flysch massylien surmontant tectoniquement la série de tissimiran .

e: petit affleurement d'Éocène du Kef hjer Barka

Écaille des Kefs :

K: série des kefs (tellien); Ki: Lias; Kn: néocomien- barrémien;

Ks: sénonien

AeK: unité de flysch d'Ark el bir

MK: flysch massylien superposé tectoniquement à la série des Kefs .

II.2.1.3. Domaine médian (formation des flyschs)

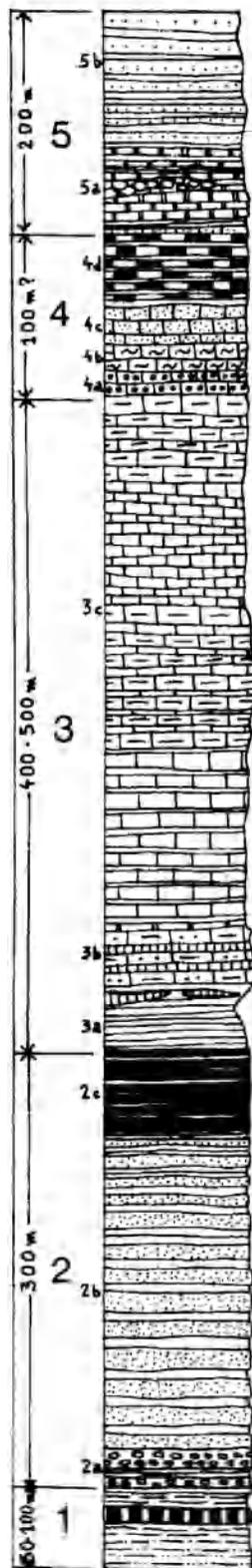
(a) Le flysch maurétanien

Il est subdivisé en trois parties : interne médiane et externe.

La partie interne nommée série de Sidi Ahmed et Sidi Rhiat et s'étend du paléozoïque et permotrias au crétacé supérieur avec l'absence du Jurassique, elle est composée d'argiles à la base, gréseuse à l'albo-aptien et marno-calcaire au sommet. Cette partie apparait au Sud du socle.

Dans la partie médiane il s'agit des formations épimétamorphiques de l'écaïlle des Achaïches (Massif de Moul ed Demamene) au Sud du bassin versant c'est la série la plus complète qui commence du paléozoïque Silurien-Carbonifère jusqu'au Crétacé inférieur (Figure 6) elle débute par des schistes gris noirs à la base et se termine par des pélites au sommet (Durand-Delga 1969, Bouillin 1977)

La partie externe affleure au Nord-Est dans la région de Tamalous.



5- Crétacé inférieur. 5b : grès fins en bancs métriques et pélites verdâtres (faciès du Barrémien-Albien inférieur des flyschs maurétaniens) ; 5a : schistes bleutés ou verdâtres et petits lits de calcaires fins à Calpionelles (dont des associations du Berriasien basal) ; dans ces calcaires s'intercalent des coulées de laves en coussins.

4- Lias supérieur (?) - Dogger-- Malm. 4d : radiolarites rouges ; 4c : calcaires microbréchiques à *Aptychus* et débris de micrite à *Saccocomidae* ; 4b : calcaire à "filaments" (Dogger ?) ; 4a : calcaires oolithiques.

3- Lias. 3c : calcaires fins en petits bancs, calcaires marneux et barres de calcaires à silex ; 3b : calcaires microbréchiques, légèrement sableux, à Entroques et lits de silex ; 3a : schistes gris, admettant des intercalations calcaires à leur sommet (Rhétien ?).

2- (Permo-Trias) et Trias. 2c : jaspes rouges et blancs à Radiolaires, en lits centimétriques ; 2b : schistes rouge-violacé alternant avec des bancs décimétriques à métriques de grès rouges (parfois blancs) ; 2a : conglomérats violacés à galets de quartz centimétriques ; schistes violacés et minces niveaux dolomitiques jaunâtres.

1- Paléozoïque. schistes gris-noir à intercalations de lydienes ; schistes gris-jaune à grains de quartz et muscovite (Silurien et Carbonifère ?).

Figure II.6 colonne stratigraphique des flyschs maurétanien série des achaïches, massif (moul ed demamene , Bouillin 1977)

(b) Le flysch massylien

Il affleure dans une bande au Sud du massif de Moul Ed Demamene, composé essentiellement de grès, de niveaux calcaires et de microbrèches d'âge Albo-aptien (Durand-Delga 1969, Bouillin 1977).

II. 2.1.4. Les séries des écailles de Moul ed demamene

Elles prennent le terme « prékabyle » d'après Durand-Delga (1967),c'est un ensemble d'unités situées sous l'écaille des Achaïches (Figure 7), trois écailles se distinguent: l'écaille de Dra El Kasba Tissimiran, l'écaille des Kefs et l'écaille d'El Akbia. Il s'agit de roches calcaires jurassiques noyées dans des flyschs albo-aptiennes (Durand-Delga 1967).

9- **Sénonien**. Marnes et petits bancs indurés à *Globotruncana*. Un seul affleurement mis en évidence (en bordure de la route El-Milia-Cne).

8- **Aptien - Albien (?)** : pélites à bélemnites et petits niveaux gréseux.

7- **Barrémien - Néocomien**. Marnes et marne-calcaires à *Ammonites* pyriteuses : à la base, les bancs calcaires contiennent des *Calymènes*. Le Barrémien inférieur ne paraît pas être représenté. A la base du Néocomien, ou du Barrémien, on note, en plusieurs endroits, des niveaux à galets calcaires ou à conglomérats.

6- **Malm**. Au sommet : calcaire massif à *aptychites* et *Saccocómidae* (Kimmeridgien) surmontant des radiolarites jaunes, vertes ou rouges ; à la base : calcaires lités à cassure claire et à silex (*malm arifereux*).

5- **Lias supérieur - Dogger** : au sommet : calcaires oolithiques compactes à patine blanche et passées de radiolarites jaunâtres ; à la base : marnes gréseuses et micacées, avec des lits calcaires à « filaments » et un niveau à *Trocholina cf. elongata* (?).

4- **Domérien** : calcaires à interlits marneux ; les marnes prédominent au sommet et les calcaires contiennent des silex à la base. Faune d'*Ammonites* pyriteuses assez abondantes.

3- **Pliensbachien** : calcaire à silex.

2- **Sinemurien (?) - Lotharingien**. Sommet : calcaires à encrinés, *Pectinides* et *Brachiopodes* du lotharingien ; base : calcaires en gros bancs, à patine claire, avec quelques brachiopodes.

1- **Lias basal** : Dolomies massives.

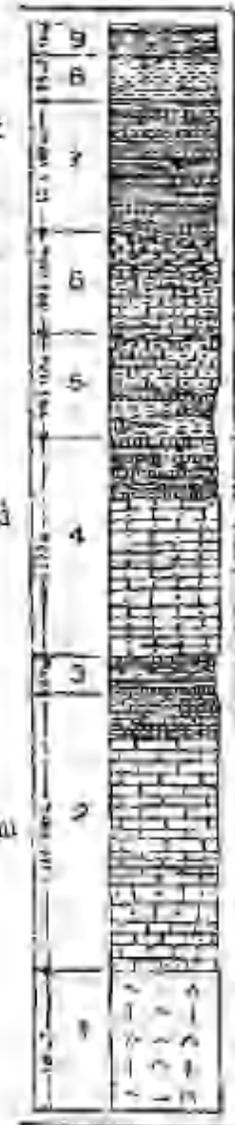


Figure II.7 Colonne stratigraphique synthétique de la série tellienne de Tissimiran (d'après les données de Durand-Delga thèse,1955.)



Figure II.8 Carte géologique et schéma simplifié Nord-Sud des écaïlles inférieures de Moul ed demamene (Bouillin 1977).

II.2.1.5. La série tellienne

Elle est représentée par un faciès à dominance marno-calcaire, elle débute au Lias et s'étale jusqu'au Sénonien, elle constitue le compartiment Nord-Inférieur du massif de Moul ed demamene dans le Sud du bassin versant au Nord-Est d'El-Milia elle est comprise entre les intrusions granitiques du socle dans le compartiment Nord-Supérieur, dans cette zone elle est recouverte parfois par le miocène post-nappe, ces terrains ont subi un métamorphisme de contact sur une largeur très variable (Durand-Delga 1969, Bouillin 1977).

Le Trias :

Il s'agit du type tellien, constitué d'argiles gypseuses, des dolomies, cargneules riches en ophites; il délimite les accidents tectoniques et est visible au Sud du massif de Moul ed demamene et à l'Ouest de oued el-kébir (Durand-Delga 1969).

II.2.1.6. Les séries stratigraphiques (du lutétien sup. au burdigalien basal)

1. Le Nummulithique II

D'après Raoult (1969), toutes les formations constituant la couverture stratigraphique de la chaîne calcaire et des flyschs maurétaniens du Lutétien terminal à l'Oligocène supérieur essentiellement représenté par un flysch à microbrèches rousses calcareuses en bancs peu épais, à matériel fin et bien classé du moins à El-Milia et également un flysch grés-micacé en raison de sa composante gréseuse grossière assez fortement feldspathique en alternance avec des niveaux plus fins, micacés avec des figures de courant à leur base. Ces formations se localisent dans la région de Bordj Ali et le chaînon d'El karn en dehors de notre secteur d'étude (Bouillin 1977).

2. L'Oligo-Miocène Kabyle (OMK)

Il constitue la série de couvertures du socle kabyle (Oligocène-Aquitainien basal) de façon transgressive et discordante sur le socle Kabyle (Bouillin1977, Raoult 1974). C'est une formation détritique comprenant à sa base un terme conglomératique discordant sur le socle kabyle, un terme médian sous forme de lithiques micacés et un troisième terme supérieur pélitique et siliceux à radiolaires et diatomées dites silexites qui jouissent d'ailleurs d'une extension considérable au début du miocène à la limite supérieure de l'OMK (Raoult 1974, Bouillin 1977). Généralement l'OMK est recouvert par des olistostromes à débris et lambeaux

de flyschs variés. Ces affleurements apparaissent au Nord d'El-Milia à Oued Zhou et dans la région de Ain Kechra, Bin El Ouidene et Tamalous à l'Est. Les olistostromes (dépôts marins de composant allogène) reposent sur l'OMK dans le compartiment structural Nord-supérieur. Ces formations tectono-sédimentaires sont constituées de flyschs maurétaniens et massyliens (Bouillin 1977)

3. Le Numidien

Venant sur le flysch maurétanien, il est subdivisé en trois termes et débute par des argiles sous-numidiennes versicolores de teinte verte, rouge et violacée renfermant essentiellement des tubotomaculum et pouvant aller jusqu'à 50 mètres d'épaisseur.

Les passées vertes, argileuses bien entendu, qu'on signale classiquement, au niveau de cette formation sont rares. On a ensuite des grès grossiers blancs, jaunâtres parfois à dragées de quartz et le troisième terme constitué par des argiles à intercalations de silexites. L'âge de la série serait de l'oligocène à burdigalien inférieur ; l'épaisseur de la série pourrait atteindre 400 m. il affleure sur les deux rives de oued Bou-siaba et au Sud de Bordj Ali où il repose sur les flyschs maurétaniens.

II.2.1.7. Les formations post-nappes.

1. Le Miocène marin

On en distingue deux cycles sédimentaires de dépôt différent l'un de l'autre :

* Le premier se compose de marnes grises et bleues, de sables et marnes à débris argileux provenant des flyschs créacés paléogènes. La série est transgressive et discordante sur les structures précédentes érodées préalablement. Ces marnes feraient jusqu'à 150 mètres et sont associées parfois à des niveaux calcaires riches en microfaunes planctoniques.

* Le second à dominance gréseuse est transgressif faisant jusqu'à 50 mètres d'épaisseur et donne à déduire par sa nature lithologique, des conditions de sédimentation régressive. Les beaux affleurements sont ceux de Bordj Ali à l'Est de la région étudiée (Bouillin 1977).

2. Le Pliocène

La mer revient au pliocène après tout le miocène moyen et supérieur, elle dépose des marnes à globigérinidés. On retrouve cependant une formation au niveau de l'oued Bou-Siaba bien stratifiée à pendage parfois assez relevé, d'aspect fluviatil mais apparemment non daté (Durand-Delga 1969).

II.2.1.8 Le Quaternaire

Il s'agit de dépôt de colluvions des terrasses fluviales anciennes et récentes composées de blocs, de cailloux et de sables limoneux. Ces dépôts occupent la vallée de oued El-Kébir et celle de son affluent oued Bou-Siaba. Ils présentent un aquifère pour les nappes libres superficielles.

II.2.1.9 Les formations éruptives miocènes

Les roches éruptives microgrenues recouvrent d'importantes surfaces. Elles constituent les compartiments éruptifs d'El-Milia. Ces formations recoupent et métamorphosent très légèrement les formations sédimentaires encaissantes jusqu'au Langhien inclus. Ces intrusions microgrenues sont disposées morphologiquement en dômes de diamètre moyen de l'ordre du kilomètre. À une échelle plus importante les massifs paraissent formés par la coalescence de tels dômes qui semblent se recouper par endroits. Cependant l'existence d'appareil éruptif microgrenu qui fait qu'il existe de toute évidence des relations de cause à effet. En effet c'est la mise en place du matériel éruptif par épanchement visiblement qui aurait provoqué l'effondrement du bassin d'El-Milia. A noter l'existence en bordure de la plaine étudiée, en rive droite, à quelque 5 kilomètres au sud d'El-Milia du matériel éruptif se trouvant disposé en coussins appelés notoirement « pillo-lava » au flanc même de la route menant à Constantine. (Roubault 1934, Durand-Delga 1955)

Les affleurements au niveau d'El-Milia ville (c'est à dire, les reliefs qui la ceignent) se présentent sous la forme de dômes microgranitiques quelque peu coalescents affichant un schéma général de massif éruptif débité en plusieurs buttes de nature donc microgranitique et d'âge miocène (aquitanien) ces microgranites ont affecté les terrains sédimentaires mésozoïques par un métamorphisme de contact, certaines parties du socle et les séries épimétamorphiques ont été cisailés, transportés (charriage tardif au Burdigalien) jusqu'à l'unité inférieure du massif de Moul ed demamene (Bouillin 1977)

II.3 Conclusion

El-Milia se place sur la retombée septentrionale de l'empilement des nappes de charriage, dont les reliefs du massif de Moul ed demamène montrent une excellente coupe. Cet empilement comporte des unités inférieures dont les calcaires jurassiques situés au Sud du terrain d'étude constituant l'essentiel et les unités supérieures dont le matériel est formé de secondaire schistosité épimétamorphique. Parmi celles-ci l'unité des Achaïches à l'Est du terrain d'étude.

Vers le Nord, cette unité s'enfonce à 20° ou 40° sous les phyllades noires du socle kabyle que recoupe la route entre El-Milia, Settara et Bordj-Ali. Ces phyllades s'étendent largement vers l'Est et l'Ouest de l'oued El-kébir. Elles constituent avec les gneiss qui en forment le sous-bassement, la grande nappe de la petite Kabylie. Sur ce socle repose une couverture de terrains sédimentaires avec :

- À la base les grès, marnes et conglomérats de l'oligo-miocène kabyle transgressif et discordant.
- Au-dessus, un ensemble argilo-marneux allochtone complexe où se trouve divers flyschs crétacés et paléogènes (Raoult 1974, Durand-Delga 1969, Bouillin 1977).

Les terrains tendres du Sud immédiat d'El-Milia doivent se rapporter à ce complexe. En discordance sur les séries précédentes, on repère quelques restes exigus d'une formation du Burdigalien supérieur. Traversant à l'emporte-pièce tout l'édifice précédent, de petits plutons microgranitiques forment toutes les collines arrondies entre oued Adder en rive gauche de l'oued El-kébir et le Nord-Est de Settara d'âge miocène moyen (environ 15 millions d'années) (Durand-Delga 1969)

Les plaines sont occupées par les alluvions de l'oued El-Kébir et de ses affluents, largement étendues dans la très large plaine principale que domine El-Milia.

D'après Ehrman (1928) les formations géologiques composant spécifiquement la zone étudiée sont successivement comme suit :

Les terrains perméables

du sommet à la base ces formations perméables se présentent comme suit :

- a. complexe alluvionnaire** essentiellement limoneux type basse vallée, on y distingue :
- b. superficiellement** le tout-venant renfermant de la terre végétale, matériaux argileux à argilo-sableux ou encore argilo gavelo-sableux sur une épaisseur allant jusqu'à 4 mètres.
- c. on passe à des argiles sableuses graveleuses** par endroits de couleur brune, assez plastique avec des passages sableux entre 7 et 8 m de profondeur.
- d. viennent dessous des argiles sablo-graveleuses** de teinte grise à brunâtre et plastique en alternance avec des argiles sableuses molles et grises jusqu'à 15 m de profondeur.
- e. on passe à des sables fins** puis des argiles sablo-graveleuses et des argiles grises puis des passages gréseux et enfin des sables fins et des blocs de grès allant à 30 m de profondeur.
- f. à partir de 30 m de profondeur** jusqu'à 50 m on retrouve épisodiquement une argile plastique peu silteuse et très molle par banc de 20 à 25 m et des sables fins ou sables argileux.

puis un passage de 2 m de sables gris grossiers puis on revient plus ou moins aux argiles grises plastiques silteuses qui tendent de plus en plus vers les teintes noirâtres jusqu'à la profondeur de 80 m qui est l'intensité maximale des alluvions.

g. les microgranites

Les appareils microgrenus présentent généralement une morphologie en dômes plus ou moins marqués, dont le diamètre moyen est de l'ordre de 1 km. Ce sont à l'évidence les formes initiales des masses intrusives épargnées par l'érosion. Les roches microgrenues montrent fréquemment un débit en gradins perpendiculairement aux parois des pointements. (Figure II.9)

Ces formations très friables et arénacées se trouvent systématiquement dans des zones structurellement plus déprimées que le reste. Il y a certainement une relation de causalité entre la mise en place du matériel éruptif près de la surface et l'effondrement de bassin d'El-Milia favorisé par un jeu de failles.

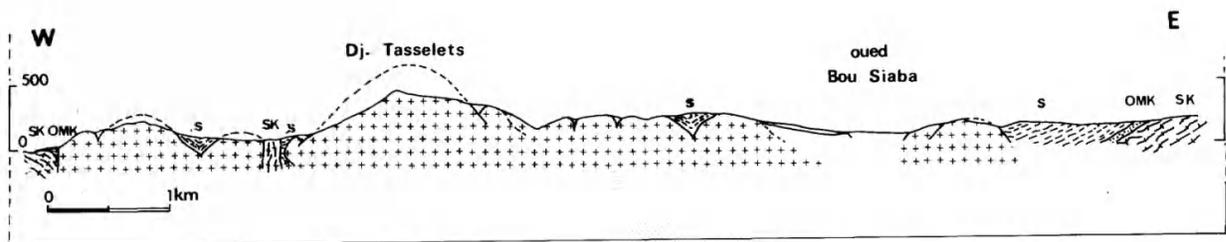


Figure II.9 : Coupe géologique Est-Ouest dans le massif de microgranite d'El-Milia

S.K : socle kabyle

OMK : oligo-miocène kabyle ;

S : les flyschs et le tellien allochtone, des zones arénitisées au tour de djebel Tasselets (Bouillin 1977).

Dans la partie centrale de la coupe, à l'Est de djebel Tasselets , des petits dômes de microgranites résistant à l'érosion sont séparés par des zones arénisées

Log Stratigraphique	AGE			LITHO-STRATIGRAPHIQUE			HYDROGEOLOGIE	
	ERE	Système	Sous Système	Note	Lithologie	Affleurements	Perméabilité relative	
	Quaternaire			A	Alluvions actuelles: graviers et galets	Le Long d'Oued Principal	10	Perméable
				a ³	Alluvions marécageuses	Centre de la plaine	20-25	Peu Perméable
				a ²	Alluvions récentes: dépôts limoneux	Le Long d'Oued Principal	<10	Perméable
				q	Alluvions anciennes dépôts califouteux et argile continentales	Centre et Est de la plaine	30-60	Semi-perméable
				e	Brèches consolidées et éboulis de grès	Sud-Ouest de la plaine	Puissante	Semi-perméable
	Tertiaire	Neogène	Miocène	m	Granites d'El Milia parfois fissurés et fracturés	Les Bordures de la plaine	Puissante	Semi-perméable à Imperméable
					Argiles et marnes	Est de la plaine		Imperméable
		Plaéocène	Eocène	ea ³⁻²	Numidien Alternance d'argile et grès	Sud-Est et le Nord de la plaine	> 500	Imperméable
	Secondaire	Crétacé inférieur	Aptien	n ⁵	Calcaires marneux	Sud-Est de la plaine		Perméable
			Barremien	n ⁴	Marnes schisteuses	Sud-Est de la plaine		Imperméable
			Néocomien	n ³	Marno-Calcaires	Sud-Est de la plaine		Imperméable
			Trias	Trias	t	Argiles-Marnes, lentilles gypseuses	Sud de la plaine	
	Primaire	Terrains Métamorphiques			Schistes, pyllades et micaschistes micacés	Nord-Est et Est de la plaine		Semi-perméable à Imperméable

Figure II.10 Colonne stratigraphique et hydrogéologique

Chapitre III : Les ressources hydriques

III.1 Introduction et présentation de l'hydrologie des cours d'eau :

La dynamique de l'hydrologie dans un bassin versant est quasiment tributaire de la physiographie du bassin versant dont les premiers travaux ont été menées par Gravelius (1914) de sorte que cette étude morphométrique des bassins versants est basée sur le réseau hydrographique notamment les surfaces drainées, l'ordre des cours d'eaux, et le mode de la géométrie des bassins versants. En effet le passage des précipitations en écoulement tant superficiel que souterrain dépend du bassin versant qui est défini comme la surface de recel des précipitations qui se constituent en système hydrologique engendrant perte et retard et qui les achemine jusqu'à un exutoire. Outre la forme du bassin versant, on notera parmi les caractéristiques physiques, la topographie, la géologie et la nature lithologique du sol. C'est ainsi que Gravelius (1861-1938) a proposé en 1914 le coefficient de Gravelius défini comme le rapport du périmètre du bassin sur celui d'un cercle de même superficie. Le coefficient de compacité K_c sera :

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

A : surface du bassin

P : périmètre du bassin

L'étude physiographique classique d'un bassin s'axe principalement sur les critères de la forme, du relief, de l'altitude et des écoulements mais pour mener une étude quantitative fiable il conviendrait de rappeler les conditions essentielles qui sont que le terrain d'étude soit de très petite surface aussi homogène que possible de par la lithologie et la structure ; or la surface du bassin versant étudié avoisine les 8000 hectares d'une part et d'autre part les formations en présence vont du matériel sédimentaire tels que les graviers, sables, limons ou marnes et argiles de la plaine alluviale aux roches métamorphiques et éruptives telles que les formations de socle schistes, micaschistes, et arène granitique tertiaire; ces critères rendent l'étude morphométrique délicate. Pour cela on se limite à tirer des renseignements indicatifs non quantifiés.

La superficie approchée planimétrée du sous bassin intéressant notre étude compte 7825 hectares irriguées par deux principaux cours d'eau: oued El- kébir et oued Bou-siaba. C'est une plaine alluviale qui est ceinturée à l'ouest en rive gauche par oued Adder d'altitude moyenne 160 m. et de direction Sud-Nord et en rive droite ou à l'Est par douar Amrioune-taskif orienté

également Sud-Nord et haut de 368 m. Par le Nord, on rencontre la barrière montagneuse de M'chatt d'allongement Ouest-Est culminant à 365m.

L'altitude moyenne du bassin d'El-Milia déterminée par la courbe hypsométrique avoisine les 260 m. (Bourzama,2003) les zones d'altitude supérieure à 250 m dépassent légèrement les 50% de la surface totale du bassin d'étude pendant que les plus faibles altitudes de moins de 50 mètres ne concernent strictement que les plaines alluviales de oued El-kébir et de Bou-siaba .

La géométrie du bassin versant du site d'étude en relation étroite et directe avec les reliefs a une incidence évidente sur l'écoulement en ce que le sous bassin versant d'El-Milia est de forme plus ou moins arrondie drainé par oued el-kébir à écoulement sud-nord avec un indice de Gravelius K_c

$$\Rightarrow K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0,28 = \frac{34 \text{ km}}{\sqrt{78,25 \text{ km}^2}} = 1,07$$

Tableau III.1 Valeurs des paramètres morphométriques et altimétriques

Sous bassin- versant	EL-MILIA
Superficie (km ²)	78,25
Périmètre réel P (km)	34 km
Altitude moyenne	260 m
Altitude maximale	617 m
Altitude minimale	27 m
indice de compacité	1,07
Nature du relief	assez fort

Tableau III.2 Valeurs de l'indice de compacité de Gravelius

Valeurs de l'indice K_c	Forme du sous bassin versant
1,00	Arrondie (circulaire)
1,12	carré
$K_c > 1,12$	Rectangle (allongé)

Donc le terrain d'étude correspondant à une plaine d'altitude moyenne de 35 mètres ceinturée de reliefs tout autour élevés à une moyenne de 265 m pour une altitude maximale de plus de 600 m ce qui favoriserait plutôt le ruissellement que l'infiltration. Outre la forme du bassin plus ou moins arrondie , confirmée d'ailleurs par un indice de compacité de Gravelius avoisinant 1,00 . La topographie ainsi que la géologie se trouvent être les facteurs déterminants dans le processus d'infiltration des précipitations mais aussi de l'écoulement qui résulte des eaux de pluies.

III.2 Hydroclimatologie

L'étude hydroclimatologique a pour objet de faire ressortir les caractéristiques climatiques en se basant sur les données mesurées sur une période étalée sur une vingtaine d'années correspondant à la région d'El-Milia , qui sont représentatifs du climat régnant sur notre zone d'étude. Nous analyserons les paramètres climatiques relevés aux stations d'El-Milia et d'Achouat (jijel) que sont les précipitations, les températures, l'humidité relative, la vitesse du vent pour déterminer l'évapotranspiration et le bilan hydrologique moyen.

La couverture du site est basée sur le découpage hydrologique adopté par l'ANRH (agence nationale des ressources hydrauliques). La zone étudiée appartient au sous bassin n° 04 inclus du grand bassin de l'oued Rhumel-Kébir dans le constantinois.

III.3 Etude des paramètres climatiques

L'interaction combinée des paramètres climatiques à savoir les précipitations , la température et surtout l'évapotranspiration conditionnent le régime hydrologique des oueds et l'alimentation des nappes d'eaux souterraines ; celui de l'oued El-kébir dont le cours a été détourné et en partie canalisé et oued Bou siaba sont régis par la morphologie des reliefs du secteur et par sa position en latitude et en altitude . la proximité de la mer d'où viennent les masses d'air humide régulent le volume des précipitations à la hausse .

III.3.1 Les précipitations atmosphériques

Les précipitations annuelles constituent le paramètre déterminant de l'abondance fluviale et de la recharge aquifère. Les variations annuelles des précipitations (2001-2021) relevées aux stations d'El-Milia et d'Achouat montrent que les années les plus pluvieuses sont les années 2003 et 2012 - 2013 soit une décennie après avec des hauteurs respectivement de 1194,5 mm et puis 1266,1 et 1312 mm .

Tableau III.3 Pluviométries annuelles (2001-2021 stations d'El-Milia et d'Achouat)

2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
787,5	1089,3	1194,5	1072	1090,3	831,2	1191,2	775,5	1116,7	1051,2

2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1006,4	1266,1	1312,5	1006,1	558,99	448,23	595,9	659,18	574,79	480,31	407,21

La moyenne interannuelle des précipitations reste toutefois satisfaisante avec une pluviométrie avoisinant les 1000 mm durant cette décennie mais à partir de l'année 2015 une chute effrayante des précipitations se fait enregistrer avec une pluviosité annuelle gravitant autour des 500 mm de sorte que la variabilité interannuelle des précipitations est flagrante avec des années très arrosées (2012 : 1266,1mm et 2013 : 1312,5mm) tandis que l'année 2021 n'a reçu que 407,21mm d'eau. Toutefois on enregistre une bonne moitié (onze années) durant ces deux dernières décennies où l'on a reçu plus que la moyenne annuelle des précipitations qui est de 881,67 mm.

III.3.1.1 Les précipitations moyennes mensuelles

L'analyse de ces données de précipitation nous montre une période de pluies allant du mois de novembre au mois de février (Nov :137,92 Déc :141,23 Janvier :124,05 mm Fév :104,06 Mars : 91,84) qui est donc une période très arrosée et le reste de l'année se retrouve avec une pluviosité limitée pendant qu'une absence presque totale des précipitations au mois de Juillet et parfois aux mois de Juin et d'Aout est remarquée.

Donc la saison pluvieuse se développe du mois d'octobre au mois d'avril et la saison sèche se limite entre le mois de mai et le mois de septembre

Tableau III.4 Pluviométries moyennes mensuelles (2001-2021)

Janv	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc
124,05	104,56	91,84	68,03	45,42	12,52	2,31	20,26	56,47	77,07	137,92	141,23

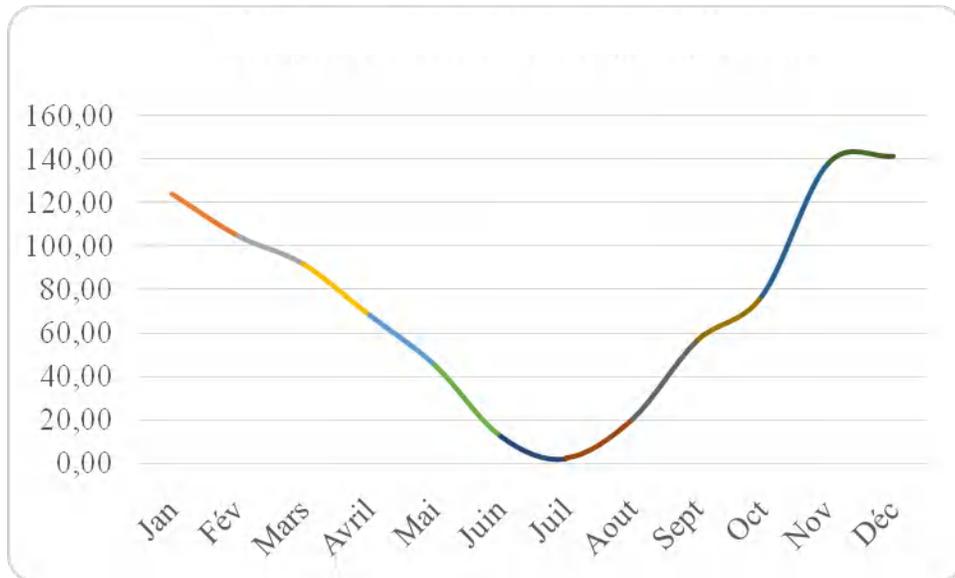


Figure III.1 Précipitations moyennes mensuelles

III.3.1.2 Les précipitations moyennes saisonnières.

Tableau III.5 Pluviométries moyennes saisonnières (2001-2021)

Eté	Automne	Hiver.	Printemps
24,24	126,36	216,22	149,78

Sur la période des deux décennies (2001 – 2021) la moyenne annuelle des précipitations calculée est de 881,67 mm. On remarque que l'année la plus pluvieuse est l'année 2013 (1312,5 mm) tandis que l'année la plus sèche est l'année 2021 (407,21 mm) et que l'écart est considérable. Les moyennes saisonnières exprimés sur l'histogramme ci-dessus restent importantes et les moyennes mensuelles ne sont qu'indicatives.

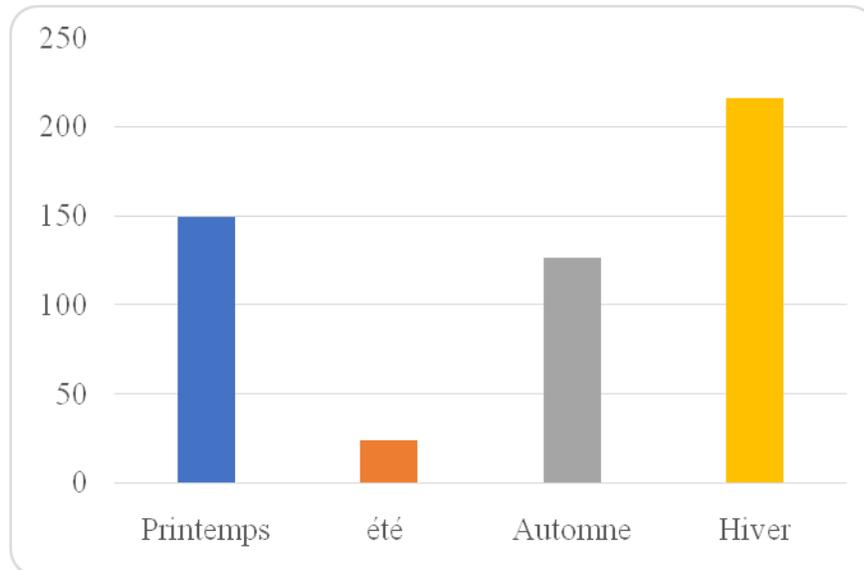


Figure III.2 Précipitations moyennes saisonnières

III.3.2 Les températures

La température est un facteur principal qui conditionne le climat d'une région. Du fait de l'humidité considérable pour un couvert végétal abondant dans un bassin versant en forme de cuvette ceinturée par des reliefs à pentes abruptes, les chaleurs se font sentir lourdement en périodes chaudes de l'année mais également le froid en hiver si bien que les écarts thermiques ne sont pas tellement prononcés.

III.3.2.1 Les températures moyennes mensuelles

Durant les décennies 2001 – 2021 on remarque que l'année hydrologique dans la région d'El-Milia est subdivisée en deux périodes :

Une période relativement froide allant du mois de novembre au mois d'avril avec une température moyenne minimale au mois de janvier (12 °C) et la température moyenne dans cette période est de (13,7°C). Une seconde période chaude du mois de juin au mois d'octobre avec un maximum au mois d'aout (26,7°C) et la température moyenne de cette période est de 24,2 °C.

Tableau III.6 Températures moyennes mensuelles en °C (2001-2021)

Janv	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc
12,04	11,87	13,49	15,61	18,71	23,02	26,38	26,77	24,02	21,13	16,46	13,3

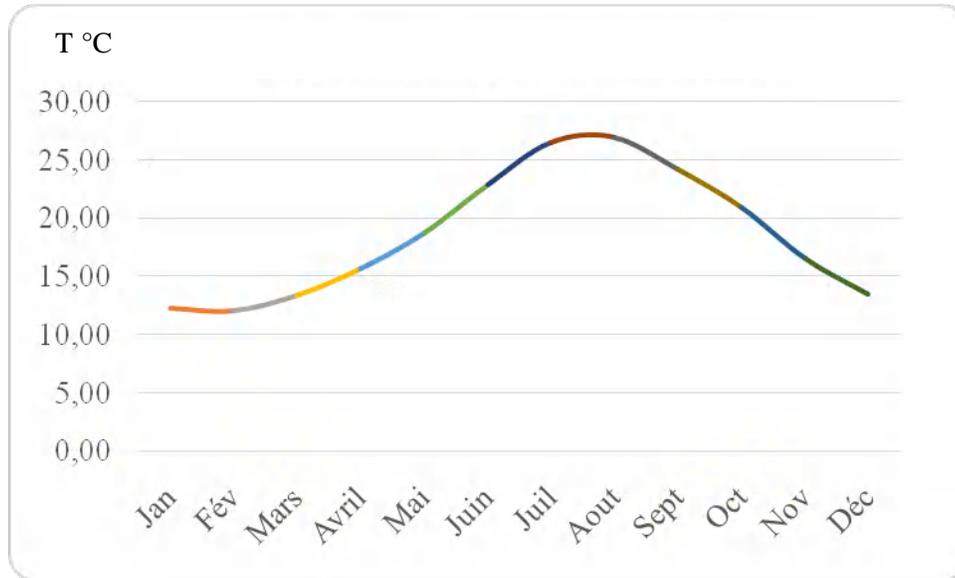


Figure III.3 Courbe de variations des températures moyennes mensuelles

III.3.2.2 Les écarts et les extrêmes des températures

Notons que la température moyenne annuelle est de 18,6°C avec des écarts élevés compris entre 11,8°C et 26,7°C, tandis que la moyenne minima est de 13,7°C et la moyenne maxima est de 23,3° pour des extrêmes situés entre 18,7°C et 26,7°C alors que la moyenne des températures les plus élevées est de 26,7°C tandis que les écarts se situent entre les mois de Juin et Octobre (23°C – 21°C).

III.3.3. L'humidité relative

L'humidité relative ou le degré hydrométrique de l'air est le rapport entre la tension de vapeur d'eau effective « e » et la tension de vapeur saturant « ew » à la même température exprimé en % « $U = e / ew * 100$ ».

D'après l'humidité moyenne de chaque mois, on remarque que l'humidité maximale se situe entre les mois de Décembre et Avril (76,27 % et 76,5%). Cette valeur peut parfois être une caractéristique importante du climat.

Tableau III.5 Humidité moyenne mensuelle en % (2001-2021)

Janv	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc
76,84	76,30	76,51	76,50	72,90	66,86	61,91	63,60	69,62	70,43	73,63	76,27

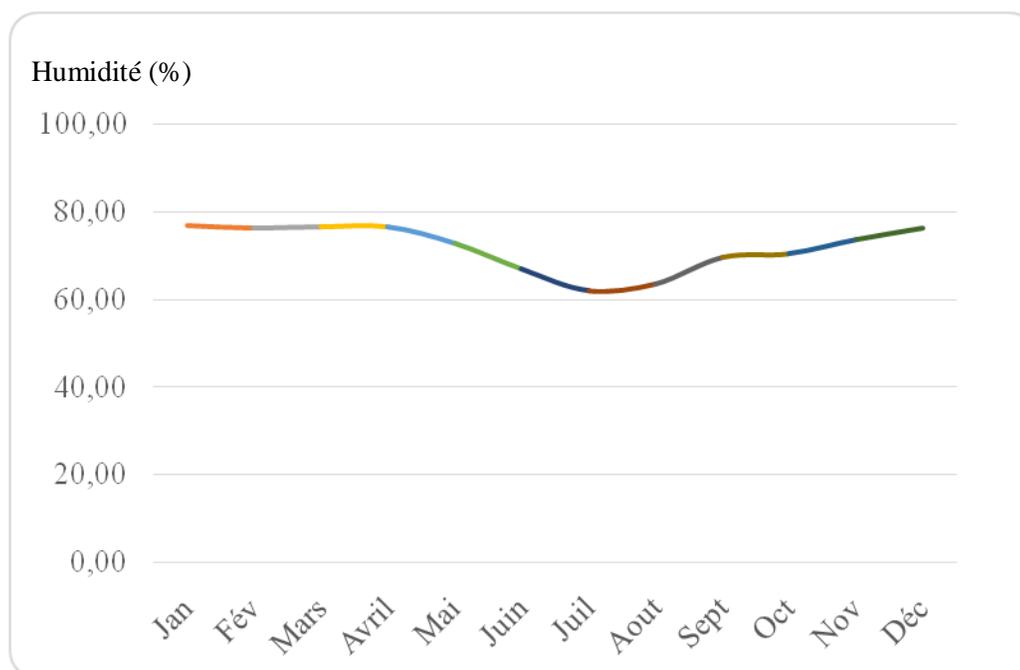


Figure III.4 Humidité moyenne mensuelle en % (2001 – 2021)

Il ressort que l'humidité atmosphérique est prononcée durant la période estivale et cela est dû naturellement au fait que la température de l'air est élevée suite à l'importance de l'insolation, ce qui fait croître la capacité de contenance de l'air en eau.

En résumé on peut dire que l'humidité relative dépend dans une large mesure de la température qui elle aussi à son tour dépend de la quantité de rayonnement arrivant sur le sol, il demeure que celle-ci n'est pas la seule, car d'autres facteurs interviennent aussi, notamment les vents et les nuages entre autres. L'humidité moyenne annuelle oscille autour de 72 %.

III.3.4. Les vents

Le vent est un phénomène épisodique et saisonnier notamment au printemps et pendant les saisons d'automne et d'hiver où il joue un rôle déterminant en provoquant une évapotranspiration considérable . Des vents avoisinant les 15 Km/h sont un phénomène normal .

Dans la région d'El-Milia les vents soufflent selon la direction NE-SW et NW-SE. Les vents les plus fréquents en hiver sont les vents venant du NW tandis qu'au Printemps les vents venant du Nord-Est dominant et en été ils sont pratiquement nuls.

III.3.4.1. La vitesse des vents

D'après les données de l'ONM relevées aux stations d'El-Milia et d'Achouat pour la période de 2001 – 2021, la vitesse de vents est assez importante sur toute la période (Octobre – Mars) avec un maximum durant les mois de Novembre (16,3 km/h) décembre (15,8 km/h) , janvier (16,3 km/h), février (15,8 km/h) et mars (15,3 km/h) .

Tableau III.8 Vitesse moyenne mensuelle du vent en m/s (2001 – 2021)

Mois	Janv	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc
Vitesse	76,84	76,30	76,51	76,50	72,90	66,86	61,91	63,60	69,62	70,43	73,63	76,27

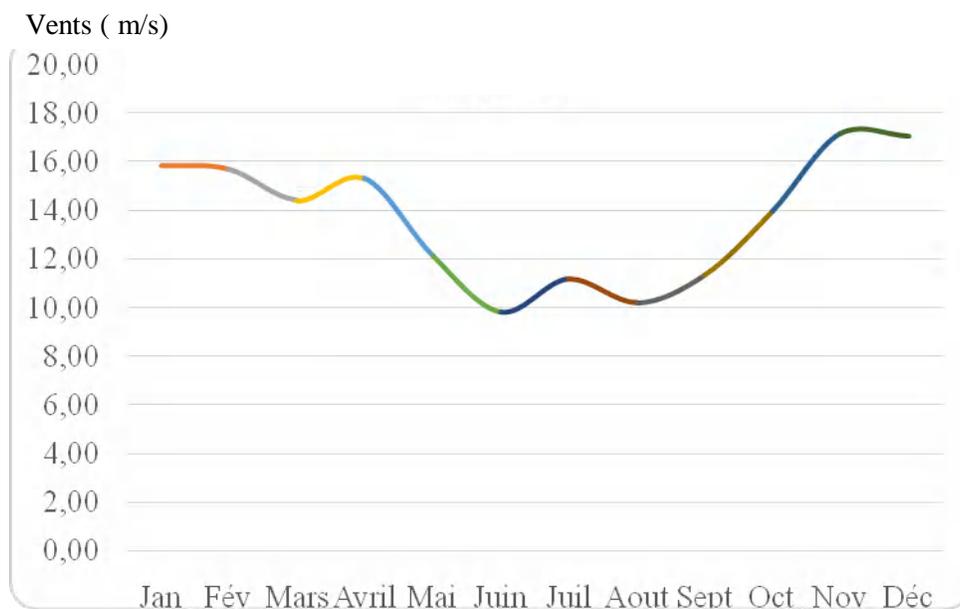


Figure III.5 Moyenne mensuelle de la vitesse des vents

III.3.5 La durée de l'insolation

En raison du peu de nébulosité dans l'atmosphère, la région reçoit une quantité de lumière solaire relativement élevée. Le nombre d'heures d'ensoleillement annuel est évalué à une moyenne 2700 heures/an, soit environ 7 heures/jour . Cette forte luminosité est un facteur favorable pour l'assimilation chlorophyllienne, mais elle a en revanche un effet desséchant car elle augmente la température.

Donc l'ensoleillement est considérable à El-Milia. Car l'atmosphère présente une grande clarté durant toute l'année, avec 138 jours en moyenne de l'année ou le ciel est totalement clair.

III.3.6 Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gausсен

Les coauteurs Bagnouls et Gausсен ont conçu ce dispositif et ont défini une période sèche comme étant une période pendant laquelle les précipitations totales du mois sont inférieures ou égales au double de la température du même mois.

Le diagramme pluvio-thermique ci-dessous montre que pour notre terrain d'étude la période humide s'étale sur 9 mois de l'année du mois de Septembre au mois de Mai et la période sèche sur les trois mois de juin , juillet et aout (Fig.III.6)

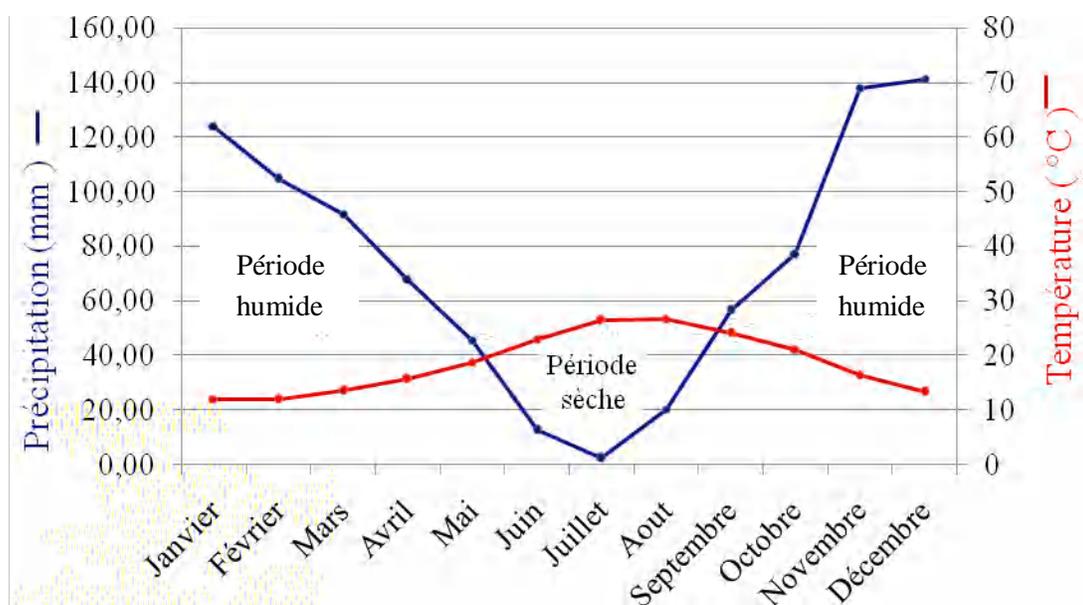


Figure III.6 Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gausсен

III.3.7. Indice d'aridité de Demartone

Selon Demartone l'indice d'aridité est exprimé comme suit:

$$I = \frac{P}{(T + 10)}$$

Tableau III.6 Moyennes des précipitations et températures mensuelles et bidécennales (période 2001-2021) à la station d'El-Milia et d'Achouat

Mois	Précipitation (mm)	Température (°C)
Janvier	124,05	12,04
Février	104 ,56	11,87
Mars	91,84	13,49
Avril	68,03	15 ,61
Mai	45,42	18 ,71
Juin	12,52	23,02
Juillet	2,31	26,38
Aout	20,26	26,77
Septembre	56,47	24,02
Octobre	77,07	21,13
Novembre	137,92	16,46
Décembre	141,23	13,3
	$\Sigma = 881.67$	$T_{\text{moy}} = 18.6$

Donc avec ,

P : les précipitations moyennes annuelles (881,67 mm)

T : la température moyenne annuelle (18,60 °C)

Selon Demartone l'indice d'aridité est exprimé comme suit :

$$I = \frac{P}{(T + 10)} \qquad I = \frac{881,67}{18,60 + 10} = 30,82$$

Tableau III.7 Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de Demartone.

Valeur de l'indice	Type de climat
$0 < I < 5$	Hyper-aride
$5 < I < 10$	Aride
$10 < I < 20$	Semi-aride
$20 < I < 30$	Semi-humide
$30 < I < 55$	Humide

Pour les valeurs de I comprises entre 30 et 55 se situe notre terrain d'étude et est donc classé humide et peut être considéré comme hyper arrosé.

III.3.8 La méthode d'Euverte

Le principe de cette méthode est basé sur le rapport des précipitations moyennes sur les températures moyennes mensuelles.

Tableau III.8 Rapport des précipitations moyennes mensuelles sur les températures
(Méthode d'Euverte, période 2001-2021)

Mois	P(mm)	T(°C)	P/T
Janvier	124,05	12,04	10,30
Février	104,56	11,87	8,80
Mars	91,84	13,49	6,80
Avril	68,03	15,61	4,35
Mai	45,42	18,71	2,42
Juin	12,52	23,02	0,54
Juillet	2,31	26,38	0,08
Aout	20,26	26,77	0,75
Septembre	56,47	24,02	2,35
Octobre	77,07	21,13	3,64
Novembre	137,92	16,46	8,37
Décembre	141,23	13,30	10,61

Cette méthode permet de définir quatre types de régimes climatiques :

- * Un régime très sec avec : $P/T < 1$
- * Un régime sec avec : $1 < P/T < 2$
- * Un régime subhumide avec : $2 < P/T < 3$
- * Un régime humide avec : $P/T > 3$.

Il ressort de la quatrième colonne du tableau ci-dessus qu'il s'agit d'un régime que l'on peut classer humide voire même très arrosé au vu du rapport P/T qui est largement supérieur à 3 durant la période allant du mois de novembre jusqu'au mois de mars alors que ce régime peut être classé humide en avril et en octobre .

III.3.9. L'évapotranspiration potentielle

L'évaporation est un phénomène physique qui croît avec la température, la sécheresse de l'air et l'agitation de cet air (on sait par exemple que le linge sèche d'autant plus vite qu'il vente que qu'il fasse chaud) . Ce terme représente la libération végétale de l'eau dans l'atmosphère sous forme de vapeur sous des conditions climatiques et physiographiques. Ces conditions ne sont pratiquement pas toujours remplies et de ce fait l'évaporation atteint des seuils tout de même appréciables. L'évapotranspiration est sans conteste la notion climatologique la plus délicate à évaluer et reste toujours le deuxième terme climatologique le plus important après les précipitations dans l'élaboration du bilan hydrique. Contrairement aux pluies ou aux écoulements qui peuvent faire l'objet d'une approche quantitative satisfaisante, bien que peu précise, il est actuellement très difficile de mesurer directement le flux de vapeur d'eau dans l'atmosphère. L'évapotranspiration consiste au jumelage de deux phénomènes : l'un de nature physique qui est l'évaporation et l'autre physiologique qui est la transpiration végétale .Le processus de l'évaporation est de deux ordres le premier étant propre à l'atmosphère ambiante ou à la surface d'évaporation elle-même caractérisée par l'état de l'atmosphère engendrant le pouvoir évaporant de l'atmosphère et le second ordre caractérisant l'état de la surface , sa nature et son aptitude à alimenter l'évaporation et est régi par plusieurs facteurs que sont :

- * Température du sol, de l'air et de l'eau
- * Hygrométrie de l'air ou mieux encore la sécheresse de l'air
- * Rayonnement solaire
- * Etat et quantité d'eau contenue dans le sol
- * Vent et pression atmosphérique
- * Nature et état de la végétation
- * Topographie et exposition

De ce fait, il est clair que l'évaluation de l'évapotranspiration est sensible et difficile du fait quelle est pluri-dépendante de tous ces facteurs physiques et biologique.

Cependant le calcul de l'évapotranspiration est réalisé par le moyen de modèles empiriques proposés par plusieurs auteurs. Diverses formules permettent d'évaluer l'évapotranspiration. Il convient de différencier l'évapotranspiration potentielle ETP, qui est la quantité d'eau théoriquement évaporable par une surface d'eau libre et l'évapotranspiration réelle (ETR) qui correspond à la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée et qui dépend des conditions naturelles (Végétation, nature du sol,...).

III.3.9.1 Calcul de l'ETP et l'ETR.

L'ETP et l'ETR peuvent être évaluées à l'aide de nombreuses formules (Thornthwaite, Turc, Coutagne , Primault,..), nous avons appliqué les modèles les plus adaptés dont :

1. Calcul de l'ETP par l'équation de Thornthwaite : basée essentiellement sur les températures de l'air :

$$\text{ETP (mm) mensuelle non corrigée} = \text{ETP (mm)} = 16 \left(\frac{10 T}{I} \right)^a$$

$$\text{ETP (mm)} = 16 \left(\frac{10 T}{I} \right)^a \times K$$

tel que : T est la température moyenne mensuelle en °C

$$a \text{ est l'exposant climatique} = \frac{1,6}{100} I + 0,5$$

$$I \text{ est l'indice thermique annuel} = \sum i$$

$$i \text{ indice thermique mensuel} = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

K : est un coefficient d'ajustement mensuel qui dépend de la latitude de la station et de la durée de la journée (valeur sur le tableau en annexe . Latitude 36°)

ETP : est l'évapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau).

Les résultats du calcul de tous les termes sont insérés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.12 ETP moyennes mensuelles et annuelles calculées par la formule de Thornthwaite à la station d'El-Milia et d'Achouat (2001-2021).

Mois	Température(°C)	i	K	ETP corrigée (mm)
Janvier	12,0	3,76	0,87	24,0
Février	11,8	3,66	0,85	22,7
Mars	13,5	4,49	1,03	35,5
Avril	15,6	5,59	1,10	50,0
Mai	18,7	7,36	1,21	77,6
Juin	23,0	10,07	1,22	115,9
Juillet	26,4	12,41	1,24	153,1
Août	26,7	12,63	1,16	146,4
Septembre	24,0	9,03	1,03	106,1
Octobre	21,1	8,84	0,97	77,5
Novembre	16,5	6,09	0,86	43,5
Décembre	13,3	4,4	0,84	28,2
Moy.annuelle	18,6	7,25 $\Sigma i= 88,33$	-	880,5

Remarque : Les valeurs de l'évapotranspiration corrigée insérées dans la dernière colonne du tableau ci-dessous sont des valeurs moyennes .

2. Calcul de l'ETR

a) Selon l'équation de Turc .

Ce modèle proposé par Turc est applicable pour tout type de climat . Il permet l'évaluation directe de l'ETR annuelle pour un bassin versant donné à partir des précipitations annuelles et de la température moyenne annuelle selon l'équation suivante :

$$E.T.R = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Tel que P : Précipitation annuelle moyenne en mm

T : Température annuelle moyenne en °C

L (le pouvoir évaporant) = $300 + 25T + 0,05 T^3$

$$\begin{aligned} \text{Le pouvoir évaporant } L &= 300 + 25T + 0,05 T^3 \\ &= 300 + (25 \times 18,6) + (0,05 \times 18,6^3) \\ &= 1086,7428 \end{aligned}$$

Rappelons que le pouvoir évaporant de l'atmosphère dépend d'un certain nombre de paramètres météorologiques dont :

- La température
- L'insolation (l'énergie)
- La pression barométrique
- Le déficit hygrométrique
- La vitesse et la turbulence du vent

Après transposition des valeurs numériques de tous les termes de l'équation on obtient :

$$E.T.R = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} = \frac{881,67}{\sqrt{0,9 + \frac{881,67^2}{1086,7^2}}} = 706,3 \text{ mm}$$

Tableau III.13 : l'ETR obtenue par la méthode de Turc

P (mm)	T (C°)	L (pouvoir évaporant)	ETR (mm)	ETR (%)
881,67	18,6	1086,74	706,3	80,1

b) Modèle de Coutagne

L'évapotranspiration réelle est estimée selon la formule de Coutagne comme suit :

$$\mathbf{ETR = P - \lambda P^2}$$

$$\text{avec : } \lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14 T} \quad \text{et} \quad \frac{1}{8 \lambda} < P < \frac{1}{2 \lambda}$$

tel que :

T : températures moyennes annuelles en °C

T : 18.6 °C

λ : est un coefficient qui dépend de la température

$\lambda = 0.2937$

Les précipitations moyennes annuelles atteignant 881,67 mm correspondent à 0,88167 mètres et sachant que le rapport $\frac{1}{8 \lambda} = 0,4256$ et $\frac{1}{2 \lambda} = 1,7024$

Après transposition des valeurs respectives des différents termes de la condition d'application de l'équation de Coutagne, On obtient :

$$\frac{1}{8 \lambda} < P < \frac{1}{2 \lambda} \Rightarrow 0,4256 < 0,88167 < 1,7024$$

Donc la formule de Coutagne se trouve être applicable à la région d'étude car la condition d'application est vérifiée qui est que P doit être comprise entre $\frac{1}{8 \lambda}$ et $\frac{1}{2 \lambda}$

$$\begin{aligned} \text{donc le déficit d'écoulement } D &= ETR = P - \lambda P^2 \\ &= 0,88167 \text{ m} - (0.2937 \times (0,88167)^2) \\ &= 0.6533 \text{ m} = 653,3 \text{ mm} \end{aligned}$$

Tableau III.14: l'ETR obtenue par la méthode de Coutagne

P (mm)	T (°C)	λ	ETR (mm)	ETR (%)
881,67	18,6	0,2937	653,3	74.09

C) Evaluation de l'évaporation réelle ETR graphiquement :

l'évaluation directe du déficit d'écoulement ou de l'évapotranspiration ETR peut être obtenue par lecture graphique sur l'abaque de Wundt modifié par Coutagne qui comporte sur l'axe des abscisses les températures moyennes annuelles et sur celui des ordonnées les précipitations moyennes annuelles (Figure III.7)

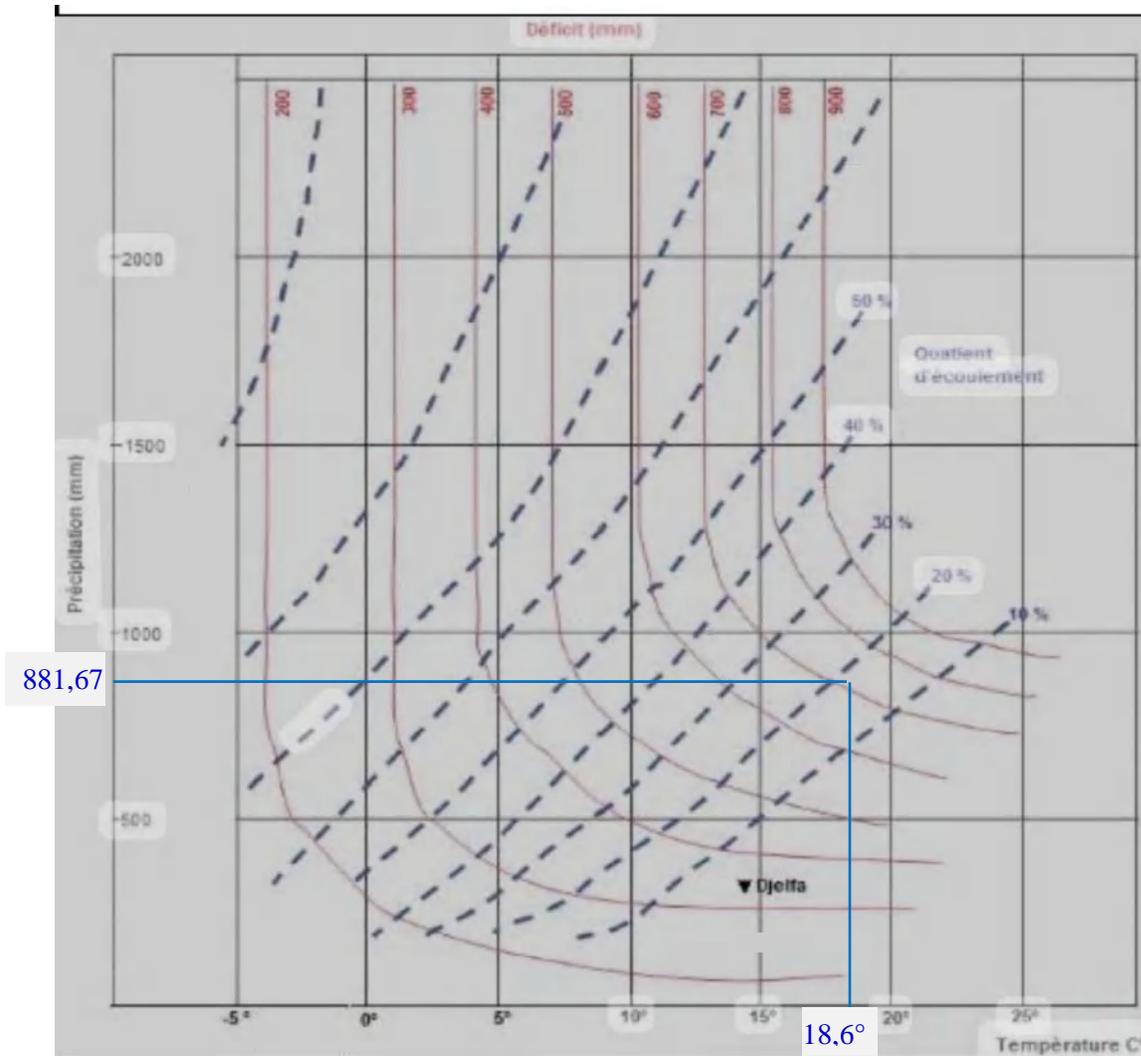


Figure III.7.Abaque de Wundt modifié par Coutagne donnant le déficit d'écoulement .

sur l'axe des abscisses les températures moyennes annuelles et sur celui des ordonnées les précipitations moyennes annuelles (Figure III.7)

donc pour la valeur de température moyenne annuelle de 18,6°C et une moyenne des précipitations annuelles de 881,07 mm , l'ETR relevée sur l'abaque est de 708 mm soit 80,3% des précipitations.

Tableau III.15 : Résultats des calculs de l'évapotranspiration réelle (ETR) selon divers auteurs pour la station d'El-Milia et d'Achouat (2001-2021).

Paramètre Formule	P (mm)	T (°C)	ETR (mm)	ETR (%)
Turc	881,07	18,6	706,3	80,1
Coutagne	881,07	18,6	653,3	73,7
Wundt	881,07	18,6	708	80,3

Nous remarquons que les formules Turc et Wundt ont abouti sensiblement à la même évaluation de l'ETR et le modèle Coutagne n'est pas non plus loin, c'est pourquoi nous avons retenu la moyenne qui est de 689,8 mm pour l'ETR soit 78,2 % de la lame d'eau précipitée.

$$ETR_{\text{moy}} = \mathbf{689,8 \text{ mm}} = \mathbf{78,2 \%}$$

de la lame d'eau précipitée

d) Détermination des réserves facilement utilisables (RFU) :

Les réserves utiles $RU = RFU$ (confort hydrique) + RDU (stress hydrique)

$$\Rightarrow RU = RFU$$

$$\text{D'après la formule d'Hallaire } RFU = \frac{C - F}{100} H. d + 30 \text{ mm}$$

Tel que : C capacité du sol à retenir le maximum d'eau alors qu'il est drainé librement.

F est la capacité au point de flétrissement végétal jusqu'à la limite la plus profonde où l'eau est absorbable par les végétaux .

H est la profondeur de l'enracinement végétal (m)

D est la densité apparente du sol.

Ces différents paramètres n'étant pas accessibles , nous avons retenu une RFU estimée à 100 mm relative à un maximum pour un type de sol saturé qui serait en grande partie limono-gravelo-argileux .

$$RFU = 100 \text{ mm}$$

Rappelons que si $P > ETP_c \Rightarrow ETR = ETP_c$

DA (déficit agricole) qui est la quantité d'eau qu'il faudrait fournir par irrigation aux végétaux pour leur épargner la sècheresse.

$$DA = ETP_c - ETR .$$

Exc (Excédent) est la quantité d'eau restante quand l'évapotranspiration et les réserves facilement utilisables sont satisfaites . l'excédent c'est donc le surplus qui est destiné à l'alimentation des nappes et au ruissellement et qui s'exprime comme suit :

$$P = ETR + Exc \Rightarrow Exc = P - ETR .$$

$$Exc = 881.67 \text{ mm} - 689,8 \text{ mm} = 191.87 \text{ mm} \text{ soit } 21.7 \%$$

III.3.9. Calcul du bilan hydrique selon le concept Thornthwaite:

Le calcul est basé selon le principe que le volume d'eau précipité dans un bassin versant suit son cheminement dans l'une des quatre destinations possibles qui sont :

- L'infiltration I pour contribuer à la recharge des nappes.
- Le ruissellement R en surface.
- L'évapotranspiration ETR.
- Le stockage dans le sol ΔS .

Ce qui aboutit à l'équation $P = ETR + R + I + \Delta S$.

Or dans la nature, les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines ainsi que les transferts d'eau dans le sol et le sous-sol sont très complexes du fait de l'hétérogénéité spatiale du matériau constituant le sous-sol notamment celui de la plaine alluviale objet de cette étude. Cela nous amène à substituer le terme de l'équation $R+I$ par le terme Exc (excédent) et étant donné que ΔS est négligeable , on obtient alors :

$$P = ETR + Exc .$$

Toutefois les quantités d'eau précipitées passent prioritairement à l'ETP puis une partie vient satisfaire les RFU ; ensuite une autre partie de ce volume précipité s'infiltré et le reste ruisselle selon le degré de perméabilité du matériau de la couverture .

Donc, si $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$

si $P < ETP \Rightarrow$ soit $ETP \leq P + RFU$ donc $ETR = ETP$

soit $ETP > P + RFU$ alors $ETR = P + RFU$

Le Bilan hydrologique moyen annuel ou bien la lame d'eau annuelle écoulée E (mm) :

$$E = P - \text{Déficit d'écoulement (ETR)} = 881,67 \text{ mm} - 689,8 \text{ mm} = \mathbf{191,8\text{mm}}$$

$$= \mathbf{21.7 \%}$$
 de la lame d'eau précipitée

Tableau III.9 Bilan hydrique avec ETP calculée par la formule de Thornthwaite et ETR moyenne entre Turc, Coutagne et Wundt pour la station d'El-Milia et Achouat (2001-2021).

Mois	P(mm)	T(°C)	ETPc	P-ETP	RFU	ETR	Def.	Exc
Janvier	124,0	12,0	24,0	100	100	24,0	-	100
Février	104,5	11,8	22,7	81,8	100	22,7	-	81,8
Mars	91,8	13,5	35,5	56,3	100	35,5	-	56,3
Avril	68,0	15,6	50,0	18,0	100	50,0	-	18
Mai	45,4	18,7	77,6	-32,2	100	77,6	-	9,9
Juin	12,5	23,0	115,9	-103,3	68	80	35	-
Juillet	2,3	26,4	153,1	-150,7	-	2,31	151	-
Août	20,2	26,7	146,4	-126,1	-	20,26	126	-
Septembre	56,4	24,0	106,1	-49,6	-	56,4	50	-
Octobre	77,07	21,1	77,5	-0,4	-	77,5	00	00
Novembre	137,9	16,5	43,5	94,4	94	43,5	00	00
Décembre	141,2	13,3	28,2	113	100	28,2	-	107
Total	881.67	moy18,6	880,5	-	-	517,9	362	-

III.4. Conclusion

La distribution mensuelle des précipitations au cours de ces deux dernières décennies (2001-2021) montre que la période est pluvieuse dans son ensemble correspondante aux mois allant de novembre à Avril et la saison sèche ou déficitaire est jugée temporellement relativement longue étalée entre le mois de Mai et le mois d'octobre soit 6 mois durant.

La comparaison entre les différents modèles d'évaluation de l'ETP et l'ETR ont prouvé que la méthode Thornthwaite est la plus inadaptée dans cette région si bien que la quantité d'eau potentiellement évapotranspirée calculée par la méthode Thornthwaite qui est de 880,5 mm équivalente à 99,9% des précipitations, nous a conduit à faire remarquer que Thornthwaite considère dans ses calculs la totalité de l'eau emmagasinée dans les réserves utiles. Or, les sciences agronomiques affirment qu'une partie de ces réserves reste emmagasinée dans le sol et ne sera pas évapotranspirée de sorte que la croissance de la plupart des espèces végétales est ralentie lors de la période de flétrissement des plantes et donc ces réserves d'eau deviennent difficilement utilisables (RDU) cela est le stress hydrique.

L'étude climatique a permis de définir le régime climatique de cette région comme étant de type humide voire même très arrosé avec un volume de 881,6 mm/an et donc les précipitations de la région d'El-Milia demeurent tout de même très appréciables malgré cette période de réchauffement climatique très ressentie avec une baisse significative de la lame d'eau écoulée et ce depuis 1995 (voir tableau en annexe)

La température moyenne annuelle est de 18°C avec des écarts peu importants entre le jour et la nuit. Les calculs estimatifs du bilan hydrologique ont donné un écoulement avoisinant un taux de 20 % des précipitations ce qui reste appréciable.

Le déficit agricole s'étale naturellement entre le mois Juin et le mois de Septembre.

Cependant l'évapotranspiration annuelle moyenne (ETR) atteint les 689,8 mm ce qui équivaut à 78,2 % de la lame d'eau précipitée laissant derrière elle un excédent confortable de plus de 21 %.

Chapitre IV : Contexte hydrogéologique

Introduction

L'identification d'un aquifère repose sur plusieurs critères dont la géologie, hydrodynamique et l'hydrochimie. L'alimentation, le stockage et l'écoulement de l'eau souterraine sont imposés en prime abord par la géologie comme étant la base fondamentale de l'hydrogéologie. En effet la géologie identifie par les études stratigraphique tectonique et structurale les formations lithostratigraphiques.

La compréhension de la dynamique des eaux souterraines contenues dans la nappe alluviale d'El-Milia repose sur l'analyse de la surface piézométrique de la masse d'eau en écoulement à régime laminaire. L'élaboration de la carte piézométrique permet de retrouver la profondeur de l'eau souterraine en tout point de la nappe; elle permet également de déterminer le sens de l'écoulement souterrain, le gradient hydraulique et les axes de drainage ou les lignes de courant et de là, connaître l'importance quantitative de la ressource disponible et exploitable en eau souterraine. Le secteur d'étude étant une nappe alluviale impliquant un milieu poreux drainant l'oued El-Kébir qui prend le nom du Rhumel en amont et à sa source. La nappe aquifère de cette plaine se caractérise par une abondance relative des ressources en eau au vu de la pluviosité tandis que la profondeur de la surface piézométrique se trouve à faible profondeur avec une moyenne de 10 mètres.

IV.1 Les composantes des unités hydrogéologiques

L'étude géologique conclue avec la colonne stratigraphique hydrogéologique (Figure II.10) ainsi que la description stratigraphique et les résultats géophysiques antérieurs (Bourzama, 2003) ont déterminé l'existence d'un ensemble aquifère superficiel constitué d'un remplissage quaternaire alluvial détritique renfermant des graviers, des limons, des marnes et des galets. L'ensemble repose sur un substratum cristallophyllien paléozoïque imperméable. La puissance de l'aquifère atteint un maximum de 40m au niveau de l'axe de la plaine.

Les composants des unités hydrogéologique et lithologique de la plaine alluviale d'El-Milia sont à caractère diversifié allant des sables et graviers jusqu'aux limons et argiles limoneuses et constituent un facteur déterminant quant à l'introduction des éléments polluants dans l'aquifère et à leur migration dans cet aquifère de type poreux.

IV.2 L'outil de prospection

Le principe de la méthode géophysique opérée est la prospection géoélectrique plus connue sous le sondage électrique est une technique d'exploration et d'investigation géophysique du sous-sol basée sur les variations des résistivités des différents types de roche constituant le sous-sol et cela selon la loi d'Ohm . Il s'agit de procéder par sondages électrique vertical pour mettre en évidence la succession des différents horizons stratifiées, la diversité des formations, les limites des couches et leurs épaisseurs et notamment pour la présence de nappe d'eau souterraine ; quant à l'autre procédé qui est le trainé électrique , il permet de suivre la morphologie d'une même couche du sous-sol voire même les variations latérales de faciès. dans les deux cas l'étude de la résistivité des roches cible les propriétés élastiques de la roche ,ce qui permet de distinguer les roches meubles des roches consolidées, les roches poreuses des roches fracturées et bien évidemment les formations saturées d'eau de celles arides.

L'application de ce dispositif géophysique permet également de déterminer la limite étanche ou imperméable , la nature du substratum de l'aquifère ou du mur de l'aquifère et sa géométrie .

La notion de la résistivité d'un matériau exprime son degré d'opposition au passage électrique; à l'inverse la conductivité électrique caractérise la propriété d'un corps à laisser passer le courant électrique ; cependant nous nous intéressons ici exclusivement à la conductivité électrolytique due aux liquides présents dans les roches poreuses. Les formations sédimentaires sont en général de mauvais conducteurs; Cependant la plupart des roches sédimentaires sont poreuses et contiennent de l'eau dans laquelle divers sels sont dissouts .Ces sels devenant les principaux porteurs des courants dans les sédiments.

Le procédé est basé sur le principe selon lequel les couches de terrains offrent des résistances diverses au passage d'un courant électrique. En pratique les mesures se font selon le dispositif de quatre électrodes placées en ligne A.MN.B successives , le courant envoyé dans le sol par les électrodes A et B et puis on mesure la différence du potentiel (ΔV) entre les deux électrodes centrales M et N. On obtient une résistivité (ρ). En présence d'un terrain homogène et isotrope, cette résistivité restera constante quelque soit le courant et le dispositif utilisés et lorsque le terrain n'est pas homogène on obtient une valeur différente de (ρ) à chaque mesure, cette quantité mesurée s'appelle la résistivité apparente (ρ_a); elle n'est pas une mesure moyenne. Ce n'est que dans le cas d'un sol homogène que la valeur la résistivité apparente est équivalente à la résistivité réelle.

Notant que cette étude géophysique par prospection électrique de la plaine alluviale d'El- Milia a été menée par la compagnie générale de géophysique (C.G.G,1974) et a comporté une campagne de plus d'une centaine de sondages électriques répartis sur des profils distants de 500 m. Les sondages électriques étant eux-mêmes distants de 200 m environ les uns des autres comme le montre la carte de positionnement des différents profils de sondages électriques (S.E.V) qui sont disposés transversalement à l'écoulement fluvial qui est dirigé du sud vers le nord et aussi transversalement à la disposition de la plaine alluviale explorée (Figure IV.1).

IV.2.1 L'apport de l'outil géophysique

De l'examen des sondages électriques verticaux réalisées par la compagnie générale de géophysique (C.G.G ,1974) , il a été établi une échelle des résistivités qu'on a dressé dans le tableau ci-dessous et qui a permis la mise en évidence de l'existence de passées ou lentilles alluvionnaires grossières susceptibles de donner les meilleurs débits, aussi que la détermination de la nature du substratum, et par-là de géométrer autant que possible l'aquifère pour gérer au mieux la ressource emmagasinée .

Tableau IV.1 Résistivités des différents sédiments présents dans la plaine.

Formation	Résistivité en ohm .m
Alluvions grossières	600 à 800
Alluvions grossières humides	60 à 100
Alluvions argilo-limoneuses	20 à 50
Niveaux argileux	10 à 15
Alluvions grossières profondes	100 à 150
Sables argileux	15 à 30
<u>Substratum:</u> Argiles numidiennes	04 à 10
Micaschistes et schistes	50 à 100
Calcaires marneux	50 à 60

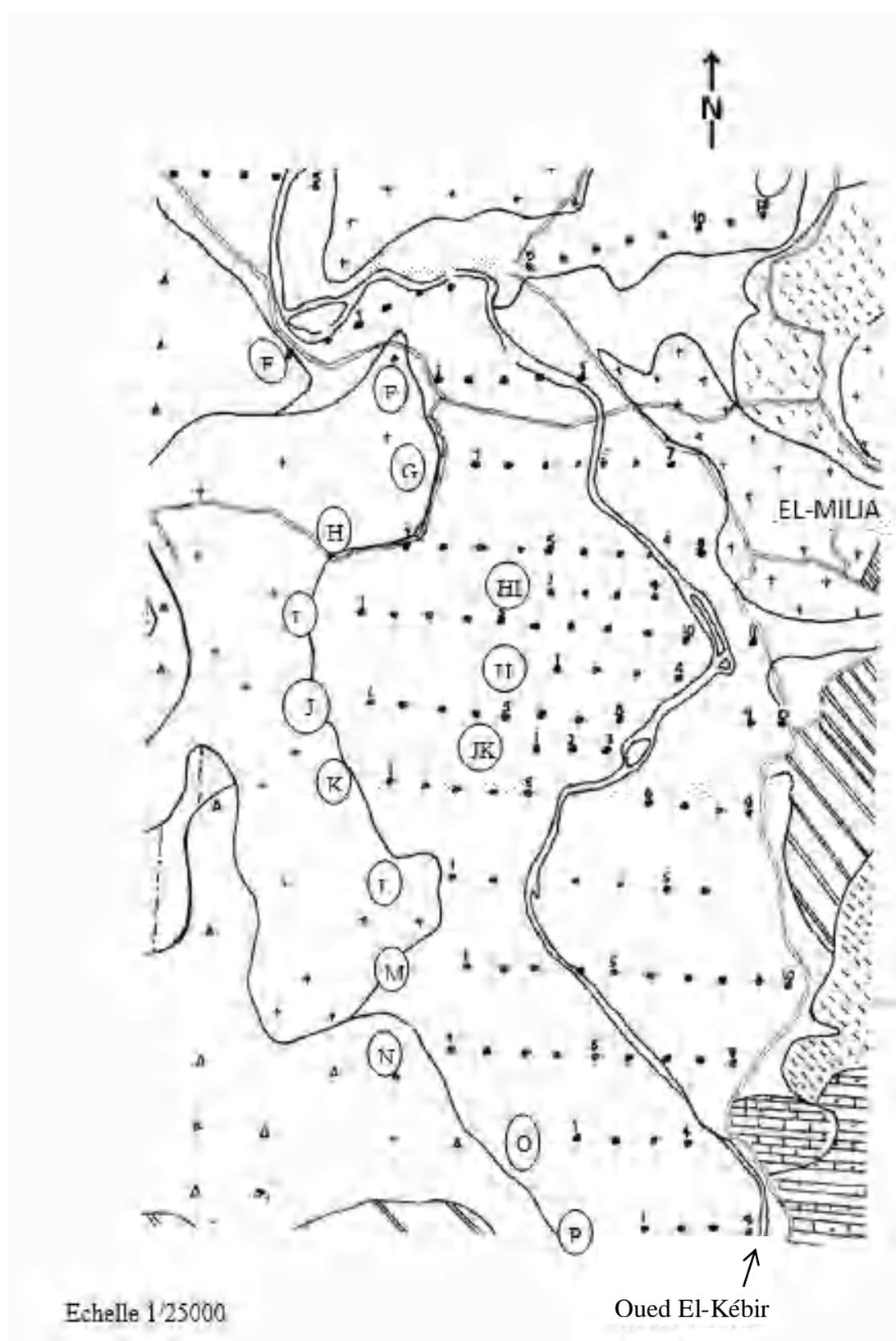


Figure IV.1 Plan de positionnement des profils des sondages électriques (C.G.G,1974)

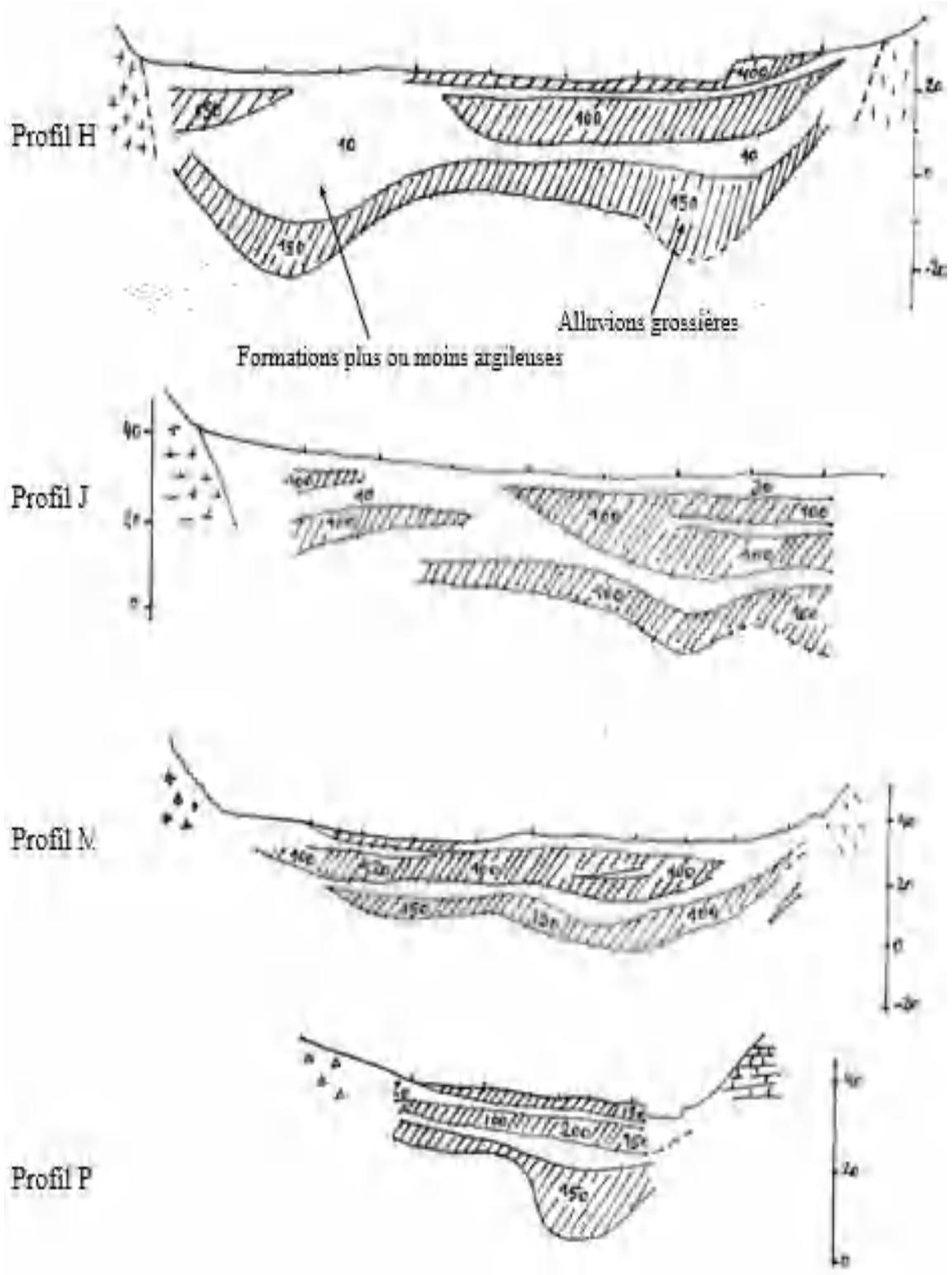


Figure IV.2 Coupes géoélectriques relatives aux profils géophysiques H , J , M et P. (voir localisation des profils sur la figure IV.1) d'après C.G.G,1974.

IV.2.1.1 Examen de la carte des résistivités en ligne AB = 40 m (figure IV. 4.)

Il est à noter que sur cette carte les niveaux secs du recouvrement alluvionnaire superficiel influencent fortement les valeurs de la résistivité apparente en ligne AB = 40 m. Néanmoins cette carte permet de montrer en général la répartition des dépôts grossiers, au moins pour le niveau supérieur. Par contre l'évolution du niveau inférieur n'est nullement traduite par cette carte ; Aussi le tracé des dépôts alluvionnaires grossiers du niveau supérieur apparaît clairement au niveau de l'axe de la vallée à hauteur de la ville d'El Milia.

a) Lecture des résultats des sondages électriques (S.E.V)

Le 6^e sondage faisant partie du profil M numéroté M6 réalisé au sud de la nappe et correspondant au point du forage F2 montre d'abord un niveau conducteur superficiel de résistivité égale à 20 ohm-m pour une épaisseur de l'ordre de 3m. correspondant à des limons puis la fraction d'une courbe en cloche montrée sur la figure correspondante, en annexe, correspond à des alluvions grossières humides épaisses de 17 m et résistantes de 50 Ω .m puis vient une inflexion décroissante sur le courbe pour une résistivité allant de 12 à 25 Ω .m. indiquant des niveaux marno-sableux (Figure IV.2.).

Le quatrième sondage appartenant au profil G numéroté G4 (Figure IV.6) réalisé au nord de la plaine à proximité du forage F13 indique 15,80 m d'alluvions grossières puis des argiles et des marnes jusqu'à une profondeur de 25 m .

Le troisième sondage du profil F (F3). (Figure IV.3) réalisé non loin du forage F14 montre que la colonne débute par des limons superficiels pour une résistivité de 60 ou 70 ohm.m. ensuite des galets, graviers et sables allant jusqu'à 23 m de profondeur et l'horizon résistant profond pourrait correspondre à des grès numidiens ou à un niveau inférieur d'alluvions grossières.

Enfin le quatrième sondage appartenant au profil E numéroté E4 réalisé tout à fait au nord de la plaine à proximité du forage F15 indique la traversée de 25 m d'argiles avant d'être abandonné puis viendrait après 30 m. de profondeur un horizon résistant qui correspondrait à un niveau gréseux. (Figure IV.3)

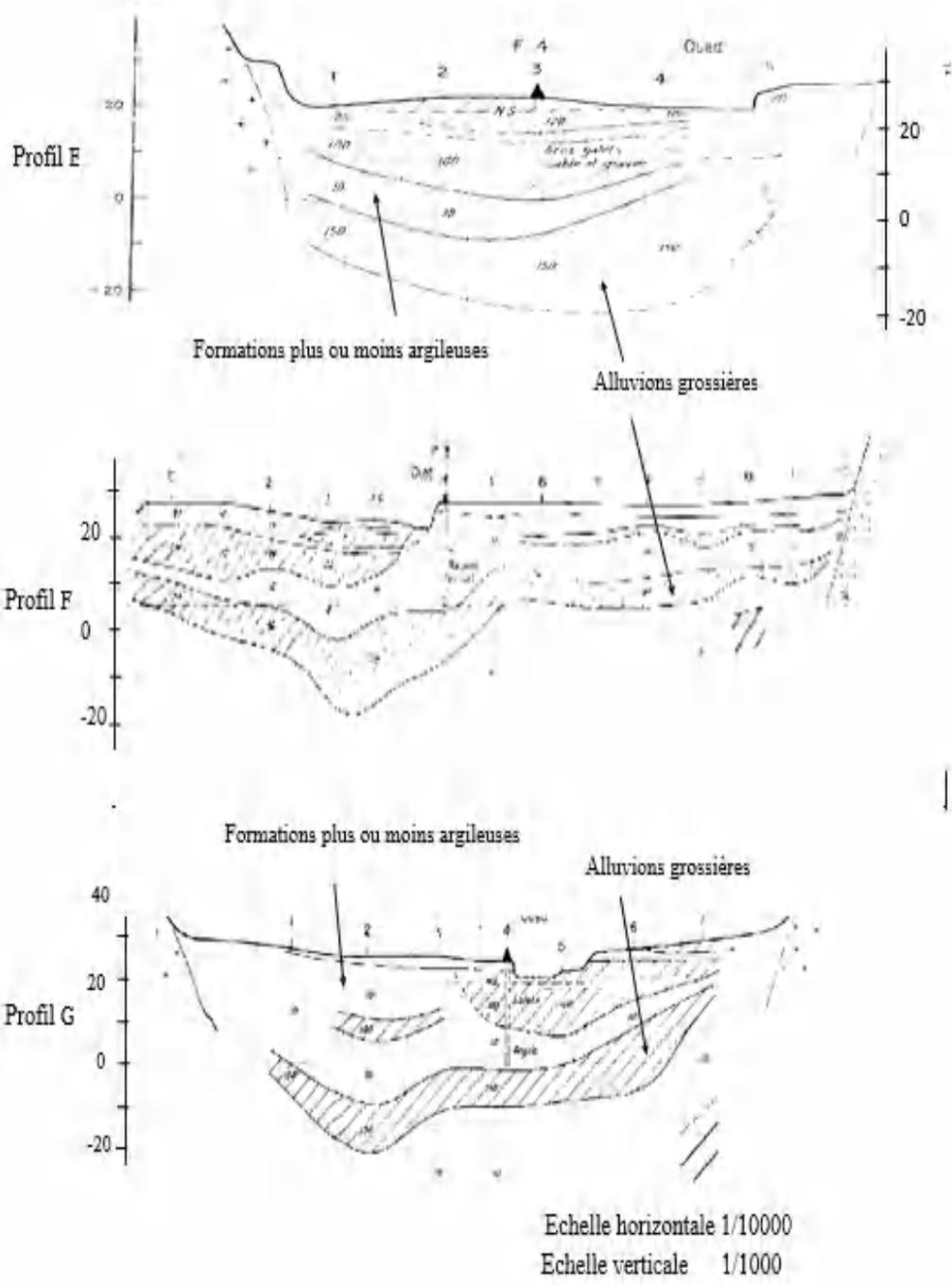


Figure IV.3 Coupes géoélectriques relatives aux profils géophysiques E , F et G.
 (voir localisation des profils sur la figure IV.1) d'après C.G.G,1974.

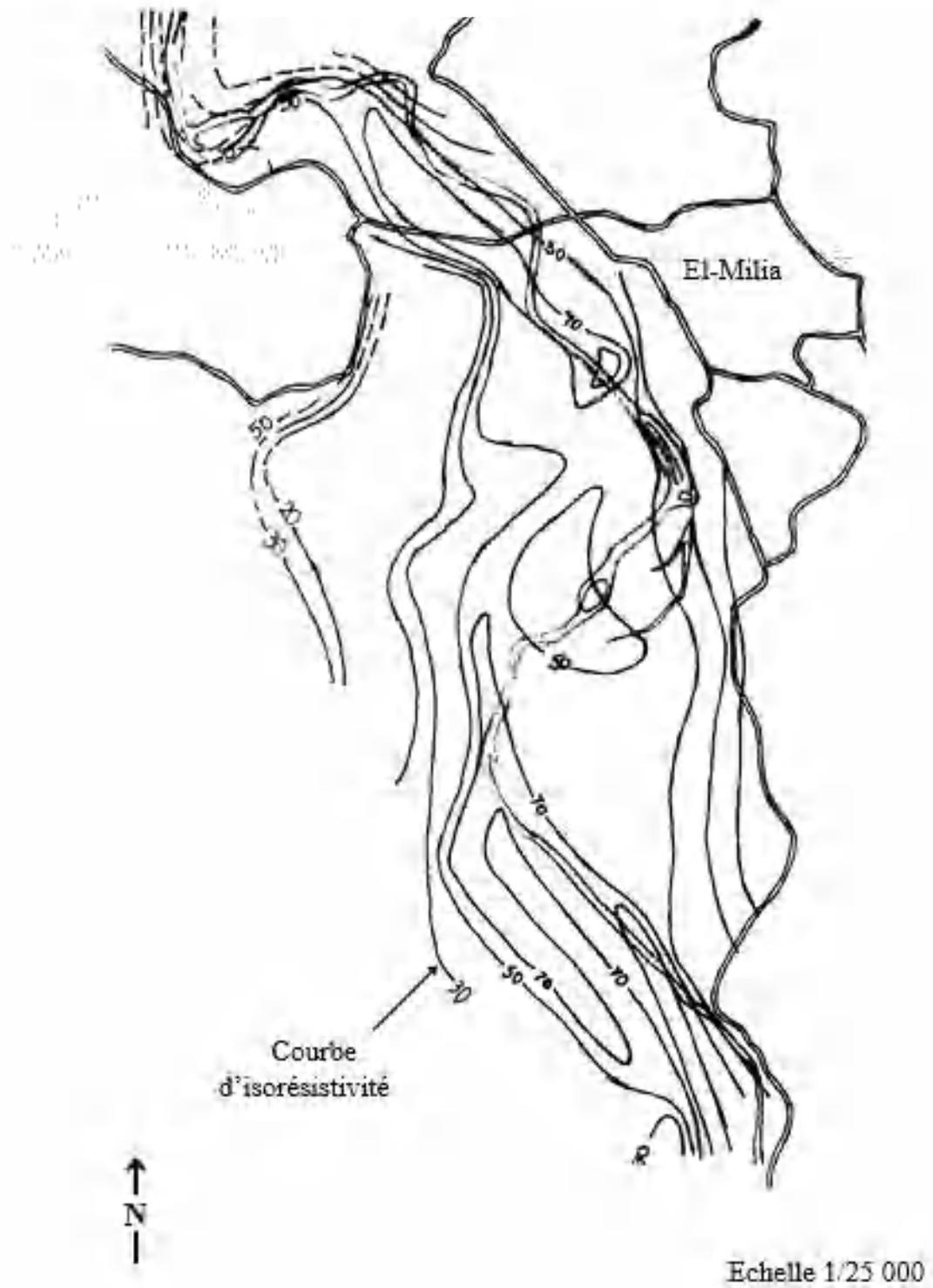


Figure IV. 4 Carte des résistivités en ligne AB = 40 m (C.G.G , 1974)

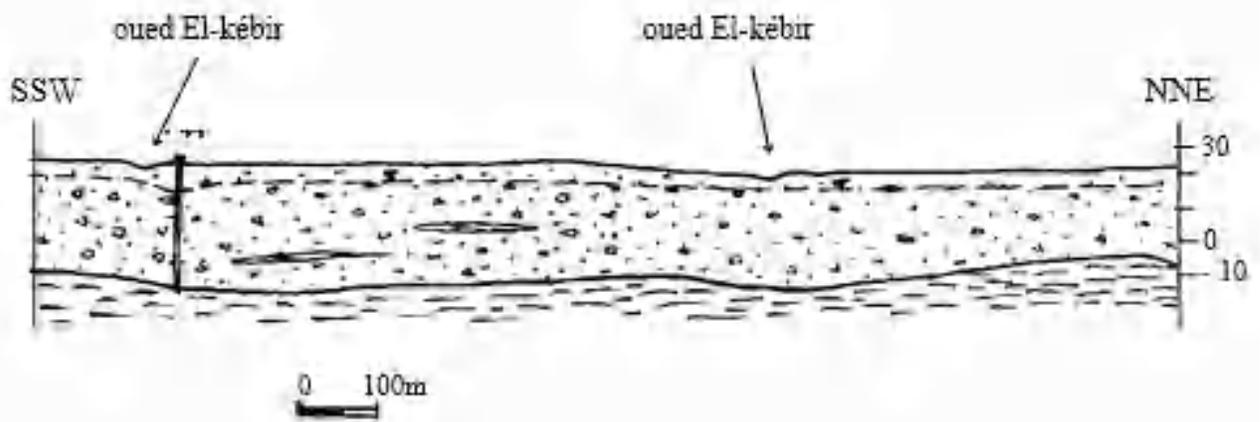
b) Lecture de la carte des résistances transversales

Par superposition de la carte d'égal épaisseur de la couche aquifère sur la carte des résistivités correspondantes on obtient la carte des résistances transversales laquelle nous renseigne sur les zones possédant les caractéristiques hydrodynamiques les plus intéressantes .

En effet, on lit sur la carte des résistances transversales une zone résistante intéressante située au sud de la plaine alluviale avec une valeur de $R_T = 4100 \Omega.m.m$ et une autre zone à hauteur d'El-Milia pour des valeur de R_T de $4000 \Omega.m.m$. traduisant donc des potentialités appréciables en ressources hydriques.

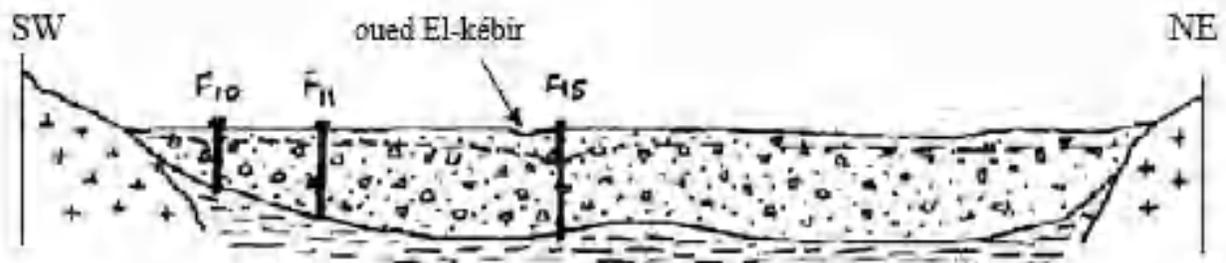
c) Carte d'égal épaisseur de recouvrement . (voir coupes AA' et BB')

L'observation de cette carte montre une variation de puissance ou de l'épaisseur des formations de recouvrement évoluant en décroissance en allant de la zone centrale de la plaine ou encore de l'axe de l'oued El-Kébir vers les reliefs encaissants tant en rive gauche qu'en rive droite. Cette variation va de l'épaisseur des formations au centre de la plaine de 15 à 20 m. vers les reliefs qui la ceinturent en s'amenuisant jusqu'à atteindre les 5 à 8 m. L'intérêt de cette carte reste évidemment le choix du positionnement d'éventuels forages pour l'exploitation de la ressource en eau souterraine.



-  Niveau piézométrique
-  Gravieres hétérogènes avec passées argileuses
-  Marnes grises par endroits argileuses
-  Arène granitique

Coupe hydrogéologique AA' (longitudinalement à la plaine)



Coupe hydrogéologique BB' (transversalement à la plaine)

Figure IV. 5 Coupes hydrogéologiques AA' et BB' (d'après C.G.G,1974.)

d) Carte du mur des alluvions grossières (Figure IV. 6)

Cette carte transpose les résultats des coupes en admettant une supposée ou suspectée deuxième nappe profonde ou alors une puissante et importante lentille argileuse, c'est-à-dire en incluant le niveau résistant inférieur dans les alluvions. Comme nous venons de le voir, il y a concordance entre les côtes en aval du seuil et en amont du seuil d'El Ancer (plaine de l'oued Tassif) c'est à dire à l'aval de la plaine d'El-Milia.

Par contre, cette éventualité nous amène d'une part à un surcreusement, atteignant la côte - 20 mètres en amont du resserrement de mechta Tanefdour (profils E, F, G, H). D'autre part à un dédoublement de l'axe de la vallée fossile, l'axe rive gauche correspondant au niveau profond sous épais recouvrement argileux que nous avons signalé sur l'ouest des profils G jusqu'à I, et qui se poursuivrait vers le sud jusqu'au profil N sans qu'on puisse en expliquer l'origine.

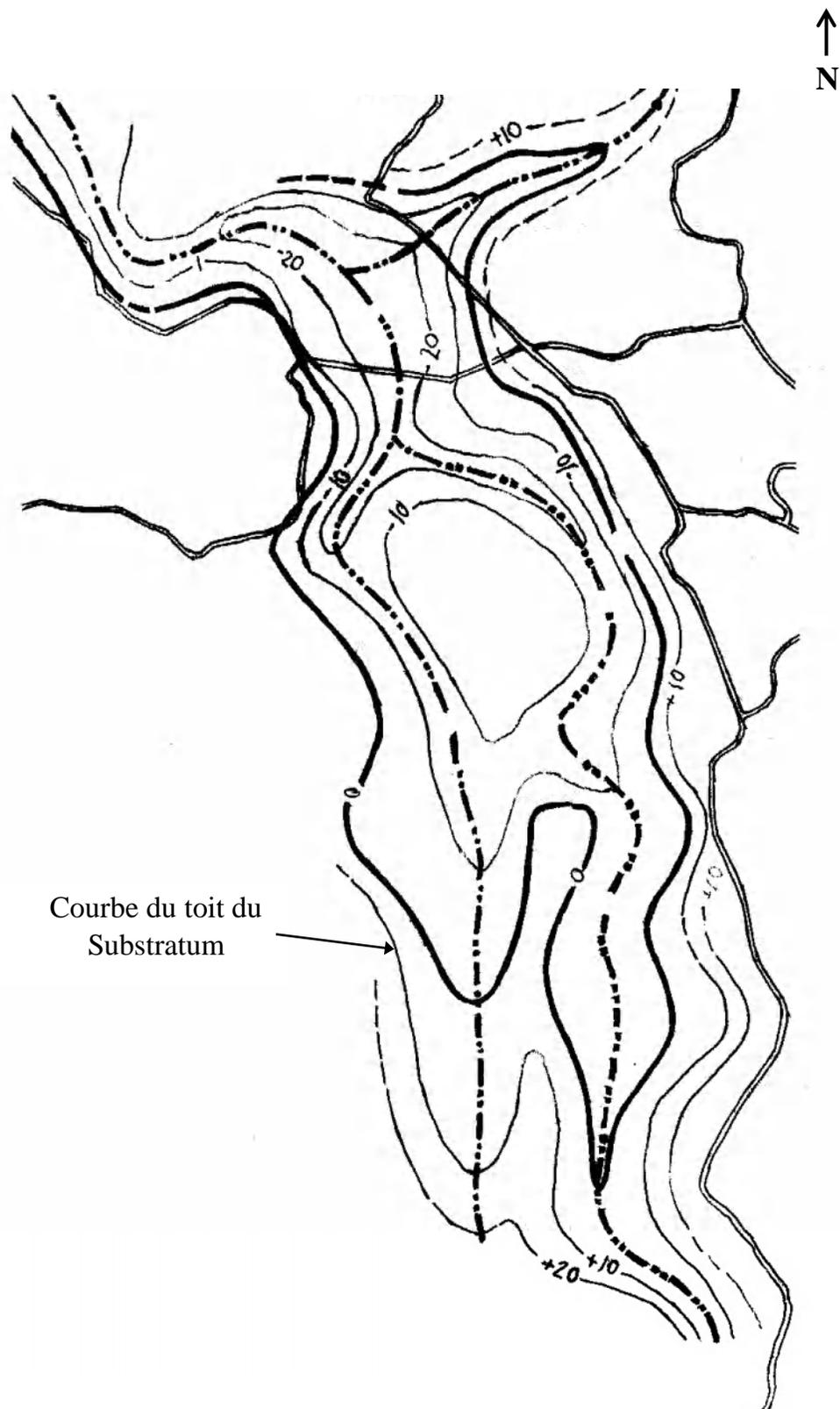


Figure IV. 6 Carte du mur des alluvions grossières (d'après C.G.G,1974.)

e) Interprétation des coupes géoélectriques

Les coupes géoélectriques ont été réalisées par la compagnie générale de géophysique dans le but de déterminer la nature lithologique des formations et leurs aptitudes à être considérées comme aquifères. Ces coupes ont pour échelle horizontale 1/10000 et pour échelle verticale 1/1000.

Toutes les coupes montrent , sans exception , l'existence de deux niveaux résistants, l'un supérieur à 70 - 100 Ω .m., l'autre inférieur à 100-150 Ω .m. L'allure du mur de ce dernier semble indiquer que ce niveau appartient bien au remplissage alluvial. son allure régulière en " fond de bateau " tout le long de la plaine permet difficilement de l'attribuer à un banc de grès numidiens.

Les profils L jusqu'à P, en amont, là où le numidien a peu de chances d'exister, sont bien caractéristiques de cette allure du remplissage alluvial.

L'épaisseur totale des alluvions atteindrait dans cette zone 30 à 35 m, le niveau argileux intercalaire n'ayant que quelques 5 m d'épaisseur.

Coupe géoélectrique G . (Figure IV.3)

Sur les profils G à K, on voit apparaître d'autres niveaux résistants, notamment sur la rive gauche, et parfois à des profondeurs souvent trop grandes pour pouvoir les assimiler aux alluvions. C'est le cas notamment aux sondages électriques K3, K4, I3 à I5, H2, H3, et G1 à G3. Le niveau résistant se trouve là sous quelques 30 m. d'argiles conductrices. A-t-on affaire ici réellement à des passées gréseuses numidiennes ou encore à des dépôts alluviaux grossiers ou mieux à d'anciens cônes de déjection ? il est difficile en l'absence de forages profonds et de données sismiques dans cette zone de répondre à cette question.

Coupes géoélectriques E à F. (Figure IV.3)

Sur les profils E à F , les niveaux résistants se situent à nouveau à des profondeurs telles qu'on peut les attribuer en totalité au seul remplissage alluvial. L'épaisseur totale de ce remplissage serait encore de l'ordre de 30 à 35 m, sauf en certains points ou elle dépasserait 40 m notamment les sondages électriques du forage F3 ou F 14 , F4, E3 , E4 et D3.

Dans la vallée de l'oued Bou-Siaba , où le profil E a été prolongé, où suivrait la prolongement du niveau inférieur qui irait en s'amincissant en remontant vers l'amont de cet oued à quelques mètres, ce qui nous laisse penser précisément qu'on a bien affaire à un niveau alluvial et non à un banc de grès numidiens. Si cette hypothèse est exacte, le remplissage alluvial dans cette vallée affluente serait de l'ordre de 20 m.

IV.2.1.2 Conclusion aux résultats géophysiques

Le résultat principal de cette étude est d'avoir mis en évidence un horizon résistant profond, dont on ne peut affirmer qu'il appartient au remplissage alluvial ou aux grès numidiens. Plusieurs points semblent concorder pour nous faire admettre que la profondeur du substratum serait autour d'une quarantaine de mètres.

Il convient donc en premier lieu de s'assurer des caractéristiques hydrauliques par exemple à l'endroit où ont été réalisés les tirs électriques K7 , A2, B3, B4 et à l'aval de la plaine , F4, L5, M8, O3 .

Par contre aux endroits où l'on a affaire à une formation du substratum, il faudrait bien entendu se limiter au niveau grossier supérieur où la profondeur est de 20 à 25 m par exemple aux points B4 , B5 à l'aval de la plaine , C5, D5, E4, H4, I9 et surtout au point J6 où la représentation de ce niveau supérieur est la plus importante.

Notons cependant qu'il faut tenir compte des zones inondables qui s'avèrent généralement intéressantes par exemple en rive gauche du côté des profils H, I et J.

IV.2.2 Caractéristiques de l'aquifère

Articulé sur la géologie comme fond de base et sur la géophysique pour l'identification de l'aquifère pour ce qui est de son extension horizontale et verticale et sa morphologie , l'hydrogéologie cible le potentiel en ressources en eau disponible et exploitable .

Dans la plaine , objet de cette étude , les eaux souterraines de cet aquifère de type poreux alluvial sont utilisées pour des usages domestiques, agricoles et industriels.

IV.2.2.1 La porosité de l'aquifère

La porosité de l'aquifère contenue dans cette nappe alluviale de nature intergranulaire est formé par des dépôts hétérogènes continentaux. Ces dépôts sont constitués du graviers, de sables et de galets dans lesquels s'intercalent plusieurs passées argilo-marneuses de faible épaisseurs.

IV.2.2.2 Limites et épaisseurs de l'aquifère

L'aquifère de la plaine alluviale de l'oued El Kébir à hauteur d'El-Milia connaît son extension maximale au niveau de l'assiette dite <<zone économique franche Bellara>> situé en rive gauche de l'oued d'une part, et d'autre part cette extension horizontale est également importante en rive droite faisant le champs de captage qui alimente la ville d'El-Milia et sa périphérie immédiate. Cet aquifère s'allonge Sud-Nord autour de l'oued El-kébir avec 1500m de large et environ 5000 m de long. Quant à la profondeur des formations aquifères , elle atteint les 45 mètres maximum en zone axiale de la vallée et s'amenuise vers les reliefs qui l'entourent. En fait cet aquifère s'étend jusqu'aux piémonts des reliefs qui ceinturent la plaine. Il est limité par des flancs des djebels Chouf et oued Adder par l'ouest, par djebel Tanefdour par le nord qui ,entre ces deux monts , permettant à l'oued el kébir de se détacher pour finir sa course dans la mer, et enfin à l'Est la plaine est limitée par dj Benkara et Ouled Salah.

Donc la puissance maximale de l'aquifère avoisine les 45 mètres au centre de la plaine et s'amincit progressivement vers les reliefs notamment à l'est et à l'ouest (Figure IV.5).

Cependant on note d'après l'étude géophysique menée par le CGG que cette épaisseur diminue considérablement par endroits au centre de la plaine en raison de bombement du substratum cristallophyllien çà et là.

IV.2.3 La piézométrie

La carte piézométrique reste la synthèse la plus intéressante de l'étude hydrogéologique : elle permet en particulier d'apprécier de façon générale les conditions d'écoulement souterrain ainsi que les conditions d'alimentation et de drainage et la variation des réserves (Gilli et al. 2012) . La morphologie de la surface piézométrique permet la détermination de la dynamique des eaux souterraines , du sens de l'écoulement souterrain , des foyers d'alimentation des nappes , des zones de drainage ainsi que la localisation des potentialités hydriques de l'aquifère.

IV.2.3.1 Chronique piézométrique

Les mesures piézométriques enregistrées lors des deux campagnes de mesures effectuées toutes deux au mois de décembre, en début de la période des hautes eaux , l'une en l'an 2001 (Figure IV. 7) et l'autre en celui de 2021 (Figure IV. 9) ont permis l'élaboration de deux cartes piézométriques espacées de deux décennies pour la nappe de la plaine alluviale d'El-Milia , ajouté à celà une autre carte piézométrique formalisée dans le cadre de l'article en fin d'année 2011. La lecture contradictoire de la piézométrie de ces cartes offre la possibilité d'une analyse

comparative qui débouche naturellement sur la discussion de l'évolution de la morphologie piézométrique suivante :

au niveau de la partie Sud-Est de la carte piézométrique de l'année 2001 (Figure IV.7) les courbes isopièzes sont organisées en un œil piézométrique dépressif justifié par l'emplacement d'une batterie de forages constituent le champs de captage pour l'alimentation en AEP de la localité d'El-Milia , si on regarde cet endroit sur la carte piézométrique 10 ans plus tard parue en article (Figure IV.8) on s'aperçoit que ce cône dépressif a quelque peu migré vers le Sud du fait du fonçage de nouveaux puits à pompage intensif dont un qui commercialise l'eau ; à la même période en début de hautes eaux de l'an 2021 ce même œil dépressif a encore migré vers l'Est toujours pour les mêmes raisons évoquées ; par ailleurs la lecture comparative des deux cartes piézométriques de 2001 et 2011 laisse apparaître un écoulement souterrain généralisé du Sud-Ouest et du Sud-Est vers le Nord laissant apparaître un axe de drainage conforme à l'écoulement généralisé de l'oued El-Kébir (Sud-Nord) et ceci confirmerait l'alimentation de la nappe par les reliefs des flancs Est et Ouest . De là , il ressort clairement une contribution à la reconstitution de la recharge de la nappe par les reliefs dominant la plaine par l'Est et par l'Ouest exprimée particulièrement sur la carte de l'année 2021 (Figure IV.9) par l'existence d'un dôme piézométrique en rive gauche de l'Oued El-Kébir (à l'Ouest) et d'un autre dôme à l'Est avec des côtes piézométrique de 31 à 39 mètres qui seraient bien confirmés si l'on se réfère à la coupe géophysique relative au profil P et M (Figure IV.2) par la rareté des passées argileuses et plutôt par l'abondance d'alluvions grossières telles que les graviers et sables limoneux pour des valeurs de résistivité de 150 Ω .m. Remarquons également que le dôme piézométrique situé à l'Ouest de la carte n'est pas très loin du pied des reliefs où les puits sont pratiquement inexistantes . Au centre de la carte les courbes isopièzes deviennent espacées traduisant un gradient hydraulique faible tandis qu'au Nord elle se resserrent autour d'un nœud où le pompage intensif de plusieurs puits paysans pratiquant l'élevage bovin et également des puits pour l'alimentation humaine.

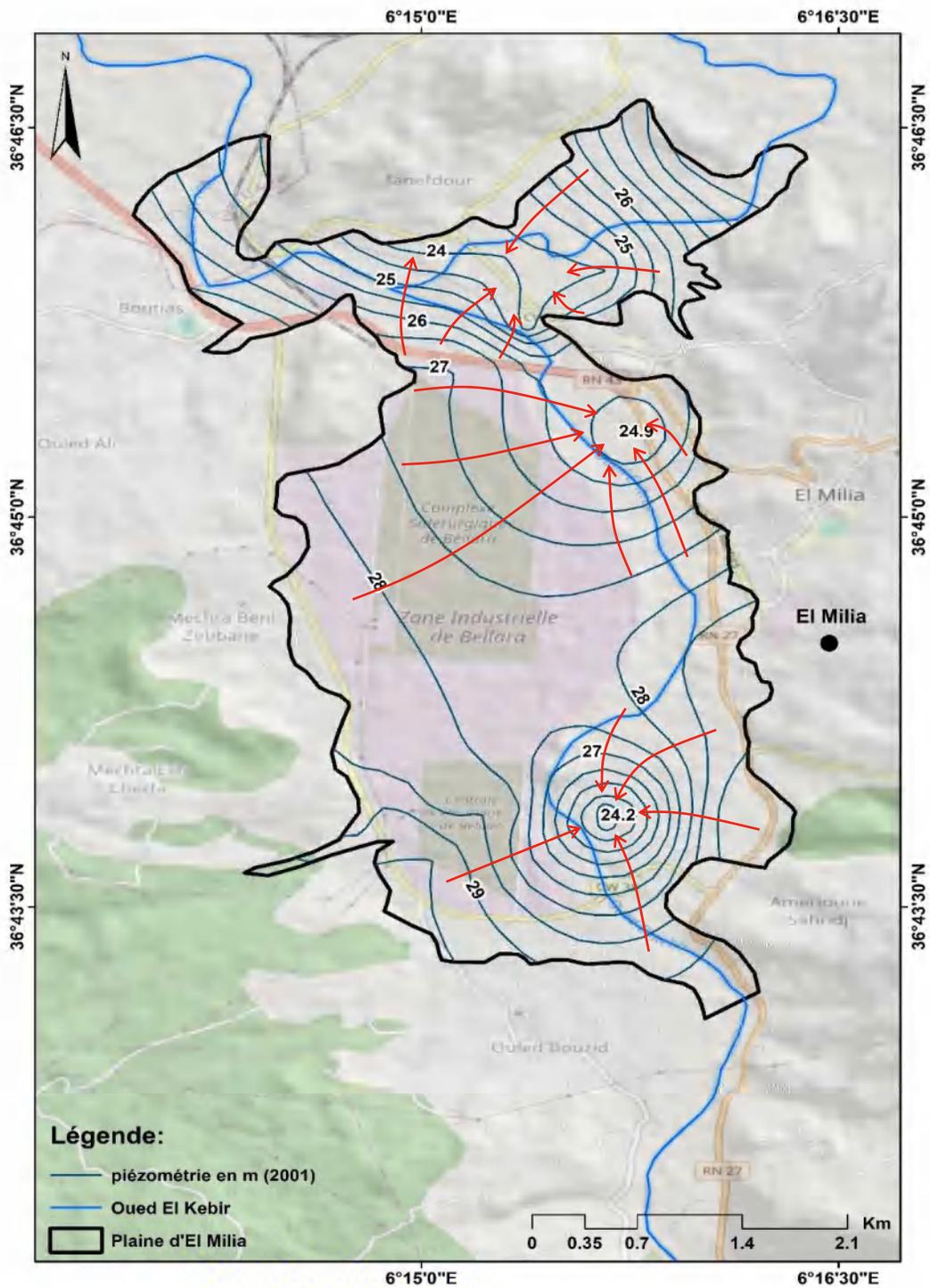


Figure IV. 7 Carte d'isopièzes de l'année de 2001 (en début de la période de hautes eaux)

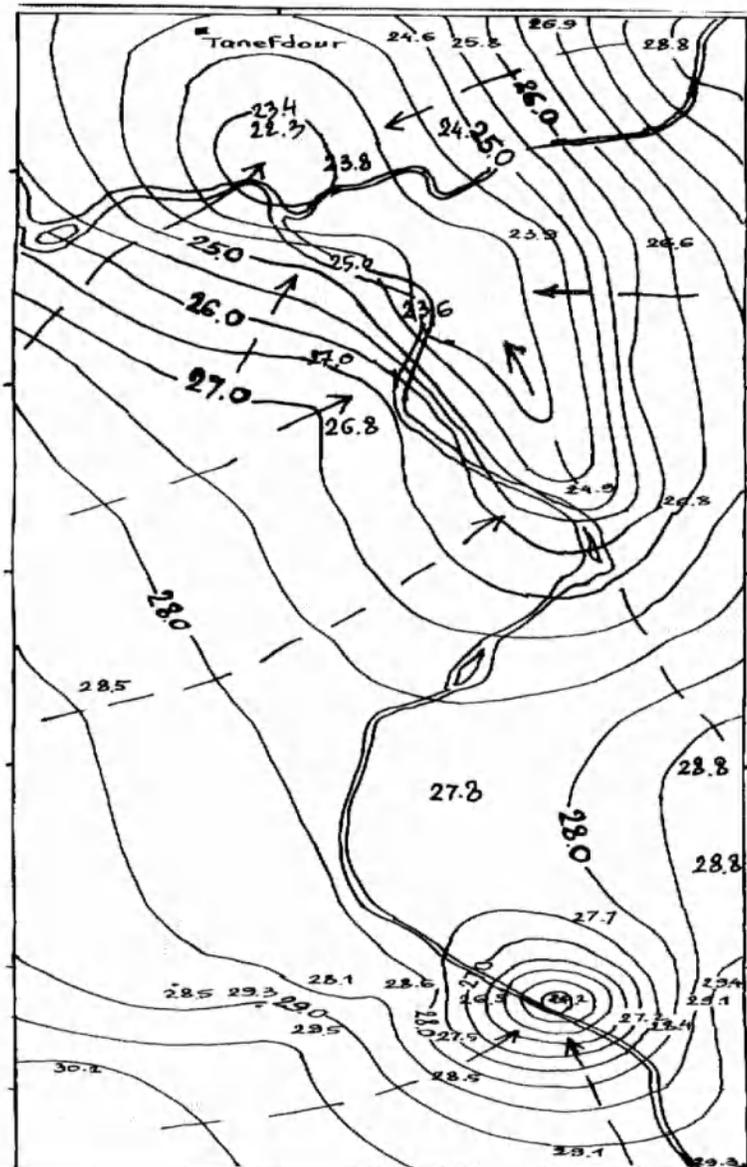


Figure IV. 8 Carte d'isopièzes de l'année de 2011 (en fin novembre) en début de la période de hautes eaux) publiée en article.

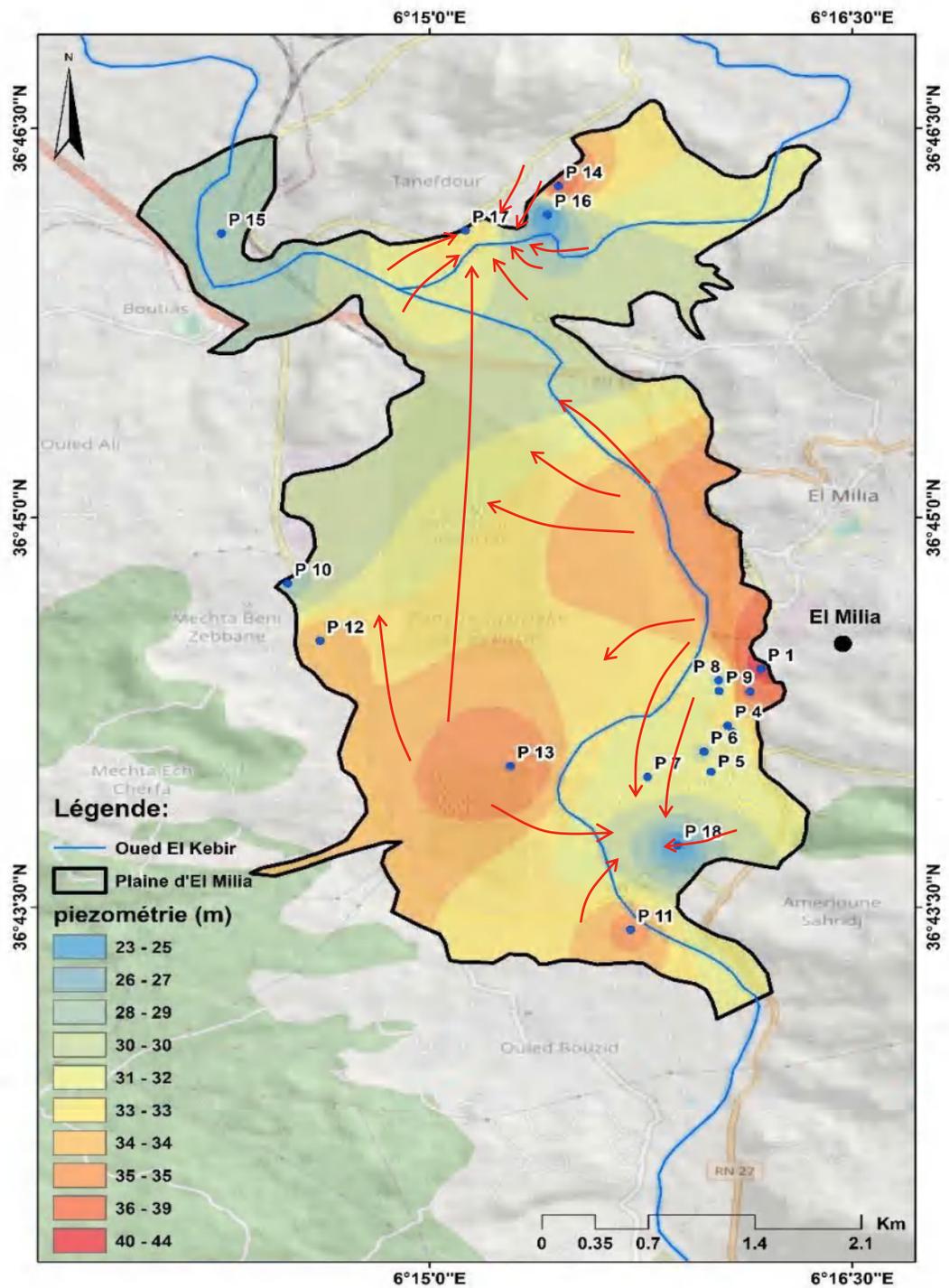


Figure IV. 9 Carte piézométrique de l'année 2021 (en début de la période de hautes eaux)

IV.3 Conclusion

La plaine d'El-Milia , objet de cette étude abrite un aquifère superficiel de type nappe libre de faible profondeur allant de 3 à 15 mètres . Cette nappe est intensément exploitée pour les besoins humains mais aussi pour l'élevage et l'agriculture du fait qu'elle soit l'unique dans le secteur ; son gradient hydraulique ou bien ses pertes de charge par unité de distance est moyennement faible . L'alimentation de cet aquifère s'effectue par infiltration des précipitations à hauteur de 21 % de la lame d'eau précipitée selon le bilan excédentaire . Ajouté à cela , l'aquifère se recharge aussi par des apports déchargés des massifs ou reliefs ceinturant cette plaine par l'ouest et par l'est . Donc les meilleurs stocks d'eau devraient être cherchés du côté de l'Est de la nappe au pied d'El-Milia (Figure IV. 9) et également au sud ouest et au sud de la plaine .

L'observation des cartes piézométriques en figures IV.7 , IV.8 et IV.9 nous permet de dégager trois zones différentes de par la profondeur piézométrique : au nord-est de la plaine de 4 à 4,5 mètres ; aux environs du complexe sidérurgique (A.Q.S) une profondeur piézométrique d'une dizaine de mètres et une troisième zone à l'est de la plaine une profondeur piézométrique de 2 à 3 mètres.

Conformément à l'écoulement de l'oued El-Kébir , l'écoulement souterrain de la nappe se fait Sud-Nord avec des potentialités appréciables en ressources d'eau au vu de sa faible profondeur qui présente d'ailleurs un inconvénient majeur en matière de vulnérabilité à la pollution , ce qui sera développé ultérieurement à travers les deux chapitres suivants . En somme il apparait clairement que les apports de recharge de la nappe par les reliefs limitrofs sont au sud-ouest et à l'est de la plaine (Figure IV.7) où la côte piézométrique avoisine les 35 mètres pour des profondeurs d'eau de quelques 3 à 5 mètres.

Chapitre V : Les Caractéristiques Hydrogéochimiques

Introduction

L'hydrochimie met en évidence les interactions de l'eau souterraine avec la roche-magasin dans laquelle elle séjourne d'où l'acquisition de son chimisme.

Le faciès chimique des eaux souterraines est le reflet de la nature lithologique des formations traversées, de la roche contenant l'eau et du temps de séjour de l'eau dans le réservoir.

Cette composition chimique de l'eau souterraine est conditionnée également de certains facteurs physico-chimiques tels que la température, les conditions climatiques, les activités anthropiques, les interactions des eaux souterraines avec les eaux de surface ou encore les échanges entre différents aquifères. Les arguments géochimiques permettent d'aboutir à la compréhension de la circulation des eaux souterraines sur la base des mécanismes d'acquisition des ions et leur répartition ou leur évolution spatiale dans l'aquifère.

Pour cela il a été effectué un échantillonnage d'eau en différents points distribués sur la plaine alluviale d'El-Milia en début de la période de hautes eaux autant que possible de façon homogène et représentative et sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matière en suspension, etc ..) en vue d'effectuer les analyses chimiques des eaux échantillonnées au labo afin de révéler les éléments majeurs tels que le Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^- ainsi que les éléments métalliques en traces tels que le Fe, Cu, Ni, Cd et le Zn.

Les résultats ont montré une large variation des concentrations des éléments chimiques dépassant les normes requises dans bon nombre de points de la nappe alluviale.

Pour illustrer la distribution spatiale de ces variations il a été établie une cartographie montrant la variabilité du chimisme des eaux souterraines de la nappe étudiée.

Dans ce chapitre il est développé une synthèse des principales caractéristiques physico-chimiques et hydrogéochimiques des eaux de la nappe aquifère

Matériels utilisés et mode d'analyse entrepris

La stratégie de choix des points d'échantillonnage a été de prélever à l'amont comme à l'aval de la plaine en rive droite et en rive gauche de l'oued El-Kébir, ainsi qu'en amont et juste en aval de chaque unité industrielle potentiellement source de pollution ce qui nous permettra d'établir des stations comparatives.

Pour les conditions et le mode d'échantillonnage des eaux de la nappe ,elles ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène pour être analyser chimiquement. Ces flacons ont été préalablement rincés à l'eau distillée d'abord puis à l'eau à prélever ensuite avec la précaution d'être remplis à ras le bol (Rodier, 1996) . Le transfert des échantillons a été immédiatement acheminé vers le laboratoire d'hydrogéologie de la faculté des sciences de la terre de l'université constantine1.

Pour ce qui est des techniques de mesure et d'analyse et conformément aux techniques de mesure et d'analyse standards développées dans (Rodier ,1996) , On a mesuré les paramètres physico-chimiques cités ci-dessus et avons procédé aux analyses développées ci-dessous de la manière qui suit :

A l'aide d'une sonde électrique il a été effectué des mesures in situ de profondeur d'eau dans chaque ouvrage de captage d'eau, ainsi que la prise des coordonnées géographiques du point d'eau , latitude X , longitude Y et l'altitude Z à l'aide d'un GPS type Garmin Montana 650 de même qu'il a été mesuré sur site le pH, la température et la CE immédiatement après le prélèvement de chaque échantillon (Tableau V.4) le pH et la température ont été pris à l'aide d'un pH mètre suisse de marque Metrohm Heriso de type pH-Meter E520 et la CE avec un conductimètre de terrain de marque Hanna de type HI 9835.

Quant aux analyses chimiques des eaux au laboratoire , elles ont été effectuées par volumétrie pour chaque échantillon pour les éléments HCO₃, SO₄, Cl, Ca, Mg.

Pour l'analyse du Na et celui des métaux lourds Fe, Cu, Ni, Zn, Cd , il a été procédé par spectrophotométrie à absorption atomique.

Tableau V.5 Coordonnées et piézométrie des points d'eau échantillonnée au début de la période de hautes eaux.

échant	X	Y	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m)	Cote pièzo(m)
1	N36°44'41,61"	E6°16'17,18"	256 208	4 069 538	48	44,5
2	N36°44'19,72"	E6°16'08,17"	256 146	4 069 379	40	36
3	N36°44'10,51"	E6°16'04,45"	256 044	4 069 095	35	31
4	N36°44'08,02"	E6°16'03,48"	256 021	4 069 140	36	32
5	N36°44'01,21"	E6°15'51,91"	255 923	4 068 813	35	31
6	N36°44'05,81"	E6°15'55,08"	255 890	4 068 958	34	30
7	N36°44'00,34"	E6°15'58,06"	255 587	4 068 787	35	31,5
8	N36°44'22,35"	E6°16'01,55"	255 983	4 069 463	34	29,3
9	N36°44'19,90"	E6°16'01,53"	255 981	4 069 388	35	31
10	N36°44'44,57"	E6°14'31,57"	253 726	4 070 220	37	28
11	N36°44'24,77"	E6°15'42,64"	255 466	4 067 702	37	34
12	N36°44'31,53"	E6°14'36,64"	253 885	4 069 806	36	33,5
13	N36°44'02,63"	E6°15'17,18"	254 864	4 068 884	41	35
14	N36°46'20,70"	E6°15'22,45"	255 119	4 073 139	40	37,5
15	N36°46'05,71"	E6°14'15,52"	253 448	4 072 721	35	27
16	N36°40'14,63"	E6°15'19,56"	255 056	4 072 937	27	23
17	N36°46'06,29"	E6°15'07,56"	254 736	4 072 704	36	32,4
18	N36°43'44,64"	E6°15'53,06"	255 732	4 068 294	39	24
19	N36°46'26,71"	E6°15'35,72"	255 451	4 073 314	29	27,5
Bassin1	N36°44'50,30"	E6°15'57,02"	255 896	4 070 334	23	-
Bassin2	N36°44'50,30"	E6°15'57,02"	254 864	4 070 334	23	-
Oued	N36°44'50,68"	E6°15'57,08"	254 864	4 070 334	23	-

Nota bënë : les bassins 1 et 2 sont 2 collecteurs d'effluent de la tannerie à traiter

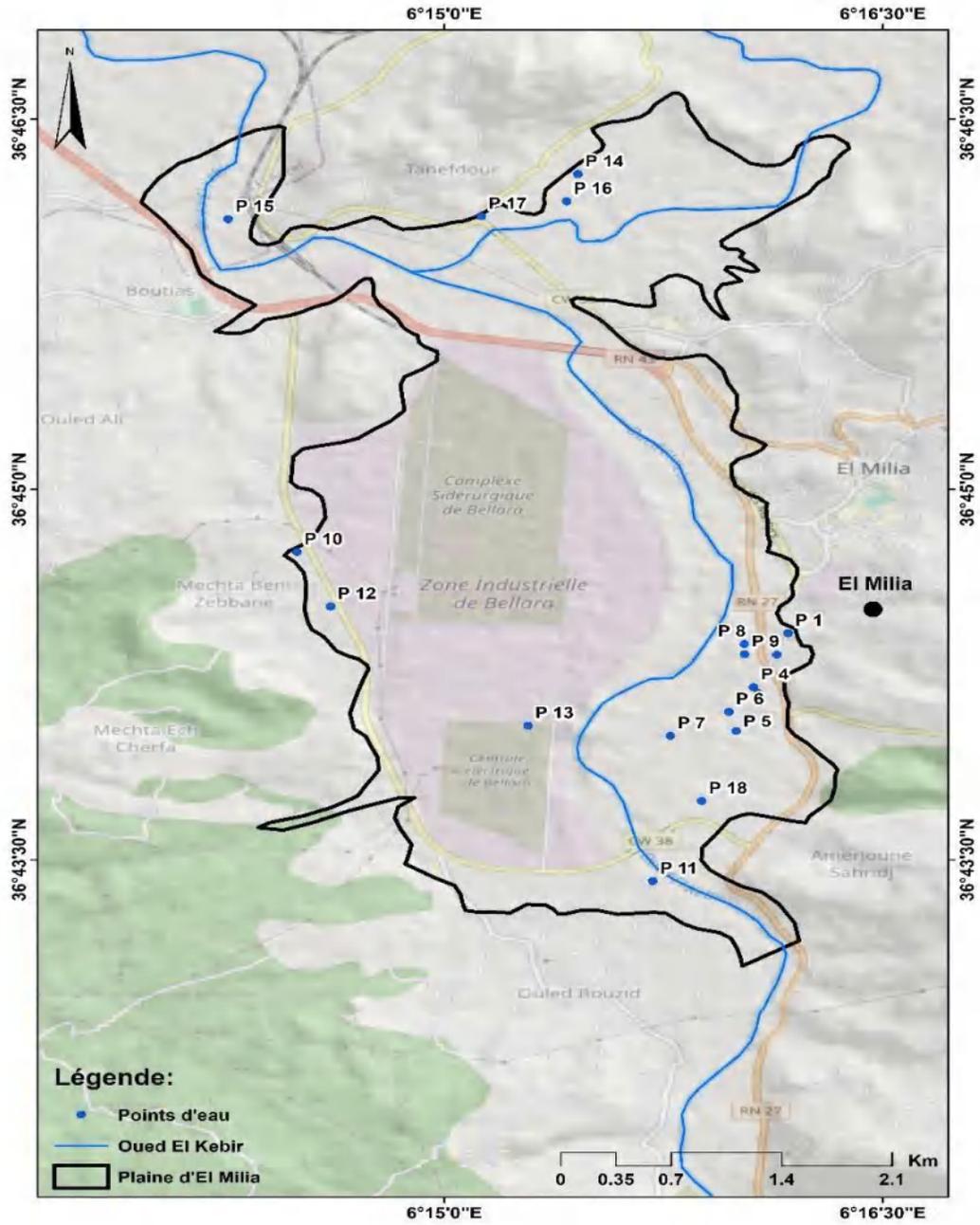


Figure V.1 Carte de dispersion des points d'échantillonnage d'eau

V.1 Etude des paramètres physico-chimiques

V.1.1 Etude des paramètres physiques

V.1.1.1 La température

La température de l'eau est un facteur déterminant dans beaucoup de processus tels que la solubilité des sel et surtout des gaz dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductibilité électrique , dans l'acceptabilité de certaines substances inorganiques et contaminants chimiques ; elle intervient également dans la détermination du potentiel hydrogène pH pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels.

La température varie en fonction de celle de l'air (T° extérieure) , de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol et de la nature lithologique. Le gradient géothermique est de 1 degré Celsius par 33 mètres de profondeur , Il en découle que plus les eaux sont profondes et plus elles sont chaudes. Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision (Rodier, 2009) .

La mesure de la température s'effectue in situ. On note l'absence totale d'eau chaude sur le terrain d'étude. Les températures mesurées sont comprises entre $17,3^{\circ}$ et 23° et par conséquent elles sont considérées comme eaux de bonne qualité selon la classification de la qualité des eaux dressée par l'OMS à partir du seul critère température . (Tableau n° V.4)

Tableau V.1 Classification OMS de la qualité des eaux selon la température

Qualité de l'eau	Valeur de la température (°C)
Excellente	$20^{\circ} < T < 22^{\circ}$
Acceptable	$22^{\circ} < T < 25^{\circ}$
Mauvaise	$25^{\circ} < T < 30^{\circ}$
Eau polluée	$T > 25^{\circ}$

V.1.1.2. Le potentiel Hydrogène pH

Ce paramètre mesure la concentration des ions H^+ de l'eau et évalue l'acidité et l'alcalinité de l'eau sur un échelle allant de 0 à 14 de l'acide vers le basique de sorte que la neutralité soit égale à 7, le pH conditionne bon nombre d'équilibre physico chimique. Par définition le pH est le cologarithme ou l'inverse du logarithme de la concentration en ion H^+ , le pH varie en fonction de la force ionique :

Pour un milieu acide $(H^+) > (OH^-) \Rightarrow pH < 7$

Pour un milieu neutre $(H^+) = (OH^-) \Rightarrow pH = 7$

Pour un milieu basique $(H^+) < (OH^-) \Rightarrow 7 < pH < 14$

Cependant le pH des eaux de la nappe étudiée bascule plutôt vers la basicité ou l'alcalinité avec des valeurs de pH oscillant entre 7,4 et 8,3 pour les échantillons d'eau prélevée.(Tableau V.4)

V.1.1.3 La conductivité électrique - CE (σ)

La notion de conductivité électrique traduit la capacité de l'eau à conduire le courant électrique entre deux électrodes métalliques de 1 cm^2 de surface distantes de 1 cm l'une de l'autre et elle s'exprime en micro Siemens par cm soit $\mu\text{S.cm}$. Aussi les matières dissoutes (solutés) dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargées électriquement et donc la CE permet de quantifier les sels dissous dans l'eau, dans notre cas on constate que la CE mesurée sur les 19 échantillons prélevés est comprise entre 1100 et 1800 $\mu\text{S.cm}$ pour la quasi-totalité de ces échantillons d'eau, ce qui veut dire que la teneur en sels dissous est appréciable puisque la conductivité électrique d'une eau augmente avec la concentration des ions en solution .(Tab.V.7)

Tableau V.2 Normes des degrés de pollution en termes de potentiel hydrogène (pH), conductivité électrique (CE) .

Classe	Pollution acceptable	Pollution modérée	Pollution serieuse
pH	de 6,5 à 8,5	de 6 à 6,5 et de 8,5 à 9	$6 > pH > 9$
CE	$< 750\ \mu\text{S/cm}$	$< 1500\ \mu\text{S/cm}$	$> 1500\ \mu\text{S/cm}$

V.1.1.4. Dureté et alcalinité des eaux

L'acidité d'une eau correspond à la présence d'anhydrite carbonique libre, d'acide et des sels d'acide fort et de base faible. L'eau à analyser doit être conservée de préférence dans des flacons en polyéthylène et l'analyse doit être pratiquée dans les 24 heures après le prélèvement.

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bicarbonate, carbonate et hydroxyde.

La dureté de l'eau traduit la présence des sels des ions alcalino-terreux dans l'eau en l'occurrence le Ca et le Mg cela définit le titre hydrotimétrique (TH) avec :

$$\text{TH}(\text{°F}) = ([\text{Ca}^{++}] + [\text{Mg}^{++}]) \times 5 \text{ avec } [\text{Ca}^{++}] \text{ et } [\text{Mg}^{++}] \text{ en m.éq.l}^{-1}$$

Le titre alcalimétrique (TA) et le titre alcalimétrique totale (TAC) traduisent l'alcalinité de l'eau qui correspondent à la présence d'ion OH^- , CO_3^{2-} , et HCO_3^-

$$\text{TA} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \text{ en m.éq. l}^{-1}$$

$$\text{TAC} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] \text{ en m.éq. l}^{-1}$$

Si le pH de l'eau est $< 4.5 \Rightarrow \text{TAC} = 0$

si le pH de l'eau est $> 8.3 \Rightarrow \text{TAC} = (\text{CO}_3^{2-}) + (\text{OH}^-)$

$< 8.3 \Rightarrow \text{TA} = 0$ et $\text{TAC en m.éq. l}^{-1} = \text{HCO}_3^-$ donc absence de CO_3^{2-}

$$\text{TAC} \times 61 \Rightarrow \text{HCO}_3^- \text{ en mg/l}$$

Tableau V.3 Classification de l'eau en fonction de sa dureté (source OMS , 1994)

TH (°F)	Dureté de l'eau
0 à 6	Eau très douce
6 à 15	Eau douce
15 à 30	Eau dure
30 et plus	Eau très dure

Tableau V.4 Valeurs des paramètres physiques des eaux échantillonnées

échantillon	Température (°C)	Conductivité ($\mu\text{S.cm}$)	pH
1	20,5	1497	8
2	19,7	931	7,8
3	17,6	1425	8
4	17,3	1190	7,9
5	17,3	1350	7,8
6	18,5	1379	7,8
7	17,6	1343	8,2
8	19,5	1518	7,6
9	20,3	1722	7,5
10	20,6	1807	8,3
11	21	1503	7,8
12	20,7	2229 (puits non cureté)	7,5
13	20,6	1395	7,5
14	19,6	1240	7,4
15	21,6	1390	7,8
16	19,8	1525	7,7
17	23	1120	7,9
18	19,2	1510	7,8
19	19,5	1258	8,1

Donc on retiendra que thermiquement les eaux de la nappe aquifère d'El-Milia restent homogènes , cependant elles affichent un faciès alcalin (pH) et que ces eaux sont plutôt dures car elles affichent des minéralisations assez importantes comprises entre 690 et 1437 mg/l et exprimées par des conductivités électriques oscillant entre 931 et 1525 $\mu\text{S.cm}$ (notant que la CE du puits numéro 12 atteignant 2229 $\mu\text{S.cm}$ n'est pas prise en compte car ce puits n'est pas cureté et donc considéré non fonctionnel et pollué mais effectivement ce puits reste intéressant en matière de pollution) .

V.1.2. Etude des paramètres chimiques

V.1.2.1. Les cations majeurs

a) Le sodium Na^+

Le sodium est un élément rencontré abondamment à l'état naturel, il est toujours présent dans l'eau en proportion très variable. La norme limitant la concentration en sodium dans les eaux potables étant de 200 mg/l. Le sodium joue un rôle important en agriculture, pour l'irrigation à cause du fait de son action sur la perméabilité des sols. Le sodium est (avec les chlorures) le deuxième élément dissout le plus abondant dans l'eau de mer. Il est nécessaire à l'homme pour maintenir l'équilibre hydrique de l'organisme. Le sodium est nécessaire pour le fonctionnement musculaire mais l'excès affecte les reins et engendre l'hypertension artérielle. Les valeurs de concentrations en cet élément dans les eaux échantillonnées dans la nappe étudiée vont de 23,4 mg/l et 306 mg/l

b) Le calcium Ca^{++}

Le calcium est un élément très répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous la forme de carbonates et gypse. Il est le composant majeur de la dureté de l'eau, et l'élément dominant des eaux naturelles. Lorsque sa teneur dans l'eau dépasse la norme, il provoque l'entartage dans les canalisations. Les eaux minérales contiennent plusieurs centaines de grammes par litre. L'organisation mondiale de la santé (OMS) recommande pour l'eau destinée à la consommation humaine une valeur limite de 500 mg/l, exprimée en CaCO_3 . Les analyses de calcium sur les échantillons prélevés ont révélé des teneurs allant de 22,4 à 128,4 mg/l (voir tableau V.6.)

c) Le magnésium Mg^{++}

C'est un élément dominant dans l'eau, le 7^{ème} élément le plus abondant à l'état naturel, il constitue un élément significatif par sa dureté, sa teneur dépend de la nature du terrain le contenant , il dépasse rarement 15 mg/l dans les eaux naturelles, par contre dans les eaux minérales il peut largement dépasser cette valeur. Les analyses du magnésium sur les échantillons prélevés ont donné des concentrations variant entre 14,5 à 56,5 mg/l (voir tableau V.6.)

Tableau V.6 Concentrations anionique et cationique des eaux échantillonnées au début de la période de hautes eaux (en mg/l)

Ech	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	dht
1	433,1	310	181	83,233	29,237	167,861	7,394	11,4
2	378,2	95	134,9	46,935	21,517	128,32	6 ,836	6,4
3	664,9	150	195,3	65,389	30,442	114,583	3,424	10,4
4	536,8	120	159,8	64,122	24,533	47,862	3,036	9,2
5	616,1	230	198,8	58,418	31,704	254,188	4,741	9,44
6	671	210	191,7	59,465	36,647	264,385	4,415	9,28
7	591,7	205	159,8	60,653	33,859	204,029	4,755	9,6
8	671	305	142	71,876	35,86	151,355	7,126	8,16
9	542,9	300	170,4	74,223	39,844	114,471	10,897	12,6
10	573,4	130	220	22,444	14,521	306,091	5,438	5
11	244	305	213	80,881	33,854	74,418	7,27	9,84
12	237,9	97	337,3	128,427	56,58	23,479	1,711	14,4
13	325,7	260	145,6	66,53	24,531	102,35	4,16	10,4
14	278,1	200	170 ,4	85,878	22,269	99,36	11,575	9,2
15	353,8	220	184,6	75,669	30,024	111,78	4,268	10,7
16	386,7	76	149,1	64,12	29,156	76,36	13,5	8,8
17	317,2	80	120,7	50,5	17,133	101,66	2,875	5,84
18	219,6	265	177,5	48,89	26,141	194,58	7,599	8,4
bac1	-	-	-	90,150	-	-	7,894	-
Bac2	-	-	-	89,138	-	-	8,051	-
oued	-	-	-	75,475	-	-	9,550	-

Nota bene : les bacs 1 et 2 sont le 1^{er} et le 2^e bassin d'effluent de la tannerie à traiter

d) Le potassium K^+

Il est nettement moins abondant que le sodium et rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l. La teneur globale de Na et de K dans l'eau est souvent estimée comme la différence entre la somme de tous les cations présents obtenus par échange ionique et la dureté. Le potassium affiche des concentrations allant de 2,8 mg/l et 13,5 mg/l dans les eaux échantillonnées

V.1.2.2 Les anions majeurs

a) Les bicarbonates (HCO_3^-)

La présence des bicarbonates (HCO_3^-) dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (calcaires, dolomies..) par les eaux chargées en gaz carbonique CO_2 selon l'équation de la somme des termes sous-mentionnés :



Les bicarbonates sont très présents dans les eaux analysées avec des concentrations allant de 219,6 mg/l à 671 mg/l avec une distribution spatiale hétérogène de sorte que les teneurs les plus fortes sont observées en amont et en rive droite de la plaine.

b) Les sulfates (SO_4^{--})

La teneur en sulfates des eaux naturelles résulte généralement de la dissolution des gypses ($CaSO_4,2H_2O$) et des roches évaporitiques triasiques lesquelles formations sont observées sur les reliefs au Sud-Ouest de la nappe ou il apparaît un important affleurement de trias sur la carte géologique en Figure II.4. Les sulfates sont hydrosolubles et peuvent être réduits en sulfures d'hydrogène (H_2S). La toxicité par les sulfures est avérée et joue un rôle important dans le déséquilibre enzymatique et microbien chez l'homme mais aussi chez les organismes aquatiques provoquant des lésions graves en milieu acide. Les sulfures font partie des déchets industriels provenant des fonderies. L'analyse des eaux échantillonnées a révélé des concentrations en sulfates allant de 76 à 310 mg/l

c) Les chlorures (Cl^-)

Les chlorures se trouvent en proportion très limitées dans les eaux séjournant dans des roches granitiques contrairement dans les eaux des régions sédimentaires., La teneur en chlorures augmente généralement avec le degré de minéralisation d'une eau. Les eaux souterraines sont très saumâtres et celles analysées ont donné des teneurs allant de 120,7 mg/l à 337,3 mg/l.

Tableau V.7 Récapitulation des paramètres physico-chimiques des eaux échantillonnées au début de la période de hautes eaux en 2021 (en mg/l)

Ech	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺ +K ⁺	Σ cations	Σ anions	Minéralisation
1	433,1	310	181	83,233	29,237	175,25	287,71	924,1	1211,8
2	378,2	95	134,9	46,935	21,517	135,15	203,65	608,1	811,75
3	664,9	150	195,3	65,389	30,442	118	213,82	1010,2	1224,02
4	536,8	120	159,8	64,122	24,533	50,89	139,54	816,6	956,14
5	616,1	230	198,8	58,418	31,704	258,92	349,03	1044,9	1393,93
6	671	210	191,7	59,465	36,647	268,79	364,89	1072,7	1437,59
7	591,7	205	159,8	60,653	33,859	208,78	303,28	956,5	1259,78
8	671	305	142	71,876	35,86	158,47	266,2	1118	1384,2
9	542,9	300	170,4	74,223	39,844	125,36	239,42	1013,3	1252,72
10	573,4	130	220	22,444	14,521	311,53	348,49	923,4	1271,89
11	244	305	213	80,881	33,854	81,68	196,41	762	958,41
12	237,9	97	337,3	128,427	56,58	25,18	210,18	672,2	882,38
13	325,7	260	145,6	66,53	24,531	106,51	197,57	731,3	928,87
14	278,1	200	170,4	85,878	22,269	110,93	219,06	648,5	867,56
15	353,8	220	184,6	75,669	30,024	116,04	221,73	758,4	980,13
16	386,7	76	149,1	64,12	29,156	89,86	183,13	611,8	794,93
17	317,2	80	120,7	50,5	17,133	104,53	172,16	517,9	690,06
18	219,6	265	177,5	48,89	26,141	202,18	277,21	662,1	939,31
bac1	-	-	-	90,150	-	-			
Bac2	-	-	-	89,138	-	-			
oued	-	-	-	75,475	-	-			

V.1.2.3 Les éléments traces métalliques (ETM)

Parmi les éléments chimiques dits éléments traces métalliques faisant partie de la constitution de la croûte terrestre , on a considéré le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le zinc (Zn) et le cadmium (Cd) en raison de leur toxicité potentielle dans notre environnement. Comme tous les composants chimiques de la croûte terrestre, les éléments traces participent aux grands cycles biogéochimiques comprenant l'atmosphère, les océans et les continents. L'activité humaine est à l'origine de l'augmentation de la teneur des éléments traces métalliques dans l'atmosphère, dans le sol et dans l'eau. Les industries métallurgiques et chimiques ainsi que l'épandage d'engrais, de pesticides et de boues de stations d'épurations dans les champs apportent dans la biosphère des quantités importantes de ces métaux.

La teneur naturelle dépend de la concentration en élément de la roche originelle ainsi que des processus naturels intervenus lors des périodes géologiques de formation du sol qui ont pu libérer ou concentrer l'élément considéré. Le Tableau ci-dessous présente les teneurs naturelles moyennes des éléments du cuivre Cu, du nickel Ni, du cadmium Cd et de l'arsenic As et du zinc Zn dans les sols selon la norme AFNOR

Sous l'action des processus d'altération, les composantes chimiques de ces roches mères vont être libérées, principalement au niveau des sols. Ces processus de désagrégation s'opèrent de deux manières distinctes : altération chimique et altération mécanique et physique sous l'action d'agents naturels tels que les grands écarts de température qui sont responsables de la dilatation et de la contraction des roches .

a) Le fer (Fe)

Dosage du fer (élément considéré comme indésirable) : le fer peut se rencontrer dans l'eau sous différente forme. Dans les conditions habituelles c'est-à-dire pour un pH variant entre 4.5 et 9 le fer soluble présent est généralement à l'état ferreux (Fe^{2+}), si le milieu est réducteur comme dans les eaux souterraines le fer ferreux peut atteindre des teneurs élevées. En l'absence de complexe le fer ferrique (Fe^{3+}) n'est soluble d'une façon significative qu'à des pH inférieure à 4 ; ce n'est que dans ce cas que l'on pourra faire une distinction entre le fer dissous et le fer à l'état ferreux et de ce fait les eaux superficielles n'en contiennent que très peu, sous l'action de l'air ou par addition du chlore le fer est oxydé à l'état ferrique et peut être hydrolysé pour donner un hydroxyde de fer insoluble, c'est sous cette forme qu'on le trouve dans nos échantillons. La norme de tolérance peut monter jusqu'à 0,4 mg/l mais les eaux ferrugineuses contenant plus de 5 mg/l peuvent être ingérées sans danger .

Tableau V.8 Teneurs en métaux lourds dans les eaux échantillonnées en début de période de hautes eaux , au mois de décembre (en mg/l)

Echant	Fe	Cu	Ni	Cd	Zn
1	0,053	0,02	0	0,048	0,023
2	0,064	0,012	0	0,031	0
3	0,071	0,014	0	0,028	0
4	0,086	0,014	0	0,026	0
5	0,097	0,016	0,004	0,025	0
6	0,1	0,016	0,004	0,031	0
7	0,108	0,019	0,043	0,033	0
8	0,117	0,024	0,077	0,03	0
9	0,119	0,023	0,079	0,033	0
10	0,129	0,024	0,063	0,037	0
11	0,136	0,026	0,073	0,039	0
12	0,143	0,029	0,074	0,047	0,001
13	0,127	0,051	0,065	0,043	0,018
14	0,153	0,037	0,06	0,04	0,007
15	0,160	0,035	0,082	0,045	0,006
16	0,163	0,035	0,056	0,05	0,024
17	0,169	0,04	0,069	0,049	0
18	0,182	0,053	0,083	0,063	0,006
Bac1	0,185				
Bac2	0,243				
oued	0,203				

b) Le Cuivre (Cu⁺⁺) vient après le zinc en abondance dans la lithosphère . Dans les roches, le cuivre accompagne souvent les sulfures et il est faiblement concentré dans les roches granitiques ; ses teneurs sont par contre élevées dans les roches sédimentaires telles que les schistes et les argiles. Le cuivre est le troisième métal le plus utilisé au monde et c'est donc un contaminant qui accompagne le zinc, le plomb et le cadmium dans les activités métallurgiques des métaux non ferreux. C'est un élément essentiel pour plusieurs organismes, cependant il peut avoir des effets toxiques dans certaines conditions et peut même entraîner la mort au-delà d'un certain seuil .La norme limite de la concentration du cuivre dans l'eau de boisson est de 2 mg/l et de 2500 mg/l dans les sols .

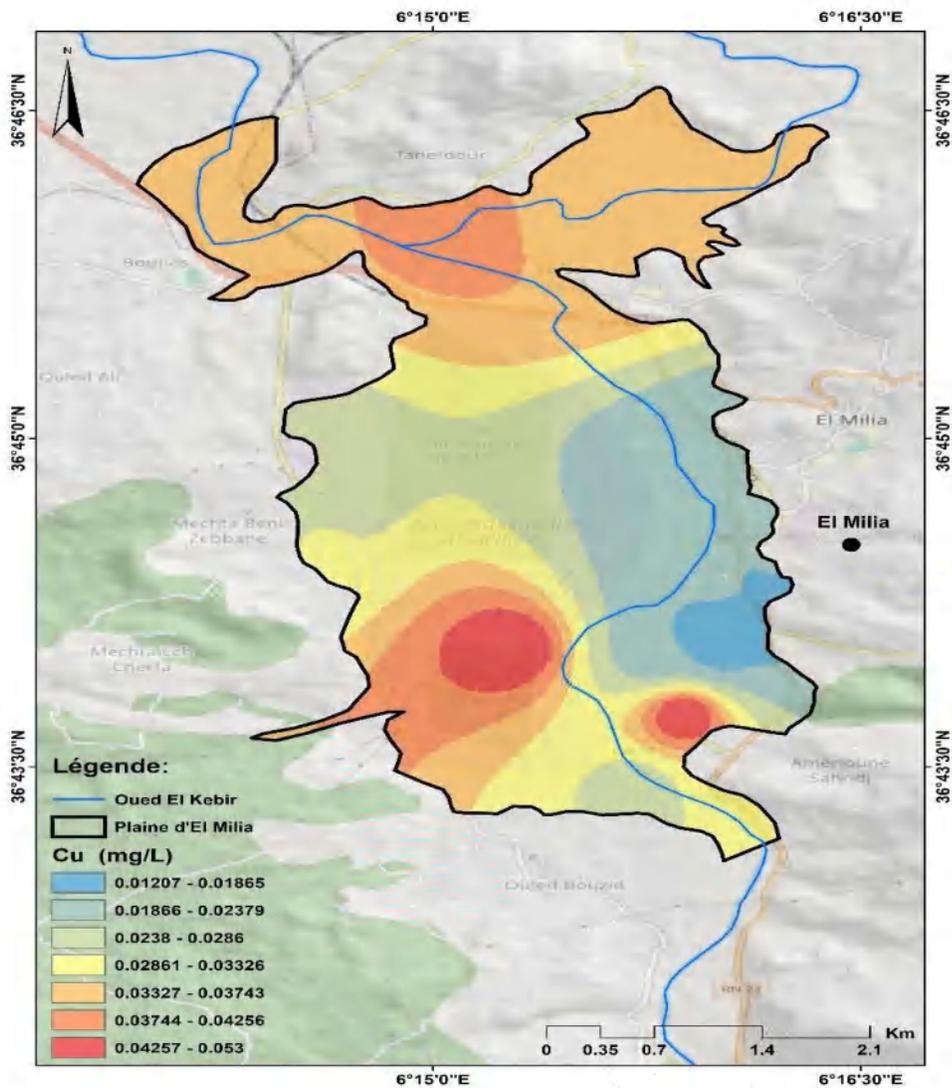


Figure V3 Carte d'isoteneur en cuivre

c) **Le nickel** symbolisé (**Ni**) est un élément reconnu pour ses caractéristiques de dureté, il est relativement peu toxique ainsi que ses sels. Dans les pollutions d'origine industrielle on les trouve souvent associé aux cyanures, au mercure , au chrome et à l'arsenic entre autres. Dans les eaux potables sa teneur ne devrait pas dépasser 1mg/l. Dans notre cas , sa concentration dans les échantillons analysés varie entre 0 mg/l et 0,083 mg/l

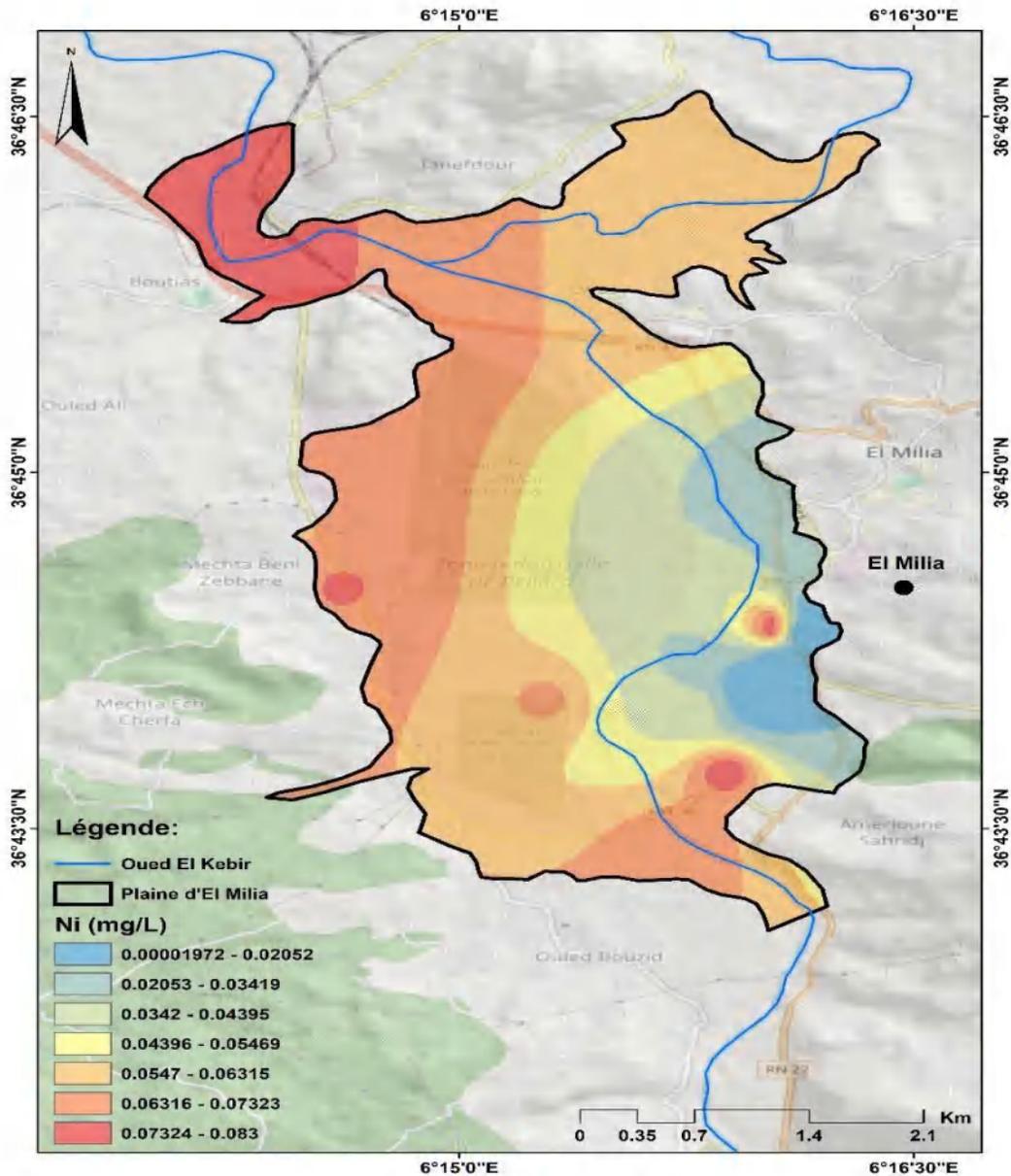


Figure V.4 Carte d'iso teneur en nickel

d) Le Cadmium (Cd) est un élément ductile, malléable et très fusible (fusion à 320°); il cristallise en hexagone. On trouve le cadmium dans la nature généralement associé au zinc. C'est un élément trace redoutable pour sa toxicité élevée bien que les sédiments ne contiennent que de très faibles concentrations en cet élément abondant dans les roches sédimentaires surtout ceux riches en carbone, phosphates et sulfures. (Rodier *et al.*, 1996).

Les normes internationales indiquent que l'eau potable ne doit pas contenir plus de 0,01 mg/l surtout que son ingestion présente un effet cumulatif au niveau des cellules humaines. Sa teneur dans les échantillons analyses bascule entre 0,03 mg/l et 0,063 mg/l

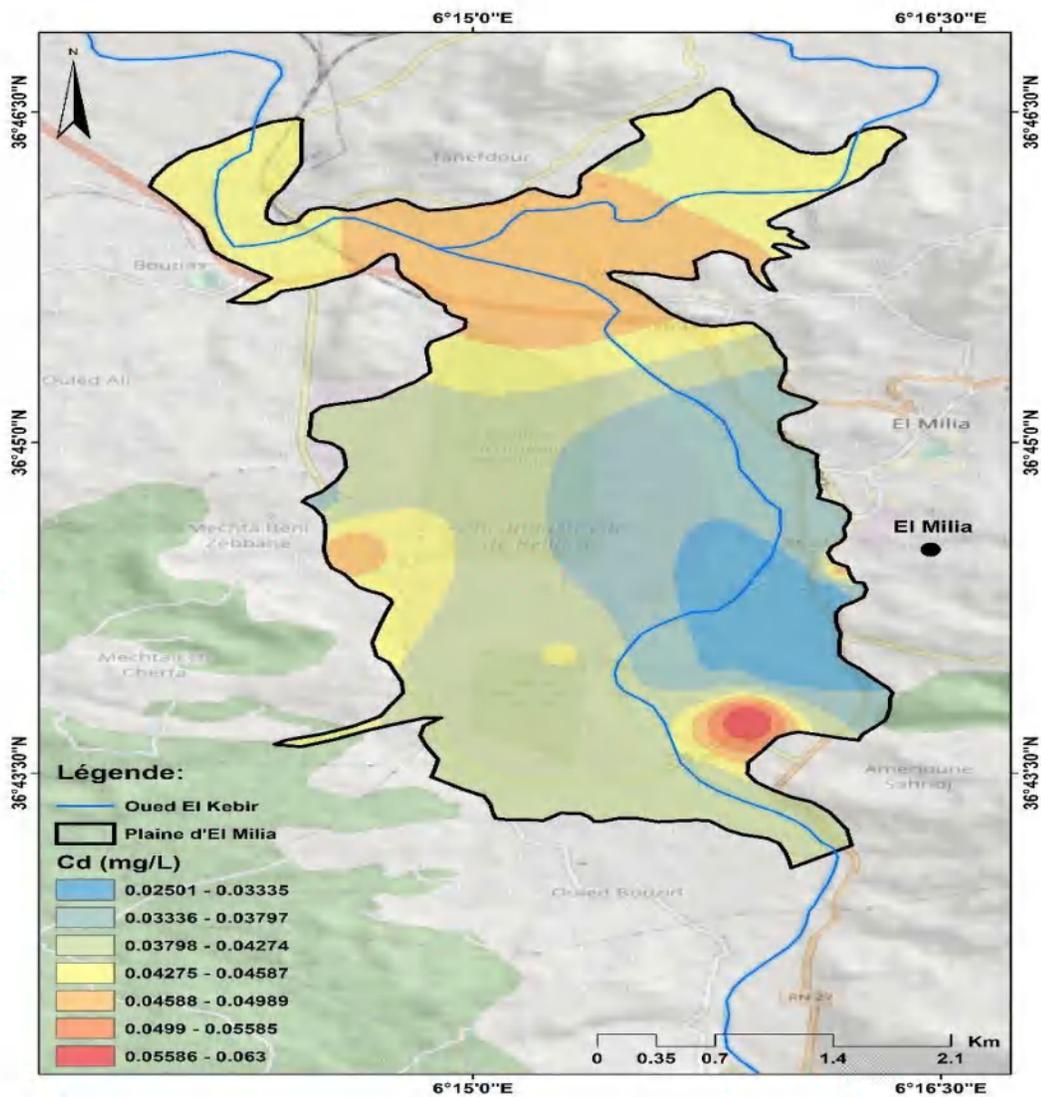


Figure V.5 Carte d'iso teneur en cadmium

e) **Le zinc (Zn)** : Pour le dosage du zinc la méthode par absorption atomique permet des mesures rapides dans de bonnes conditions de sensibilité, il est recommandé de pratiquer l'analyse dans les 24 heures qui suivent le prélèvement. La concentration du zinc dans les échantillons analysés varie entre 0 mg/l et 0,024 mg/l

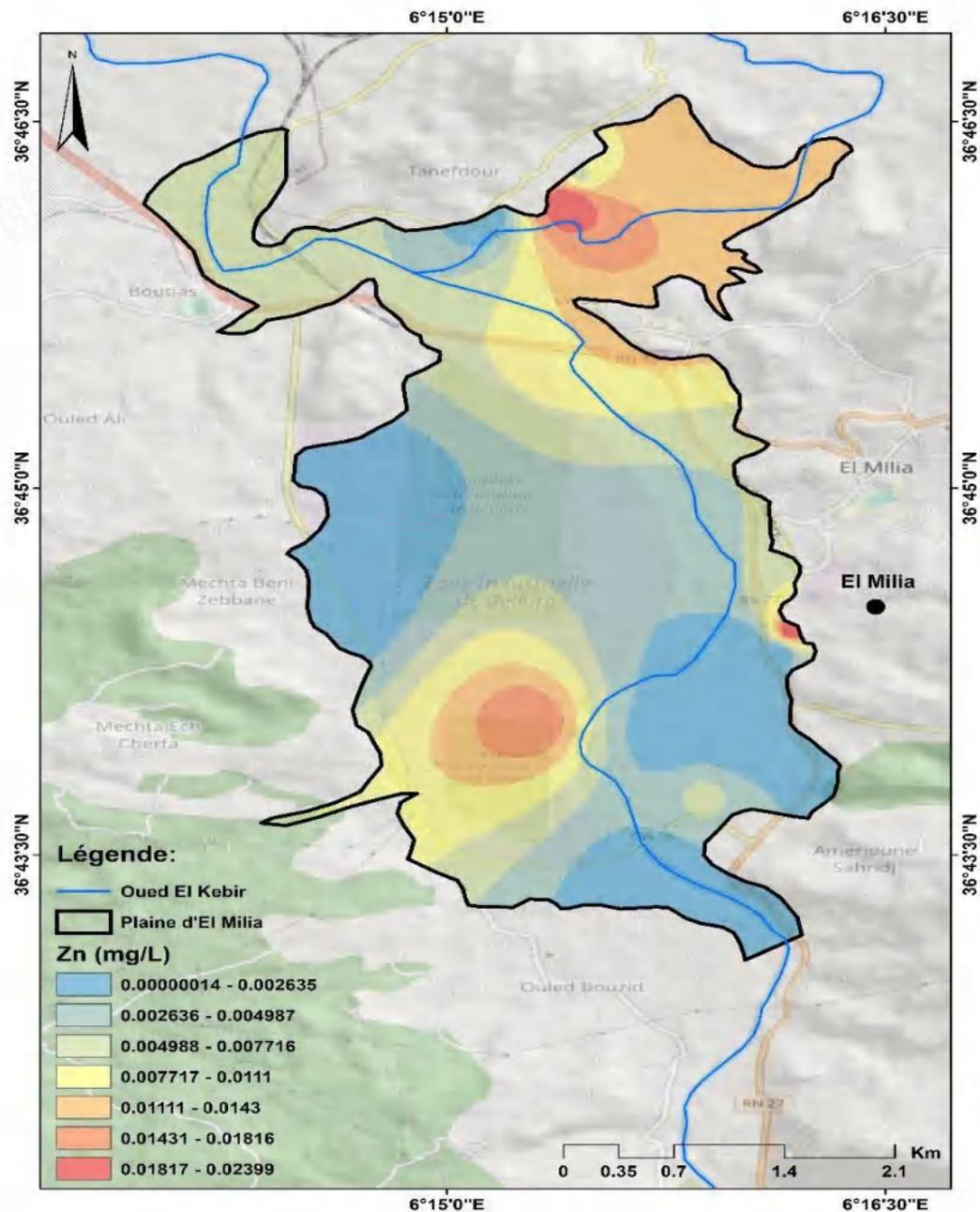


Figure V.6 Carte d'iso teneur en zinc

Tableau V.9 Normes OMS (mise à jour 2006) et algérienne des teneurs en métaux lourds dans l' eau potable (en mg/l)

Elément	Chrome	Cuivre	Nickel	Cadmium	Zinc
Normes OMS	0,05 mg/l	2 mg/l	0,02 mg/l	0,005 mg/l	3 mg/l
Normes algériennes	0,05 mg/l	2 mg/l	0,7 mg/l	0,003 mg/l	5 mg/l

Enfin , on signalera tout de même qu'il a été procédé l'analyse du chrome (Cr) au centre d'analyse des résidus en traces (C.A.R.T.) à l'université de Liège en Belgique et que le choix de cet élément est motivé par la présence d'une industrie du cuir (tannerie-mégisserie) sur la plaine étudiée surtout quand on sait que le traitement des peaux animales comporte une opération appelée le chromage et que cette industrie nécessite un artifice de produits chimiques dont:

Tableau V.10 Listing des produits chimiques utilisés dans la tannerie (en tonnes/an)

Désignation du produit utilisé	quantité (tonnes/an)
chaux hydratée (Ca^2OH)	5
chlorure de sodium (NaCl)	20
acide sulfurique (H_2SO_4)	0,8
sulfures de sodium (Na_2S)	5
bisulfite de sodium (Na_2SO_3)	0,6
sulfates de chrome (CrSO_4)	20
sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	1,5
acide formique, pétrole, diluants, colorants	125
teinte laquée, résines et colorants de retannage	25

Pour cela on a tenté d'identifier des composés contaminant un prélèvement de boue sur les rives de l'oued partant de l'hypothèse d'hydrocarbures avec comme moyen utilisé la spectrophotométrie de masse SPME-GC-MS.

La colonne de chromatographie gazeuse utilisée était une VF-5ms de 40 m, et l'acquisition a été réalisée en mode « full scan », sur une gamme de masse allant de 30 à 800.

Les chromatogrammes présentés donnent le signal obtenu pour les 3 échantillons (1 à 3) moins le signal obtenu pour le blanc (échantillon 4)

Les Résultats en phase gazeuse (SPME-GC-MS) ont donné des chromatogrammes du Courant d'Ions Total pour les différents échantillons insérés ci-dessous .Les pics observés sur le chromatogramme de l'échantillon 1 prélevé en aval de l'installation, proviennent de divers hydrocarbures. Ceux présents dans les chromatogrammes des échantillons 2, 3, et 4 sont caractéristiques de la fibre SPME utilisée et ne doivent dès lors pas être pris en compte.

Il a été très difficile d'identifier les composés néanmoins il ressort que l'échantillon 1 semble contenir des hydrocarbures, que l'échantillon 2 des surfactants et que les échantillons 1 et 3 contiendraient des polymères.

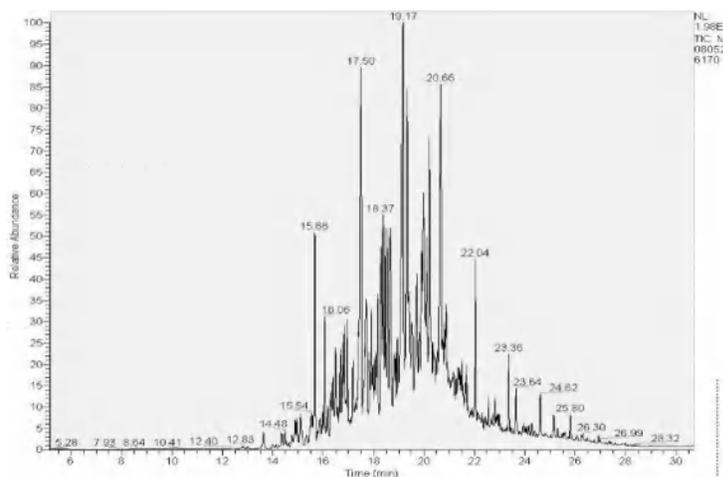


Figure V.7 Echantillon 1

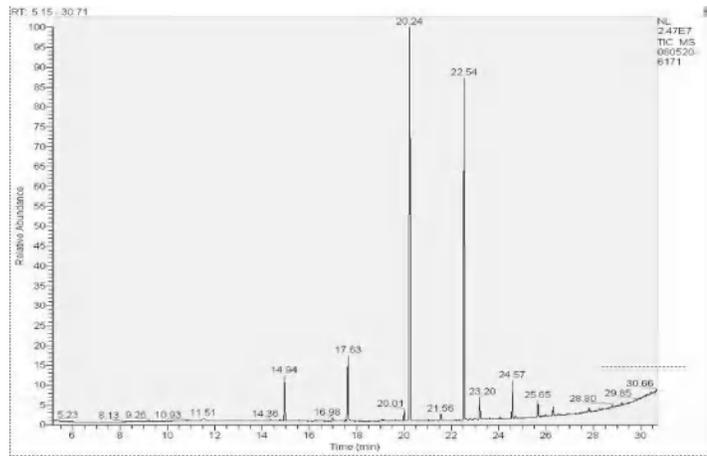


Figure V.8 Echantillon 2

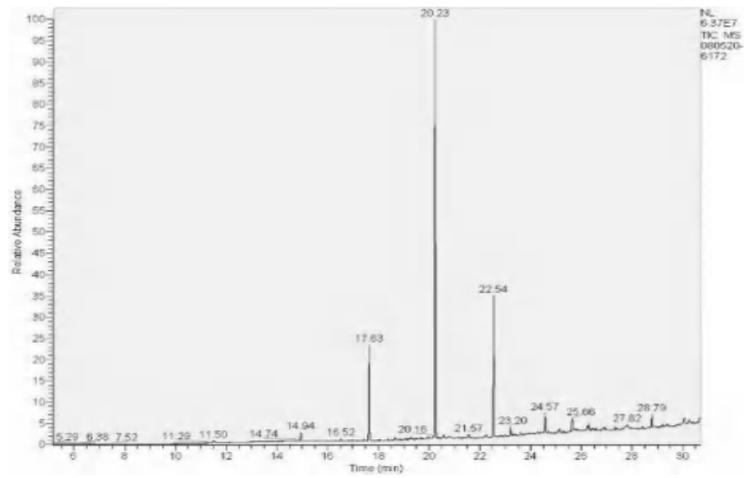


Figure V.9 Echantillon 3

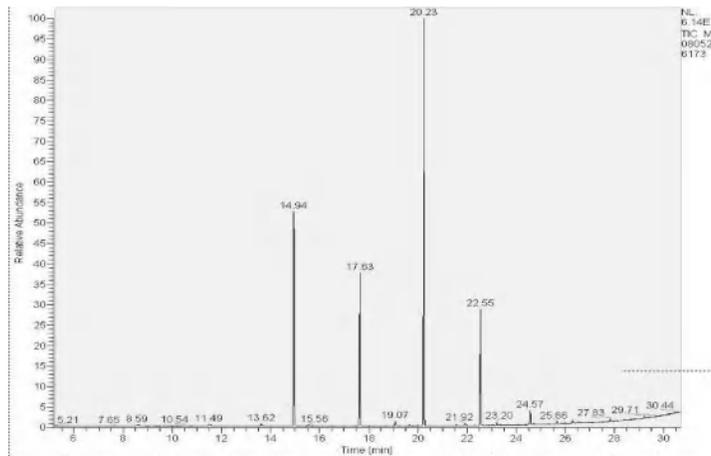


Figure V.10 Echantillon 4

V.1.2.4. Résultats des analyses

Le travail analytique étant réalisé il convient de présenter les résultats de telle façon qu'ils soient directement interprétés . Comme à l'habitude il est répandu d'exprimer des résultats en mg/l pour l'échantillon d'eau et en mg/kg pour les l'échantillon de boue , c'est la façon la plus significative pour certains produits toxiques ou micropolluants en l'occurrence les métaux lourds dosés il est utilisé le microgrammes (μg) . Pour ce qui est des chromatogrammes Il est difficile d'identifier les composés néanmoins il ressort est que les échantillons semblent contenir des hydrocarbures (échantillon 1), des surfactants (échantillon 2) et des polymères (échantillons 1 et 3).

Tableau V.11 Normes OMS et algérienne des teneurs des paramètres physico-chimiques et métaux lourds dans l'eau potable en mg/l et $\mu\text{g/l}$

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4	
Chrome total	682	78.7	340	87.2	mg/kg

Tableau V.12 Normes OMS et algérienne des teneurs des paramètres physico-chimiques et métaux lourds dans l'eau potable en mg/l et µg/l

	Valeur mesurée	Norme algérienne (en mg/l)	Norme OMS (en mg/l)
Conductivité (µS.cm)	931 - 1807	2800	1500
Température (°C)	17,3 - 23	-	20° < T < 25°
pH	7,4 - 8,3	6,5 – 8,5	6,5 – 9,2
Sodium (mg/l)	23,4 - 306	200	100
calcium	22,4 - 128,4	75 - 200	500
magnésium	14,5 - 56,5	150	50
potassium K ⁺	2,8 - 13,5	20	12
HCO ₃ ⁻	219,6 - 671	-	-
SO ₄ ⁻	76 - 310	200 - 400	250
Cl ⁻	120,7 – 337,3	200 - 500	250
Fer	0,053 - 0,182	0,3	0,3
Chrome	-	0,05	0,05
Cuivre	0,012 – 0,053	2 mg/l	2
Nickel	0 – 0,083	70 µg/l	0,02
Cadmium	0,025 -0,063	0,03	0,005
Zinc	0 – 0,024	5 mg/l	3

L'origine potentielle des sulfates de sodium Na₂SO₄ serait la tannerie en ce que l'étape du pelanage dans le traitement des peaux animales utilise plus d'une demi-tonne par an .

V.1.3. Classification des eaux

Plusieurs méthodes ont été définies par divers auteurs pour classer les différents faciès chimiques des eaux naturelles. Dans notre cas, nous nous intéressons aux classifications de Stabler et à celle de Piper commentées ci-dessous.

Classification suivant la méthode de Stabler

Cette classification est basée sur la comparaison des eaux à partir de la concentration des cations et des anions représentées par deux barres d'égale longueur pour chaque échantillon car les solutions sont électriquement neutres et la somme des anions est égale à celle des cations ce qui rend ce diagramme utile pour l'étude des équilibres carbonatés et permet de représenter l'alcalinité. Elle se base sur les éléments dominants dans la composition chimique de l'eau. Les éléments chimiques sont exprimés en milli.éq/l.

La lecture de ce diagramme (Fig. V.11) indique des eaux moyennement dures au vu de la valeur des ions Ca et Mg , par contre l'alcalinité est relativement élevée ; d'autre part la teneur en sodium est à un degré moindre dominant devant les autres ions.

EI-Mila

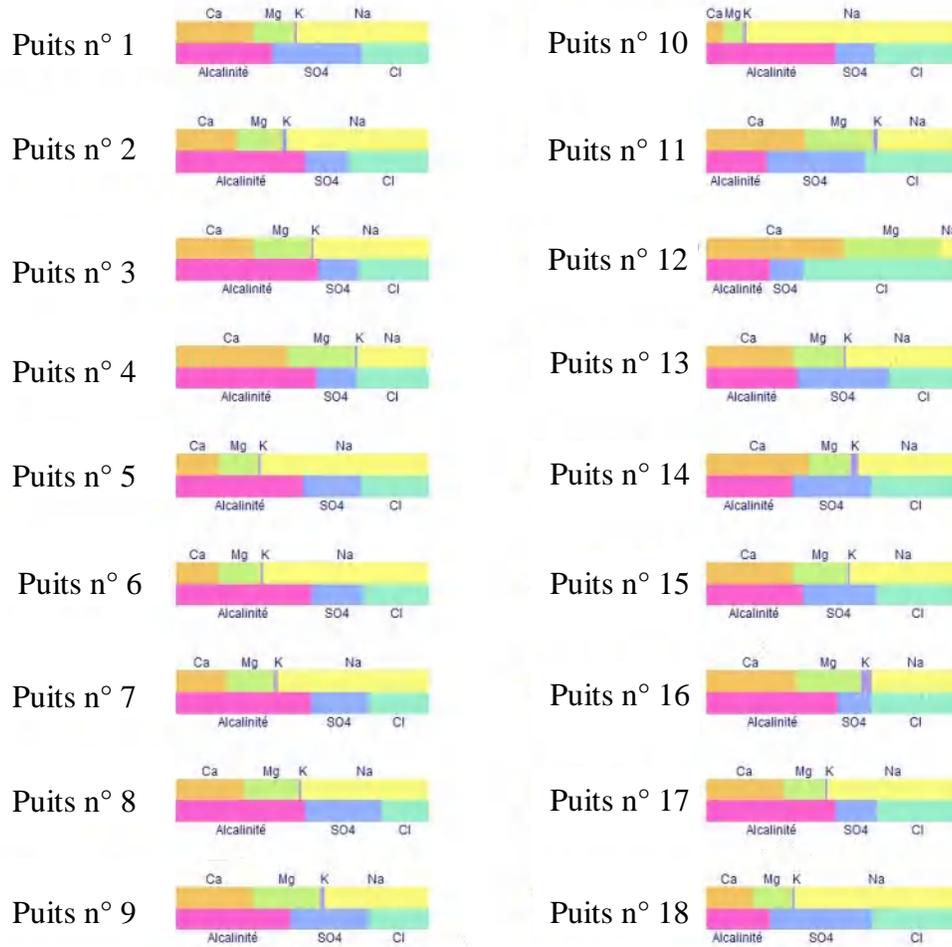


Figure V.11 Diagramme de Stabler

Classification suivant la méthode de Piper

Le diagramme de Piper permet d'établir une classification simple qui différencie les faciès chimiques des eaux. Ces faciès chimiques qui dépendent à l'origine de la nature géologique des terrains dans lesquels ont séjourné les eaux ainsi que des activités agricoles exercées et des industries pratiquées sur le site.

La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper montre les types de familles des eaux. Cette méthode consiste à calculer les quantités en réaction en pour-cent par rapport à la somme des ions de même signe.

En l'absence de dosage des nitrates du fait du non usage des engrais nitrés pour l'agriculture artisanale pratiquée et après avoir reporté les différentes valeurs des éléments chimiques sur le diagramme de Piper, nous constatons que les eaux de la zone d'étude appartiennent approximativement à 4 familles:

- la famille des chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes avec 28 % des eaux,
- la famille des chlorurées sodiques et potassiques ou sulfatées sodiques avec 14 % des eaux,
- la famille des bicarbonatées sodiques et potassiques avec 28 % des eaux,
- la famille des bicarbonatées calciques et magnésiennes avec 23 % des eaux.

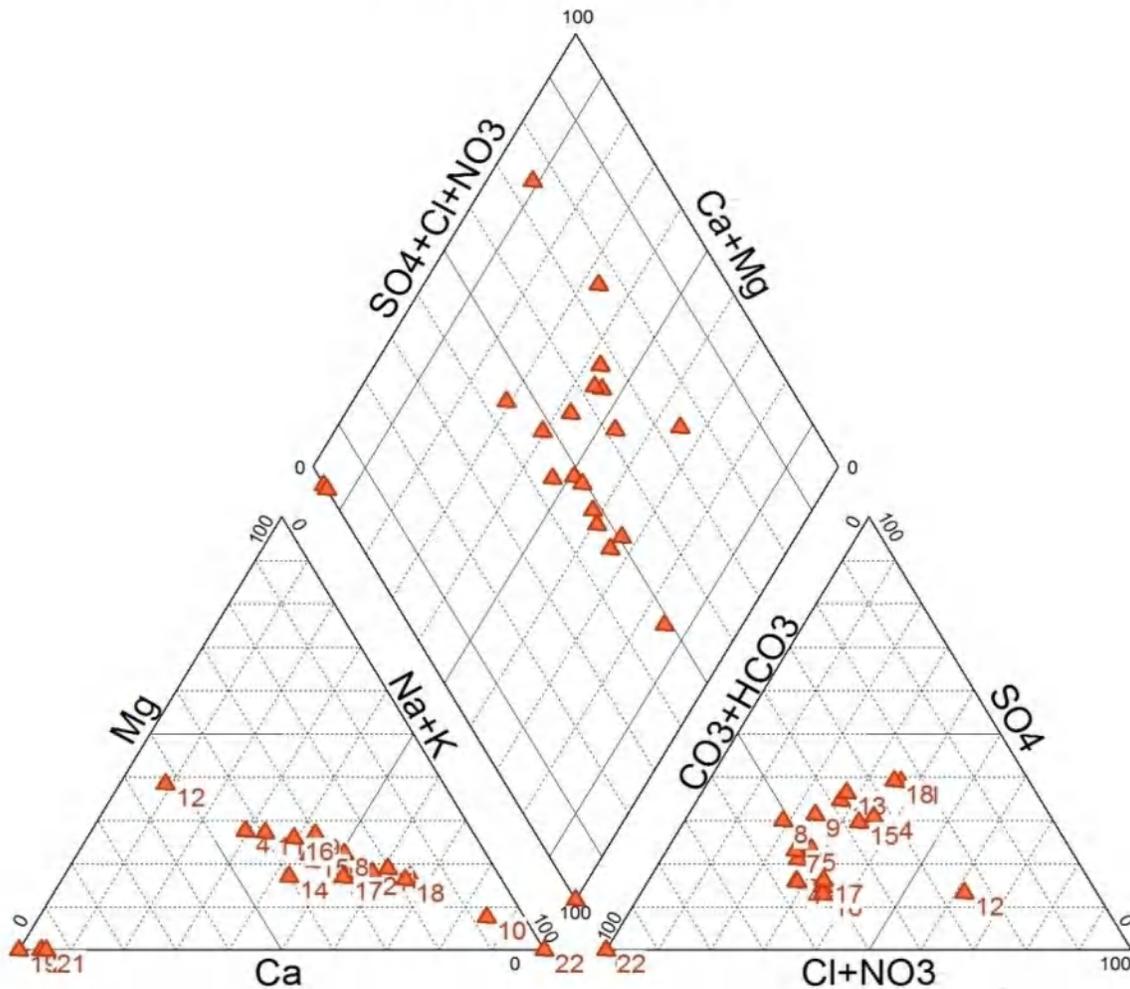


Figure V.12 Diagramme de Piper

On classe de gauche à droite et par ordre décroissant les quantités en réaction en pourcentage, les anions puis les cations.

Sur le triangle des cations la tendance de la distribution des points d'eau va vers potassosodique ; au niveau du triangle anionique la distribution des points d'eau est plutôt bicarbonatée équilibrée entre sulfaté et chloruré.

Origines des éléments chimiques

Droite de regression du couple $\text{Ca}^{2+} / \text{HCO}_3^-$

La concentration chimique de ces deux éléments est représentée dans la figure suivante :

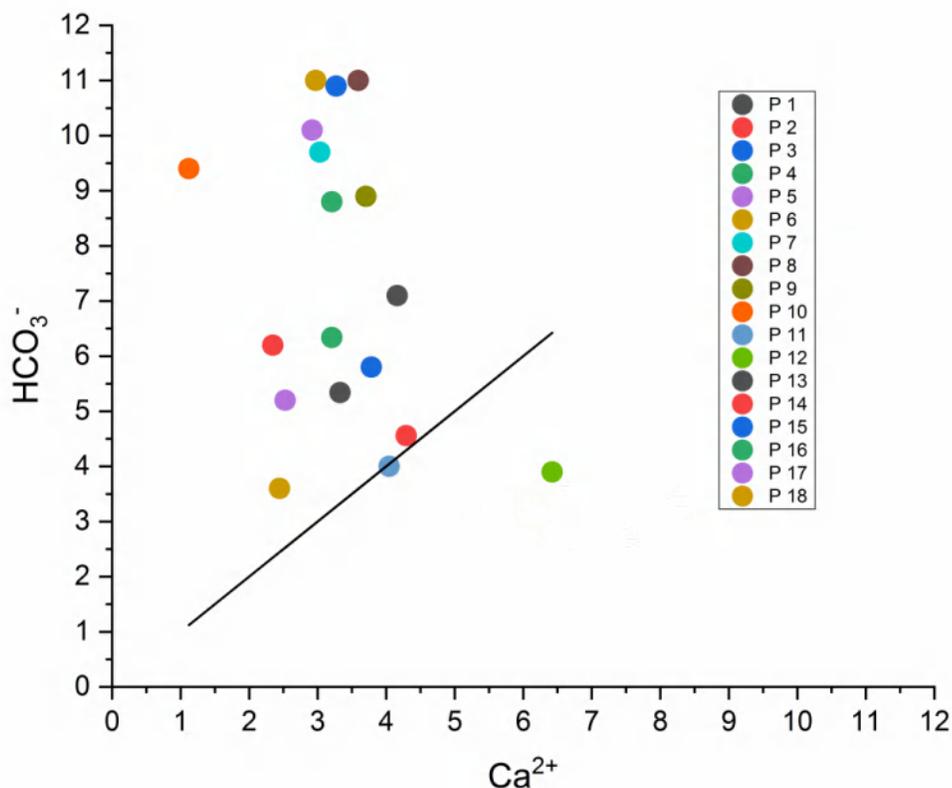


Figure V.13 Relation entre le calcium et les carbonates

Ce graphe présente :

Un équilibre de Ca par rapport au HCO_3^- au niveau des points d'eau P11, P14 P18, ce qui montre que ces deux éléments ont la même origine qui serait la formation calcaire selon la formule suivante :



L'origine du surplus des bicarbonates (HCO_3^-) par rapport au Ca^{2+} dans la plupart des points d'eau pourrait être expliqué par la relation avec la dissolution des formations dolomitiques selon la formule suivante :

$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$, ce qui donne deux anions de HCO_3^- et un seul cation de Ca^{2+}

Un surplus de Ca^{2+} par rapport au HCO_3^- au niveau du point d'eau P12 laisserait supposer que le calcium dans ce puits est lié à deux origines : les formations calcaires et les formations gypseuses triasiques situées sur les reliefs dominant le flanc ouest de la plaine selon les formules suivantes :



$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$, ce qui donne deux cations de Ca^{2+} .

Droite de regression du couple $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{HCO}_3^-$

Pour justifier l'origine du surplus des bicarbonates on représente graphiquement le couple $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{HCO}_3^-$

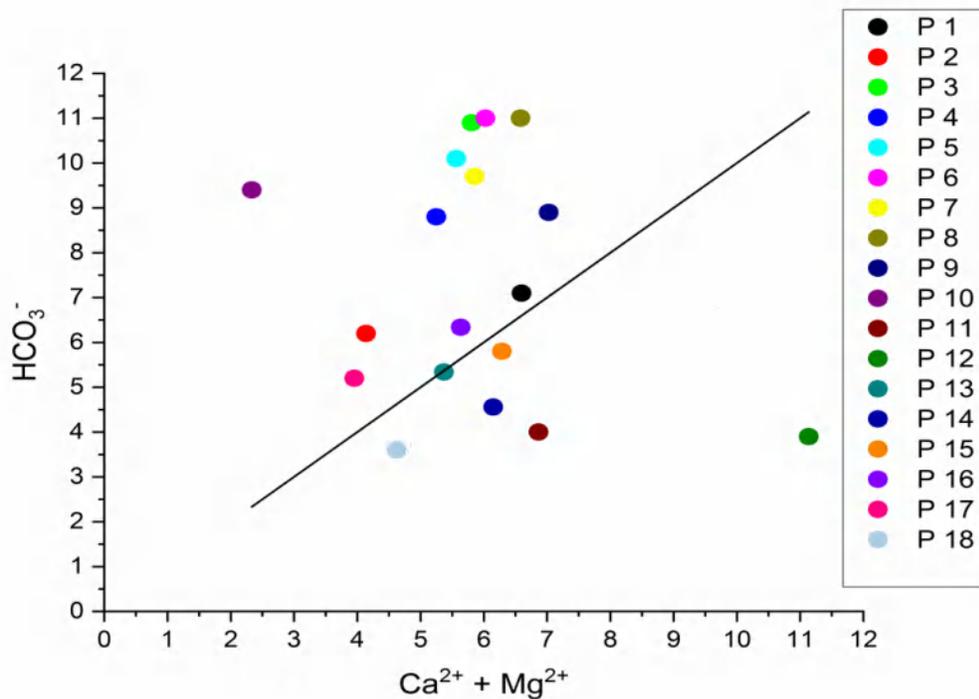


Figure V.14 Relation entre le calcium et magnésium et les carbonates

Le graphe montre que les point d'eau P1,P2, P13, P15, P16, P17, sont rapprochés à la droite 1, ce qui confirme que l'origine des bicarbonates au niveau de ces points d'eau est liée principalement à la dissolution des dolomies.

Droite de regression du couple $\text{Ca}^{2+} / \text{SO}_4^{2+} + \text{HCO}_3^-$

Pour ce qui est de l'origine du surplus de calcium on utilise le rapport $\text{Ca}^{2+} / \text{SO}_4^{2+} + \text{HCO}_3^-$

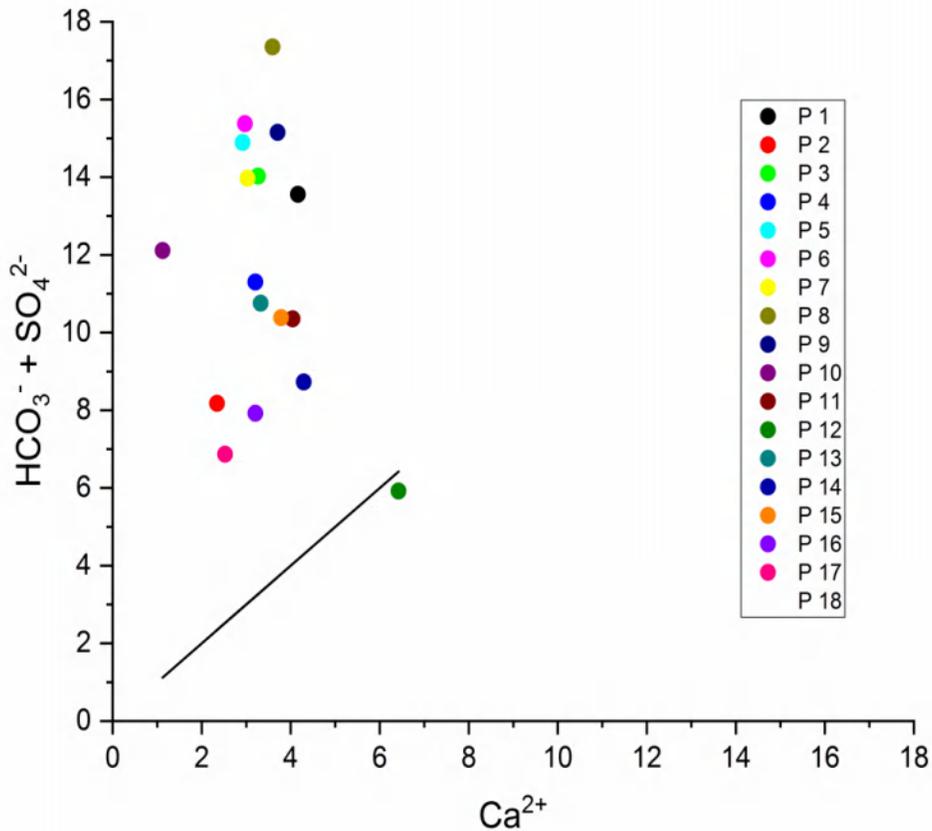


Figure V.15 Relation entre le calcium et les carbonates et sulfates

Le graphe montre que le point d'eau P12 est vraiment rapproché à la droite de 1 ce qui confirme l'origine du calcium dans ce puits en liaison avec la dissolution de deux formations géologiques qui sont les calcaires et les gypses situés sur les reliefs ouest dominant ce puits .

Droite de regression du couple Na^+/Cl^-

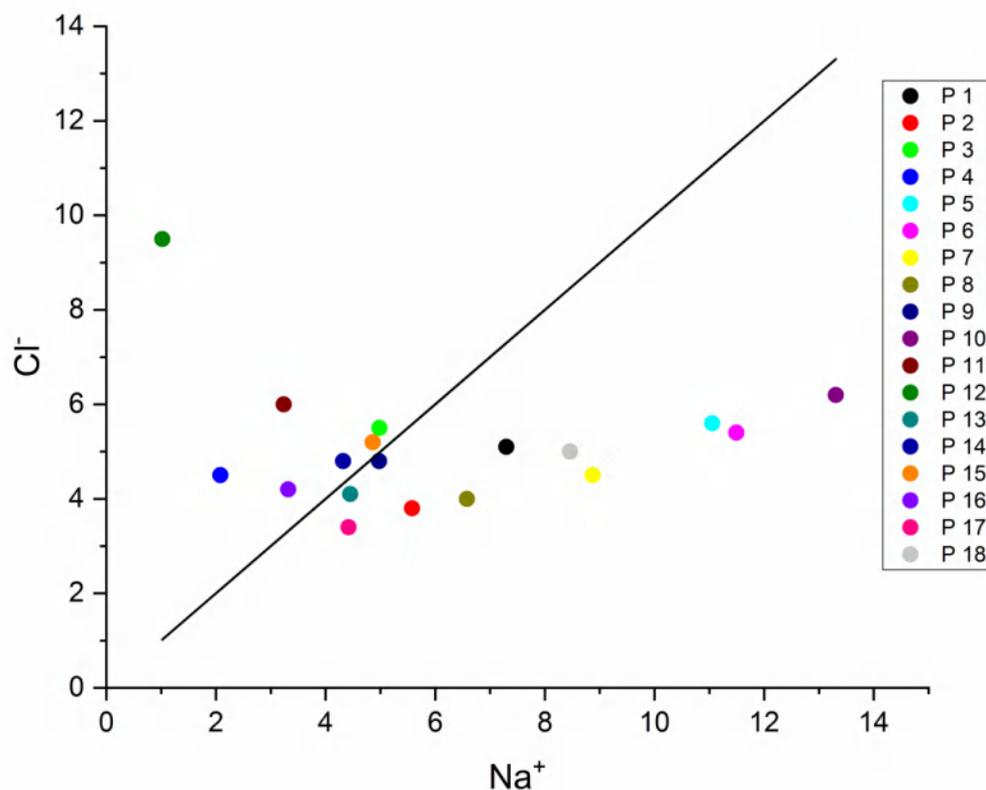
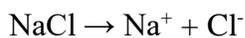


Figure V.16 Relation entre le chlore et le sodium

Le graphe montre qu'une grande partie des points d'eau présente un équilibre de sodium par rapport aux chlorures ce qui montre que l'origine de ces deux éléments chimiques est liée essentiellement à la halite selon la formule chimique suivante :



Un surplus de chlorures par rapport au sodium au niveau des points d'eau P4, P11, P12 ce la pourrait être expliqué par le traitement des eaux par les Chlorures.

Un surplus de sodium par rapport aux chlorures au niveau des points d'eau peut être expliqué par les échanges de base eau – argile, selon la formule suivante :

Permetolite (argiles) $2\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Perm. Ca}^{2+} + 2\text{Na}^+$ donc dans ce cas-là l'argile fixe le calcium de l'eau et libère le sodium dans l'eau, ce qui justifie l'excès de sodium dans l'eau.

Tableau V.17 Classification des faciès

Puits	Formule caractéristique		Faciès chimique	
P1	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% SO}_4^{2-} > \text{r\% Cl}^-$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Sodique
P2	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% Cl}^- > \text{r\% SO}_4^{2-}$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Sodique
P3	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% Cl}^- > \text{r\% SO}_4^{2-}$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Sodique
P4	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% Cl}^- > \text{r\% SO}_4^{2-}$	$\text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% Na}^+ > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Calcique
P5	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% Cl}^- > \text{r\% SO}_4^{2-}$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Sodique
P6	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% Cl}^- > \text{r\% SO}_4^{2-}$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Sodique
P7	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% Cl}^- > \text{r\% SO}_4^{2-}$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Sodique
P8	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% SO}_4^{2-} > \text{r\% Cl}^-$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Sodique
P9	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% SO}_4^{2-} > \text{r\% Cl}^-$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Sodique
P10	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% Cl}^- > \text{r\% SO}_4^{2-}$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Sodique
P11	$\text{r\% SO}_4^{2-} > \text{r\% Cl}^- > \text{r\% Hco}_3^-$	$\text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% Na}^+ > \text{r\% K}^+$	Sulfaté	Calcique
P12	$\text{r\% Cl}^- > \text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% SO}_4^{2-}$	$\text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% Na}^+ > \text{r\% K}^+$	Chloruré	Calcique
P13	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% SO}_4^{2-} > \text{r\% Cl}^-$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Sodique
P14	$\text{r\% Cl}^- > \text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% SO}_4^{2-}$	$\text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Na}^+ > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Chloruré	Calcique
P15	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% Cl}^- > \text{r\% SO}_4^{2-}$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Sodique
P16	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% Cl}^- > \text{r\% SO}_4^{2-}$	$\text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Na}^+ > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Calcique
P17	$\text{r\% Hco}_3^- > \text{r\% Cl}^- > \text{r\% SO}_4^{2-}$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Bicarbonaté	Sodique
P18	$\text{r\% SO}_4^{2-} > \text{r\% Cl}^- > \text{r\% Hco}_3^-$	$\text{r\% Na}^+ > \text{r\% Ca}^{2+} > \text{r\% Mg}^{2+} > \text{r\% K}^+$	Sulfaté	Sodique

Sur le tableau représentant la formule caractéristique on relève à l'amont de la plaine un faciès des eaux échantillonnées bicarbonaté sodique et rarement sulfaté calcique ; à l'Ouest de la plaine les eaux sont plutôt chlorurées calciques . quant au Nord c'est à dire à l'aval de la plaine au niveau des puits numérotés 14,15,16, et 17 on retrouve des eaux chlorurées et bicarbonatées calco-sodiques.

V. 1.4 Conclusion

Les analyses physico-chimiques des eaux souterraines contenues dans la plaine alluviale d'El-Milia ont conclu d'une eau bicarbonatée sulfatée sodique .

Les deux processus , celui du lessivage en période de hautes eaux et celui de l'évaporation en période de basses eaux modifient quelque peu le chimisme des eaux.

Les carences de contamination des eaux souterraines de cette nappe sont impactées au niveau de certains points de la nappe et à différents degrés notamment celles situées au nord de la plaine c'est à dire à l'aval de la tannerie mégisserie et des autres installations industrielles .

Les analyses hydrochimiques ont montré une suite d'ions majeurs $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^- > \text{Cl}^-$ et de $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$

Le diagramme de Piper fait ressortir que la majorité des eaux échantillonnées (66 %) situés au sud sont de faciès bicarbonaté sodique ; pour le reste les eaux sont chlorurées calciques et bicarbonatées calciques . L'origine du surplus des bicarbonates (HCO_3^-) par rapport au Ca^{2+} selon la droite de regression pourrait être expliqué par la relation avec la dissolution des formations dolomitiques

Les analyses relatives aux ETM affichent une pollution des eaux par le fer avec un foyer de concentration apparaissant au niveau de l'embranchement El-Milia-zone franche avec les valeurs les plus fortes (0,14 et 0,18 mg/l) mais aussi au Nord de la plaine (au Nord de la route nouvelle Naftal) tandis que les valeurs les plus faibles 0.05 à 0.09 se retrouvent à l'Est de la plaine.

Pour l'élément du cuivre on enregistre un foyer toujours au puis n°18 , un autre foyer entre la centrale Hyundai et le complexe siderurgique pour des valeurs entre 0.04 et 0.05 mg/l et puis à la confluence oued El-Kébir - oued Bou-Siaba pour 0.03 et 0.04 mg/l.

Pour l'élément du Ni on a toujours au puits n°18 en plus d'un point chez Hyundai et un autre point à l'Ouest et un point au niveau de la tannerie (0.07 et 0.08 mg/l) puis une plage sur tout l'Ouest avec des valeurs entre 0.06 et 0.07mg/l puis une plage occupant Boutias (à la sortie de l'oued d'El-Milia 0.07 et 0.08 mg/l) tandis que les valeurs les plus faibles se localisent à l'Est .

L'élément du zinc est présent à proximité de la central Hyundai en plus d'un foyer à Tenfdour et aussi à coté de l'usine de céramique sanitaire au sud-est .Les plus faibles teneurs sont à l'Ouest , à l'Est et au Sud

A l'endroit du puits n°18 apparait le noeud de pollution le plus important avec des concentrations des ETM (fer,Cu,Ni,Cd) par contre coté ions il est équilibré sauf pour les sulfates où il contient 265 mg/l.

Dans la zone de recharge (au Sud-Ouest et à l'Est de la plaine) le processus dominant est que la majorité des échantillons analysés révèlent une minéralisation assez importante et le faciès dominant des eaux est de type bicarbonaté sulfaté sodique et qui aurait vraisemblablement pour origine la présence d'importantes formations triasiques sur les reliefs surplombant l'Ouest de la plaine. Donc l'évolution spatiale de ces faciès chimiques est tributaire de la nature lithologique des roches encaissantes et du mode de recharge ; en effet les fortes concentrations ioniques sont en parfait accord avec la lithologie aquifère et les formations salifères avoisinantes.

Chapitre six : Impact des éléments indésirables et autres métaux lourds sur les eaux et vulnérabilité de la nappe

VI.1. Introduction :

A l'échelle de la planète, le nombre de polluants est considérable. En 1977, la société américaine de chimie en a dénombré 4 millions dont 70 000 suspects d'action cancérogène (G.Castany,1982) L'origine des polluants est multiple: domestique, urbaine, industrielle et agricole. On a trois classes de polluants.

VI.1.1 Polluants physiques :

- a) la température , l'élévation de la température de l'eau a un impact écologique sur la faune et la flore aquatique (prolifération des microorganismes et développement des algues qui consomme de l'oxygène) .
- b) Le transport des matières solides en suspension dont certaines petites particules de l'ordre du micron transitent et atteignent parfois les nappes profondes surtout dans des formations fissurées à porosité est élevée.
- c) la radioactivité qui est potentiellement le plus dangereux d'où une réglementation rigoureuse

VI.1.2. Polluants chimiques : ce sont les substances sous forme minérale ou organique.

Ils peuvent être dissous (sels, hydrocarbure), mélangés (alcools), émulsés (graisse sur détergents) les composés d'azote, nitrites et nitrates sont très importants ; ils ne sont pas présents dans les roches mais ils proviennent principalement des engrais agricoles.

VI.1.3. Polluants biologiques ce sont des polluants organiques et les microorganismes : germes, virus ou amibes sont sévères mais heureusement que le pouvoir auto-épurateur du sol (roches) est très efficace .

VI.2. Mode de transfert et d'allègement du polluant en milieu souterrain.

VI.2.1 Mécanisme de transport du polluant

Les facteurs prépondérants à la recharge des eaux souterraines sont essentiellement représentés par l'infiltration des eaux de précipitation , l'irrigation de surface et les différences de charges hydrauliques. Dans la zone saturée , les polluants sont transportés

uniquement sous la forme dissoute (Fig VI.1) contrairement à la zone non saturée où les processus responsables du transport sont plus variés et représentés essentiellement par un déplacement de masse et une dispersion mécanique et une diffusion moléculaire liquide.

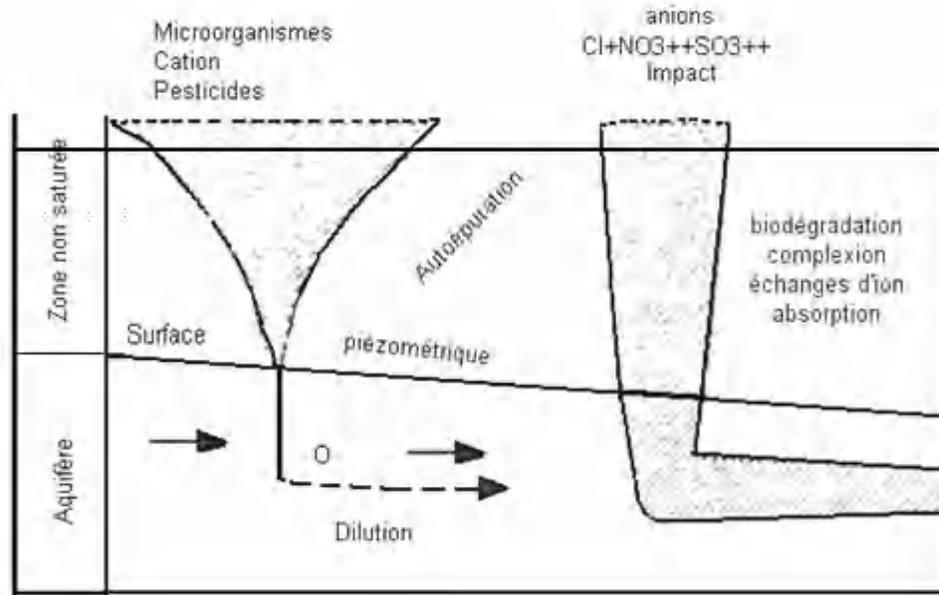


Figure VI.1 Mécanismes et facteurs de la pollution de l'eau souterraine (Castany,1982).

Une pollution produite à la surface du sol peut s'infiltrer jusqu'à la surface de la nappe de type libre traversant le parcours suivant:

VI.2.1.1 Une zone non saturée comprise entre le sol et la surface de la nappe. Cette zone vadose de nature lithologique variée allant des limons, graviers plus ou moins hétérogènes et grossiers et d'épaisseur faible (de quelque 4 ou 5 m à une douzaine de mètres) , cette profondeur conditionne en grande partie le temps de transfert vers la nappe (de quelques jours à quelques mois). Selon la perméabilité de la roche ,les circulations d'eau seront plus ou moins rapides. Dans ce milieu non saturé , les transferts de polluants se font sous l'influence d'une composante verticale.

VI.2.1.2 Une zone saturée qui constitue la nappe aquifère dans laquelle les transferts sont essentiellement latéraux (composante horizontale) conformément à la direction de l'écoulement général de la nappe.

VI.3 Rappel et définition :

La pollution des eaux souterraines est souvent générée par les rejets des activités domestiques et urbaines (eaux usées , décharges non contrôlées et sauvages qui seront lessivées par les eaux pluviales) , par les activités agricoles (les poulaillers et les étables , l'usage anarchique d'engrais, de pesticides avec parfois infiltration directe des polluants (NO_3 , NO_2 , SO_4 , PO_4 et Cl). et par des activités industrielles qui constitue la plus importante pollution générée par le traitement des minerais métalliques (l'activité métallurgique). qui libère une grande variété de substances métalliques qui contribue de façon décisive à la mise en circulation des ETM et à leur transfert dans les sédiments et les nappes d'eau.

La vulnérabilité d'une nappe traduit la capacité d'infiltration à travers le sol et la zone non-saturée de polluants partants de la surface.

Il s'agit d'une vulnérabilité intrinsèque, c'est-à-dire qu'elle dépend du contexte topographique (pente du terrain), pédologique (perméabilité), géologique (perméabilité, épaisseur)

L'industrialisation accélérée du site étudié abritant un pôle industriel constitué d'un complexe sidérurgique (Algerian Qatari Steel) , d'une méga-centrale électrique et d'une tannerie mégisserie pour le traitement chimique des peaux animales ; ajouté à cela une usine de fabrication de la céramique sanitaire et trois stations de service du carburant en plus des rejets des eaux usées ainsi que l'utilisation de plus en plus intensive d'engrais chimiques pour quelques vergers d'agrumes et des éleveurs de bétails et de volailles constituent un risque potentiel pour la pollution des eaux souterraines. La cartographie de la vulnérabilité de ces eaux à la pollution minimise ce risque par l'identification des zones les plus sensibles en vue d'une bonne gestion qualitative de la ressource. Ici dans le cas présent de la nappe alluviale d'El-Milia, sa vulnérabilité a été testée ou évaluée en utilisant la modèle DRASTIC.

VI.3.1 Rappel historique du modèle exécuté

Le modèle DRASTIC a été fondée par la National Water-well Association pour l'agence américaine pour la protection de l'environnement EPA (Environmental Protection Agency) en 1985 et Aller et al. en 1987 dans un but d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines . C'est une méthode basée sur un système de cotation numérique , cette méthode permet de tester et d'estimer la vulnérabilité spatiale de ces eaux souterraines en introduisant

au modèle sept composantes numériques représentant sept caractéristiques naturelles du réservoir abritant les eaux souterraines suspectées de pollution . L'initiale de chacun des sept termes du programme DRASTIC est représentée par l'initiale de chacune des sept caractéristiques naturelles de l'aquifère testé que sont (D, R, A, S, T, I et C) . Selon une optique de contribution à la pollution , l'importance relative de chacun de ces facteurs est affecté d'un coefficient selon son importance dit poids variant entre 5 pour les termes les plus significatifs et 1 pour ceux qui le sont moins. D'un autre coté , chacun de ces paramètres se voit attribuer un second coefficient nommé cote d'une valeur entre 1 et 10 selon leur contribution à la vulnérabilité la cote 10 est attribuée aux faibles profondeurs du niveau piézométrique compris entre 0 et 1,5 mètre (tableau VI.1) .

Les paramètres DRASTIC et leur poids respectif (Aller et al, 1987)

1. **D** : Depth to water (Profondeur du plan d'eau) 5
2. **R** : Net recharge (Recharge efficace de l'aquifère) 4
3. **A** : Aquifer media (Lithologie de l'aquifère) 3
4. **S** : Soil media (Type de sol) 2
5. **T** : Topography (Pente topographique du terrain) 1
6. **I** : Impact of the vadose zone (Impact de la zone vadose ou non saturée) 5
7. **C** : Hydraulic Conductivity (Perméabilité ou conductivité hydraulique de l'aquifère) 3

Chaque paramètre est assigné d'une côte allant de 1 correspondante aux conditions de moindre vulnérabilité jusqu'à 10 reflétant les conditions les plus propices à la contamination. Un indice DRASTIC partiel propre à chaque paramètre est alors déduit en multipliant sa côte par son poids relatif

$$\text{Indice partiel} = \text{poids} \times \text{côte}$$

L'indice DRASTIC résulte de la somme pondérée des indices partiels

La vulnérabilité des eaux de la nappe alluviale d'El-Milia est testée selon le modèle DRASTIC qui consiste en un indice numérique englobant la somme pondérée de sept cotes correspondantes aux 7 termes du modèle définis ci dessus. L'indice total (DRASTIC) est déterminé par le produit de la cote de chaque paramètre avec la cotation estimant son importance ou son poids et en faisant la somme de ces produits comme suit :

$$\text{L'indice DRASTIC} = \mathbf{Dc.Dp} + \mathbf{Rc.Rp} + \mathbf{Ac.Ap} + \mathbf{Sc.Sp} + \mathbf{Tc.Tp} + \mathbf{Ic.Ip} + \mathbf{Cc.Cp}$$

tel que les indices 'c' et 'p' correspondent respectivement à la cote et au poids du paramètre de sorte que l'indice calculé représente une évaluation du degré du risque de pollution ou de contamination d'un aquifère. Ce risque est de toute évidence d'autant plus important que les valeurs de l'indice sont élevées .

Rappelons que les conditions aux limites d'application du modèle DRASTIC qui sont au nombre de quatre à savoir :

- ① l'introduction du polluant doit parvenir depuis la surface du sol.
- ② le polluant doit être véhiculé jusqu'aux eaux souterraines par les eaux de précipitations.
- ③ le polluant jouit de la mobilité de l'eau.
- ④ la superficie à évaluer doit faire au moins 0,4 km².

VI.3.1.1 Les cartes thématiques de zonation hydrogéologique :

Les cartes ainsi réalisées affichent le degré de vulnérabilité en tout point et en toute zone de l'aquifère étudié. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index cartographique. Ces cartes thématiques sont élaborées selon les critères géologique et lithologique du sol et de l'aquifère , de la profondeur piézométrique , celui de la topographie de la plaine objet de cette étude , de hydrologie et du coefficient de perméabilité . Ce qui aboutit à déterminer les critères constituant le modèle DRASTIC ci-dessous de sorte que là où le produit (cote x poids) est important , le risque de pollution est important .

a) Profondeur de l'eau (D)

Le critère de la profondeur de la surface piézométrique dans la nappe est un paramètre important en ce qu'il représente l'épaisseur de la zone vadose à travers laquelle l'élément contaminant percole avant d'arriver au niveau piézométrique. Le coefficient attribué à ce paramètre profondeur est si important qu'il est de l'ordre de cinq (5) conformément à la cotation de la profondeur insérée dans le tableau ci-dessous. Les indices ainsi calculés permettent de dresser la carte correspondante.

Tableau VI.1 Cotation du paramètre profondeur de l'eau

Profondeur de la nappe (en mètres)			
Intervalle	Dc	Dp	Dc.Dp
0 – 1,5 m	10	5	50
1,5 – 4,5 m	9	5	45
4,5 – 9 m	7	5	35
9 – 15 m	5	5	25
15 – 23 m	3	5	15
23 – 31 m	2	5	10
> 31 m	1	5	5

Tableau VI.2 Valeurs de la profondeur de l'eau au niveau de la nappe

Puits	X (UTM)	Y (UTM)	Profondeur
1	256 208	4 069 538	4,5
2	256 146	4 069 379	4
3	256 044	4 069 095	4
4	256 021	4 069 140	4
5	255 923	4 068 813	4
6	255 890	4 068 958	4
7	255 587	4 068 787	4,5
8	255 983	4 069 463	4,7
9	255 981	4 069 388	4
10	253 726	4 070 220	9
11	255 466	4 067 702	3
12	253 885	4 069 806	2,5
13	254 864	4 068 884	6
14	255 119	4 073 139	2,5
15	253 448	4 072 721	8
16	255 056	4 072 937	4
17	254 736	4 072 704	3,6
18	255 732	4 068 294	15
19	255 451	4 073 314	1,5

Indice D

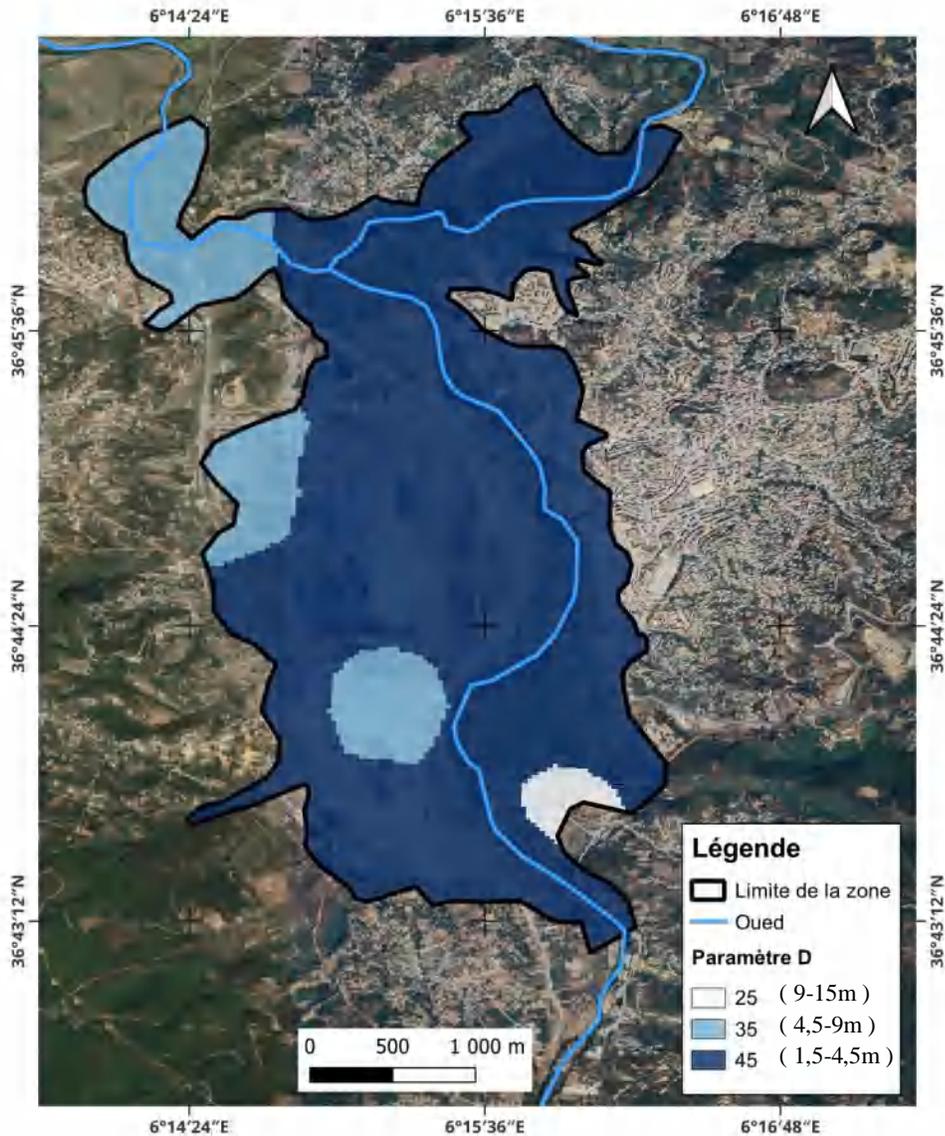


Figure VI.2 Carte de répartition des valeurs de l'indice de la profondeur d'eau dans l'aquifère.

La lecture de la carte en figure VI.2 ci-dessus nous permet d'observer trois zones distinctes dont la profondeur piézométrique varie entre 9 et 15 m. pour un indice $D_c.D_p$ comptant pour le paramètre D d'une valeur de 25 faisant foyer au sud de la plaine à proximité du puits n°18 ; une seconde zone où le paramètre D est coté 35 apparaît dans trois foyers à l'ouest de la plaine tandis que tout le reste de la surface de la plaine correspond à la valeur paramétrique maximale de D valant 45 .

b) La recharge efficace de l'aquifère (R)

Au vu du rapport précipitation/température qui est largement supérieur à 3 durant la période allant du mois de novembre jusqu'au mois de mars, on peut affirmer qu'il s'agit d'un régime que l'on peut classer humide voire même très arrosé et qu'il humide en avril et en octobre . L'étude climatique du secteur d'étude a montré que pour un volume d'eau précipitée de 881,6 mm/an et une évapotranspiration annuelle moyenne atteignant les 689,8 mm ce qui équivaut à 78,2 % de la lame d'eau précipitée laissant derrière elle un excédent confortable de plus de 21 % qui représente une recharge efficace de **191,8mm**

Tableau VI.3 Cotation du paramètre recharge de l'aquifère

La recharge (mm)			
Intervalle	Rc	Rp	Rc.Rp
0 – 50	1	4	4
50 – 100	3	4	12
100 – 180	6	4	24
180 – 250	8	4	32
> 250	9	4	36

Indice R

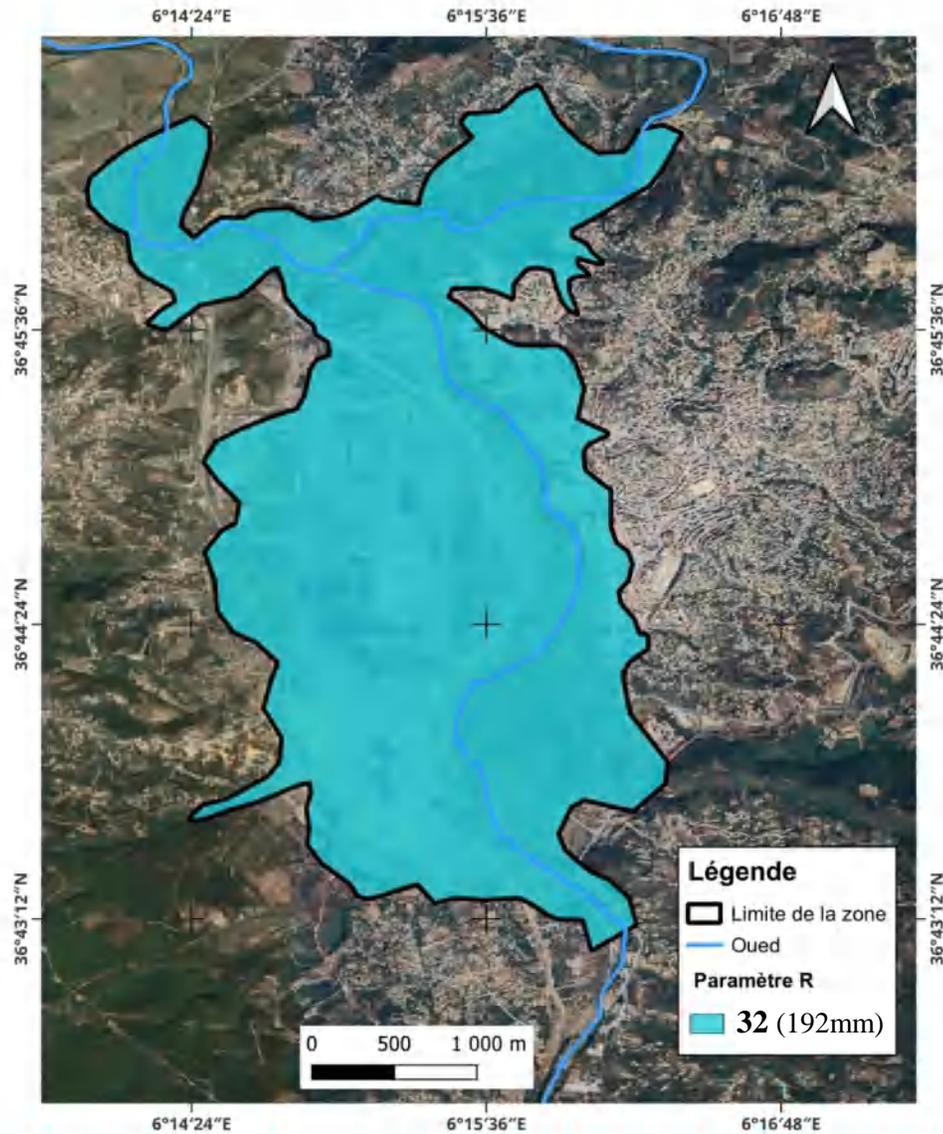


Figure VI.3 Carte de répartition des valeurs de l'indice recharge de l'aquifère

L'indice relatif à la recharge de l'aquifère évalué à 32 pour sa cote $R_c.R_p$ laquelle est en fait considérable car correspondante à un intervalle dépassant 190 (191,8mm) et donc donnant lieu à une représentation cartographique unicolore du fait de la répartition uniforme de la recharge efficace au niveau de l'impluvium de la plaine étudiée.

c) La nature lithologique de l'aquifère (A)

L'examen des sondages électriques verticaux réalisées sur la plaine étudiée avec les coupes géoélectriques constituent l'outil géophysique principal pour la détermination du paramètre lithologie de l'aquifère ; en effet la lithologie de l'aquifère est décrite à travers les colonnes stratigraphiques des cinq puits représentatifs comme suit :

Puits n° 11

de 4 à 11 mètres graviers fins et moyens galets grés calcaires quartzitiques

11 à 12 m graviers, sable et galets

12 à 32 m graviers, galets , sables et grés

32 à 44 m marnes plastiques et argiles

Puits n° 15

0 à 6 m argiles, marnes et sables

6 à 22 m graviers, grés et sables

22 à 31 m marnes, argiles et peu de graviers

31 à 38 m graviers fins et grossiers et grés

Puits n° 16

0 à 4 m terre végétale argileuse micacée

4 à 10 m sables fins micacés

10 à 13 sable moyen

13 à 18 graviers moyens, quartz et calcite

18 à 21 graviers moyens légèrement marneux

21 à 29 graviers grossiers légèrement argileux

21 à 35 m graviers grossiers puis moyens et argileux

35 à 37 m galets et graviers

> 37 m argiles

Forage F13

0 à 18 m graviers fins et moyens , grossiers avec galets sableux et silex avec quelque passées argileuses

> 18 m substratum bombé puis replongeant vers les profondeurs en allant vers le nord vers le forage F7

Puits n° 18

0 à 4 m terre végétale et graviers

4 à 11 m graviers fins, sable et galets, grés et quartz et calcaires

11 à 12 graviers fins et sable

12 à 32 m graviers, galets et sable

32 à 44 m marnes miocènes

L'on constate à travers le descriptif de ces colonnes stratigraphiques que la nature des matériaux constituant l'aquifère sont les graviers, sables, galets et grés à matrice calcaireuse et par conséquent il leur est attribué un indice valant entre 21 et 24 en application des valeurs indicielles indicatives insérées dans le tableau ci-dessous.

Tableau VI.4 Cotation du paramètre lithologie de l'aquifère

Cotation des matériaux de l'aquifère			
Intervalle des classes	Ac	Ap	Ac.Ap
Schiste argileux	2	3	6
R.métamorphique ou ignée	3	3	9
R.métamorphique altérée	4	3	12
Grés calcaire et schiste	5	3	15
Grés ou calcaire massif	<u>6</u>	3	18
Grés	7	3	21
Sables et graviers	8	3	24
Basalte	9	3	36
Calcaire karstique	10	3	40

Indice A

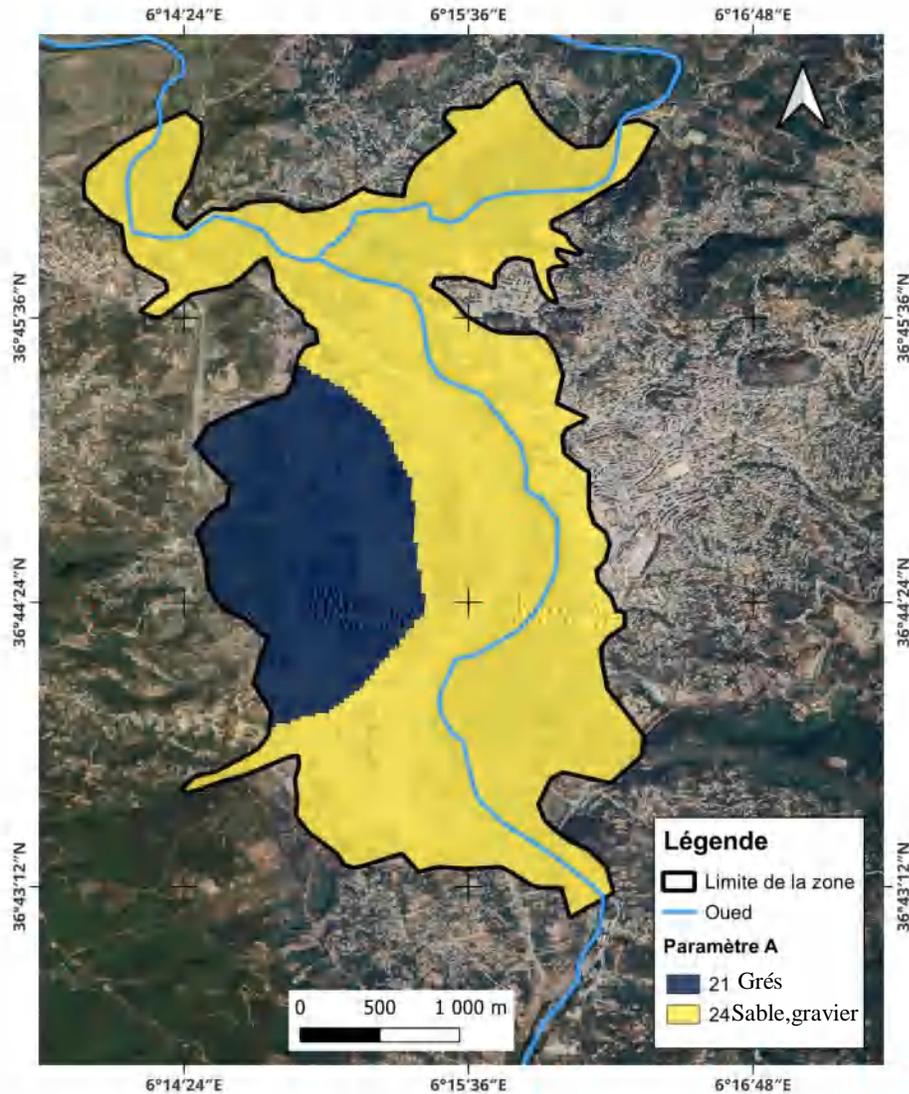


Figure VI.4 Carte de répartition des valeurs de l'indice lithologie de l'aquifère

La nature lithologique n'étant pas très variée puisque l'aquifère est contenu dans une nappe alluvionnaire et se trouve être constitué de graviers, de sables, de limons, d'argiles et de grés d'où un indice (Ac.Ap) évalué à 21 pour les grés (intermédiaire entre la cote 6 et la cote 8, voir tableau VI.4) et 24 pour les graviers, sables et galets d'après le tableau (VI.4) inséré ci-dessus fixant la cotation du paramètre A. La carte ainsi établie montre une plage située à l'ouest de la plaine dont l'indice (Ac.Ap) est estimé à 21 et le reste de la surface de la carte correspondant à l'indice valant 24.

d) Le type de sol (S)

Le facteur "type de sol" a aussi son poids pour le volume d'eau qui s'y infiltre lors de son cheminement pour atteindre la nappe d'eau souterraine véhiculant les éventuels polluants en passant par la zone vadose. De la même manière que pour le paramètre lithologique de l'aquifère le facteur type de sol est très varié d'un endroit à un autre sur la plaine de sorte qu'il est constitué d'un artifice de sédiments allant des graviers, sables et galets jusqu'aux limons et des lentilles d'argiles déterminés géophysiquement par les sondages électriques verticaux et il se voit donc affecté une évaluation indicielle allant de 6 à 18 selon le tableau ci-dessous.

Tableau VI.5 Cotation du paramètre type de sol

Cotation du type de sol			
Intervalle des classes	Sc	Sp	Sc.Sp
Mince ou absent, gravier	10	2	20
sables	9	2	18
Matériau organique,tourbe	8	2	16
Argile fissurée	7	2	14
Loam sableux	6	2	12
Loam (sable,limon,silt)	5	2	10
Loam limoneux	4	2	8
Loam argileux	3	2	6
Matériau organique	2	2	4
Argile intacte	1	2	2

Indice S

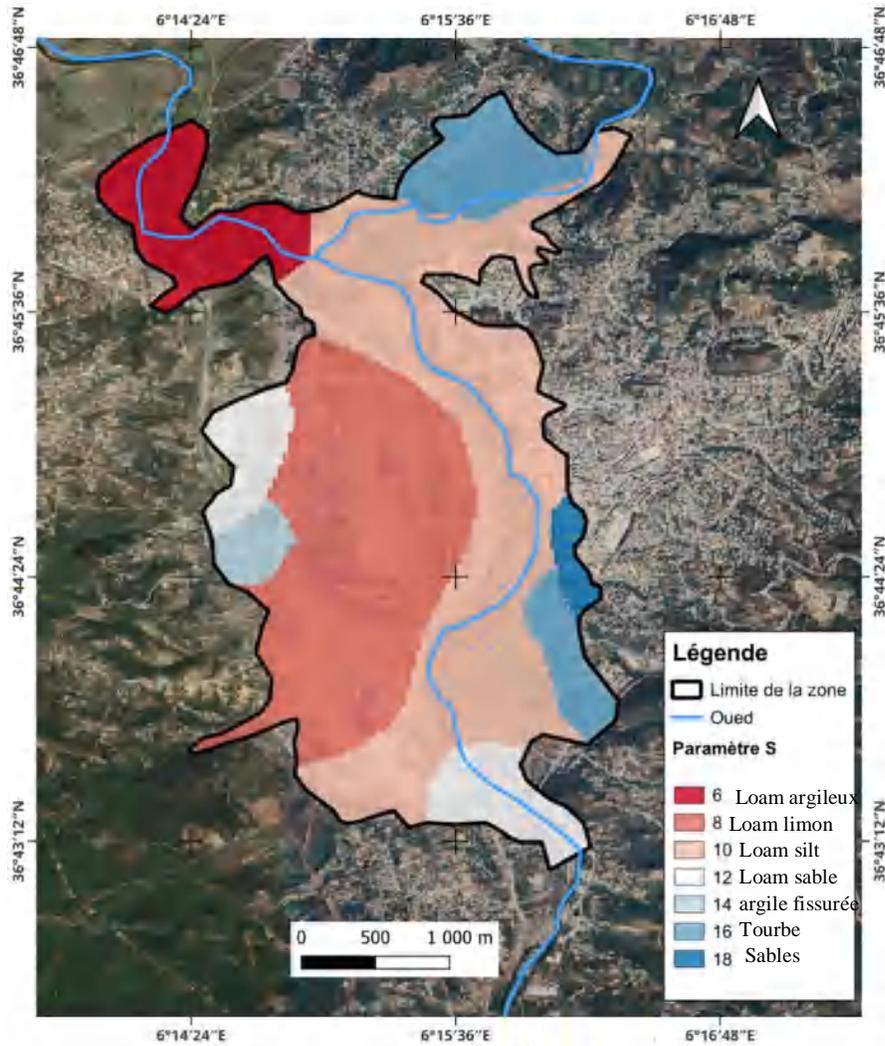


Figure VI.5 Carte de répartition des valeurs de l'indice type de sol

La représentation cartographique relative au paramètre correspondant au type de sol S illustre des foyers indiciels les plus forts dans le secteur Est et Nord-Est de la plaine ; quand à la zone ouest où se situe le complexe sidérurgique et la centrale électrique l'indice (Sc.Sp) est moyen avec des valeurs indicielles allant de 10 à 12 pendant que l'indice est le plus faible est localisé au Nord-ouest .

e) La pente topographique du terrain (T)

La topographie est le paramètre le moins considéré de DRASTIC avec un poids de 1 , l'indice relatif à ce paramètre est spécifié selon le pourcentage de la pente topographique du terrain d'étude . Les valeurs de référence vont de 0 à 18%. Il se trouve que la particularité du secteur étudié est une plaine alluviale d'où une pente quasiment régulière mais quelque peu cabossée ça et là, ce qui nous a contraint à procéder par un traitement d'image satellitaire d'où le résultat cartographique ci-dessous obtenu où les cinq classes d'intervalle sont représentées.

Tableau VI.6 Cotation du paramètre pente de terrain

Cotation de la pente du terrain			
Intervalle	Tc	Tp	Tc.Tp
0 – 2 %	10	1	10
3 – 6 %	9	1	9
7 – 12 %	5	1	5
13 – 18 %	3	1	3
> 18 %	1	1	1

Indice T

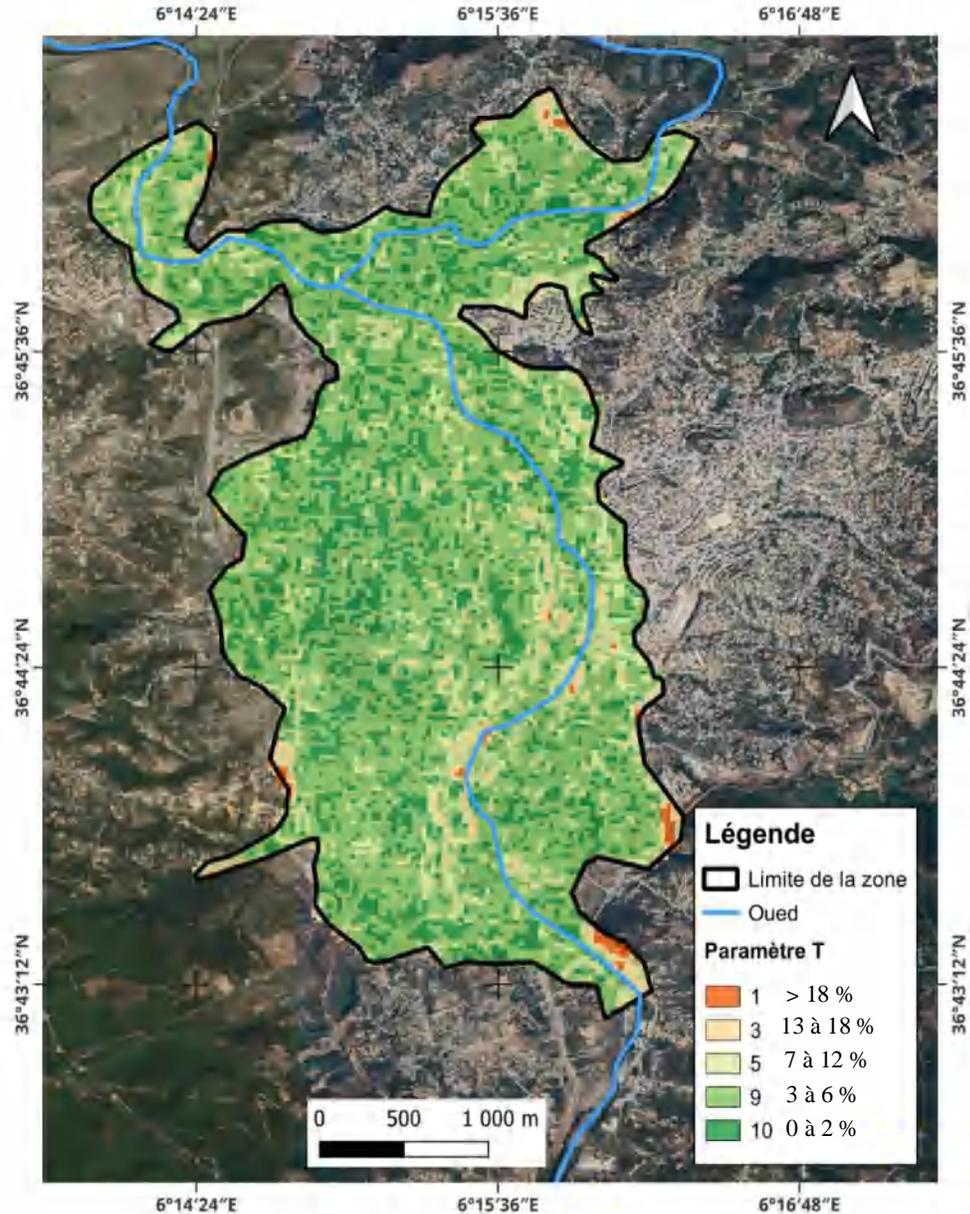


Figure VI.6 Carte de répartition des valeurs de l'indice topographique 13 à 18 %

Pour la détermination du 5^e indice du modèle drastic qui représente la pente du terrain , il a été utilisé un programme de traitement d'image satellitaire ou modèle numérique de terrain MNT SRTM et cela pour le calcul de précision de la topographie de la plaine étudiée et par conséquent de l'indice correspondant (T) qui a abouti à cinq classes de pente 1,3,5,9 et 10. distribués plus ou moins uniformément sur la plaine.

f) La nature de la zone vadose (I)

Il est accordé une importance considérable à la zone vadose dans le programme drastic de sorte qu'il lui est attribué un facteur de pondération maximal égal à 5 au même titre que la profondeur piézométrique . En effet la zone non saturée joue un role determinant dans la percolation de la substance contaminante de l'aquifèreen fonction de sa composante lithologique,de son épaisseur et de sa texture.

Tableau VI.7 Cotation du paramètre Impact de la zone vadose .

Cotation de l'impact de la zone non saturée			
Intervalle des classes de la zone vadose	Ic	Ip	Ic.Ip
Argiles silts et Schiste argileux	3	5	15
Sables et graviers avec limons et argiles	6	5	30
Sables et graviers	8	5	40
Basalte	9	5	45
Calcaire karstique	10	5	50

Indice I

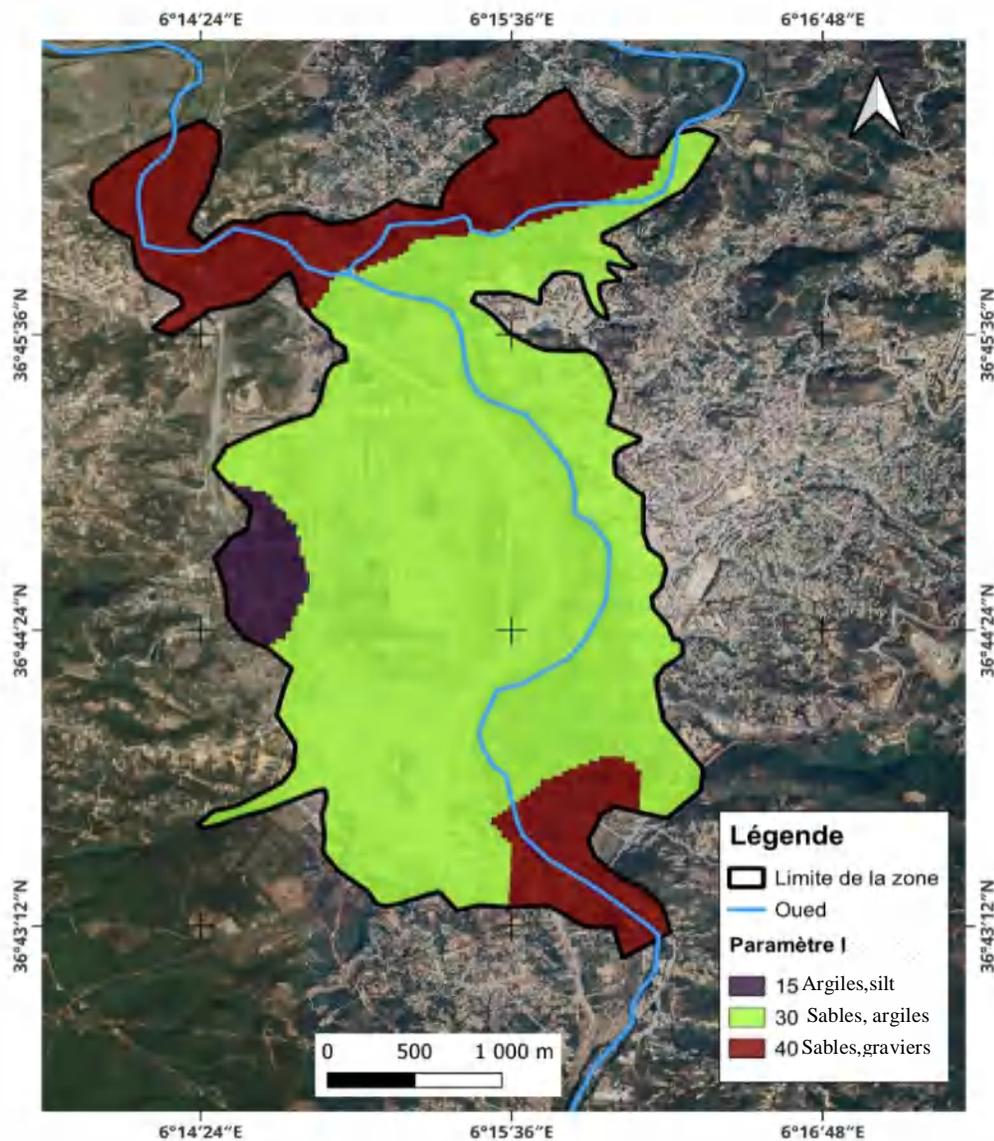


Figure VI.7 Carte de répartition des valeurs de l'indice de la zone non saturée

L'étude des logs stratigraphiques des différents forages et puits a permis la détermination de l'indice paramétrique (I_c , I_p) qui s'est avéré élevé pour des formations sablo-graveleuses dans la zone Sud et la zone Nord de l'aquifère, indice faible dans le secteur ouest et assez fort dans le reste de l'aquifère avec une constituante sablo-graveleuse, limoneuse et par endroits argileuse.

g) La conductivité hydraulique (C)

Le coefficient de perméabilité étant calculé à partir du rendement des forages lors des essais de pompage réalisés, traduisant la vitesse de transfert d'éventuels contaminants véhiculés par l'eau d'infiltration dirigée vers la nappe aquifère, a montré des valeurs de perméabilité élevées dans la partie sud de l'aquifère contrairement à l'aval de la plaine où se concentre une forte peuplade et où est exercé l'élevage bovin.

	x	y	k
<u>puits n° 15</u>	253448	4027721	4.27 x 10 ⁻⁵ m/s ou (3,68 m/j)
<u>puits n° 16</u>	255056	4072937	3.82 x 10 ⁻⁵ m/s ou (3,30 m/j)
<u>puits n° 11</u>	255466	4067702	1.33 x 10 ⁻⁴ m/s ou (11,49 m/j)
<u>puits n° 18</u>	255732	4068294	1.09 x 10 ⁻⁴ m/s ou (9,41 m/j)

Tableau VI. 8 Cotation du paramètre conductivité électrique

Cotation de la perméabilité			
Intervalle (m/j)	Cc	Cp	Cc.Cp
0,4 à 4	1	3	3
4 à 12	2	3	6
12 à 29	4	3	12
29 à 41	6	3	18
41 à 81	8	3	24
> 81	10	3	30

Indice C

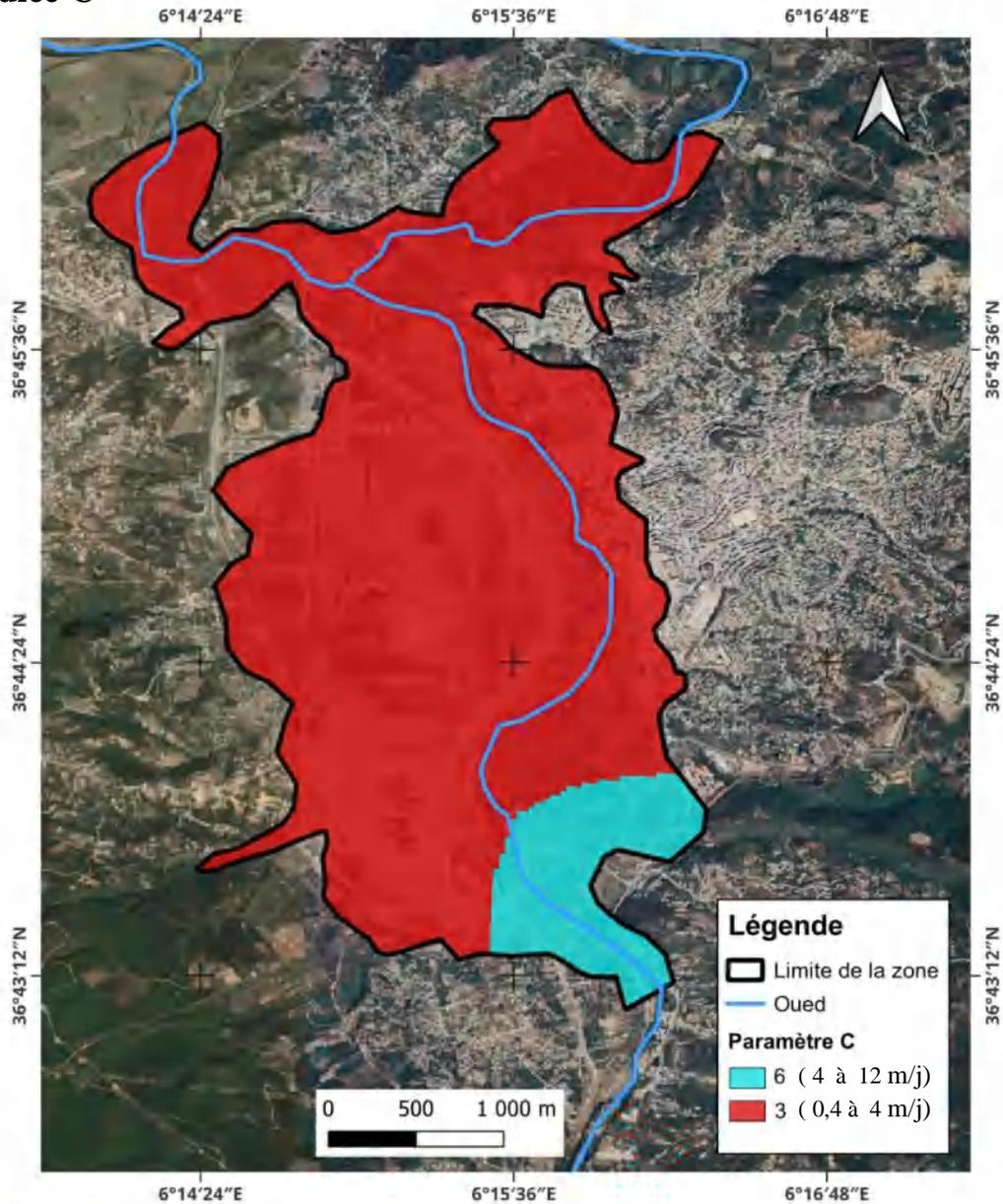


Figure VI.8 Carte de répartition des valeurs de l'indice de perméabilité

La conductivité hydraulique se voit attribuer par le programme drastic une cotation pondérale assez importante de 3 du fait du rôle qu'elle remplit dans le transport des contaminants par l'eau; sa représentation cartographique montre deux plages : l'une importante cotée 6 et l'autre occupant le reste de la carte cotée plus faiblement (3).

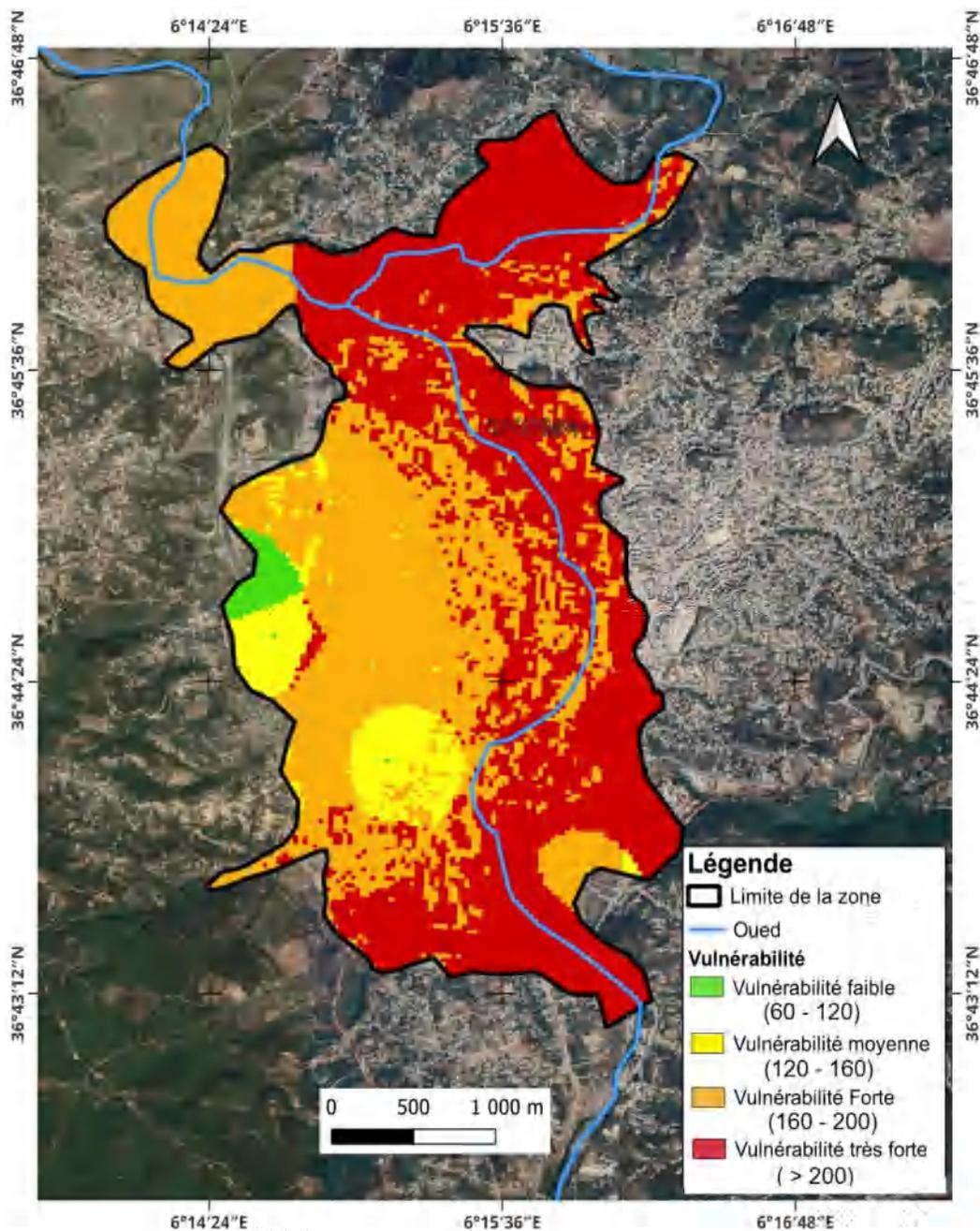


Figure VI.9 Carte de la vulnérabilité à la pollution selon la modèle DRASTIC

La lecture de la carte (Fig. VI.9) nous permet d’observer quatre zones distinctes de vulnérabilité de l’aquifère à la pollution : une première zone à très forte vulnérabilité située au Sud et sur tout l’Est de l’aquifère où se situe l’usine de céramique sanitaire et la tannerie mégisserie ainsi qu’au nord où est pratiqué l’élevage bovin .

Conclusion

La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines est une méthodologie qui est devenue impérative afin d'assurer la gestion qualitative des ressources en eau et la protection des captages d'eau destinée à l'alimentation humaine. Elle se trouve donc être nécessaire et incontournable, car elle permet d'identifier facilement les zones sensibles à des pollutions potentielles. Cependant l'usage de ces cartes pour la limitation efficace de la protection des eaux souterraines doit tenir compte du contexte hydrodynamique de l'aquifère qui ne compromet pas inutilement la planification et la gestion des ressources d'eau. L'originalité de ce travail réside dans la réalisation d'une cartographie de la vulnérabilité de la plaine d'El-Milia qui, jusqu'à ce jour, n'avait pas été dressée, et cela en utilisant un indice de vulnérabilité récemment introduit. D'autres études doivent s'en suivre afin d'élaborer des cartes plus précises et tenant compte d'un nombre important de données. Par ailleurs la désadaptation de cette méthode (drastic) se situe au niveau des intervalles des paramètres où la valeur indicielle est la même en tout point de la nappe ; pour illustration prenons l'exemple de la carte de répartition des valeurs de la recharge de l'aquifère qui est uniforme où $R_c.R_p$ est constant sur toute la surface de la nappe et prend donc la même couleur sur la carte représentative. Néanmoins il reste que le modèle drastic appliqué offre une meilleure approche de la vulnérabilité du fait qu'il constitue la combinaison d'un nombre considérable de paramètres (07 facteurs)

L'observation de la carte sur les figures IV.7 et IV.8 nous permet de dégager trois zones différentes en termes de profondeur piézométrique : au Nord-Est de la plaine de 4 à 4,5 mètres ; aux environs du complexe sidérurgique (a.q.s) une profondeur piézométrique d'une dizaine de mètres et une troisième zone à l'Est de la plaine avec une profondeur piézométrique de 2 à 3 mètres ce qui contribuerait négativement et favorablement à l'atteinte pollutionnelle de ces eaux. Les zones les plus vulnérables étant représentées par des aires de recharge dont la hauteur de la lame d'eau pénétrante est comprise entre 18 et 25cm/an) pour un indice partiel $IR = 28$, et pour $IR = 32$ la recharge est supérieure à 25 cm/an. Ces zones reçoivent donc en plus des eaux de pluie, les eaux provenant des reliefs par percolation.

Cela s'explique également par la remontée ou le bombement du substratum à ce niveau donc la recharge varie.

L'indice de vulnérabilité DRASTIC représente une évaluation du niveau de risque de contamination d'une formation aquifère. Ce risque augmente naturellement avec la valeur de l'indice qui varie dans un intervalle compris entre 23 et 226. Son estimation n'est possible que par l'analyse comparative entre différents sites ou unités hydrogéologiques.

Conclusion générale

La présente recherche d'apparence modeste étudiant la plaine alluviale d'El-Milia laquelle n'ayant constitué jusque là aucun intérêt doctoral pour les chercheurs vient en initiatrice pour ouvrir la voie à d'autres afin de la valoriser davantage .

Cette étude a été formalisé sur un aquifère de type nappe superficielle libre . Elle constitue une approche géologique , climatologique et hydrogéologique des eaux souterraines en milieu poreux alluvial.

Le bilan hydrologique dégagé à l'issue de l'étude hydroclimatologique de cette région, il a défini un régime climatique de type humide voire même très arrosé avec une moyenne de précipitation de 881.6 mm/an dont une recharge efficace très généreuse atteignant les 21% de la lame d'eau écoulée bien qu'au cours des deux dernières decennies (2001 – 2021) la distribution mensuelle des précipitations a montré un sérieux ralentissement depuis l'année 2015 en chutant de 1312 mm/an en 2013 par exemple à 558 mm/an en 2015 et 448 mm/an pour 2016.

L'aquifère contenu dans la plaine d'El-Milia se présente morphométriquement ceinturé de reliefs de toute part avec un écoulement fluvial Sud-Nord.

L'altitude moyenne des sommets est d'environ 365 mètres alors que celle de la plaine est de 35 mètres. La description géologique a permis la définition de dépôts alluvionnaires en remplissage de la vallée de l'oued El-Kébir aval et de son confluent oued Bou-Siaba et constituant précisément les formations perméables et aquifères. Cet aquifère déterminé géophysiquement bombé çà et là au gré du soulèvement du substratum miocène par endroits notamment au sud de la plaine d'où les potentialités les plus productives.

Les ordres de grandeur de la profondeur piézométrique entre le Sud et le Nord de la plaine en comparaison entre la carte établie en 2001 , celle de 2011 et celle de l'année 2021 aux limites de l'aquifère avec les reliefs limitrophes , elles montrent un flux imposé, d'où des apports entrants .

Les eaux de la plaine d'El-Milia présentent une pollution organique plus ou moins importante surtout au niveau des drains collecteurs riches aux eaux de rejet, cela est dû à l'influence de plusieurs facteurs dont la profondeur , ce facteur est lié à plusieurs paramètres d'abord et surtout lithologique ensuite la température n'atteignant pas des profondeurs importantes.

Pour les éléments traces métalliques et à l'endroit du puits n°18 apparait le noeud de pollution le plus important avec des concentrations des ETM (Fe,Cu,Ni,Cd) par contre du coté ions il est équilibré sauf pour les sulfates où il contient 265 mg/l

Perspective prévisionnelle :

- * Instaurer un périmètre de protection immédiat rigoureux autour du champs de captage des eaux souterraines de cet aquifère destinées à l'alimentation de la population d'EI-Milia
- * Veiller au fonctionnement permanent de la station d'épuration des effluents de la tannerie mégisserie.

Références bibliographiques

Bakalowicz M.1979 : Contribution à la géochimie des eaux et à la connaissance de l'aquifère et de la karstification . Thèse de doctorat ès sc. Université P. et M. Curie,260 p. Paris 6^è.

Bétier M G., 1933 : Carte géologique 1/50 000 de Ain-kechera, Feuille n°30, Publ.Serv.Carte géol. Algérie.

Bouillin J-P., 1977 :Géologie alpine de la petite Kabylie dans la région de "Collo" et "d'El Milia" (Algérie). Thèse SC., Paris VI, 551 p., 127 fig., 2 pl.h.t.

Bouillin J-P., 1979 :La transversale de Collo et d'El Milia (petite Kabylie) : une région clef pour l'interprétation de la tectonique alpine de la chaîne littorale d'Algérie. Mém. Soc.Géol. Fr., N.S., t. LVII ;n°135, pp. 1-84, 51 fig., 1 pl.h.t.

Bouillin J-P., Raoult J-F1971 : Présence sur le socle kabyle du Constantinois d'un olistostrome lié au charriage des flyschs ; le Numidien peut-il être un néo-autochtone ? Bull.Soc.Géol.Fr. (7), XIII, p.338-362, 8 fig. Paris.

Bourzama A.,2003: Identification de la plaine alluviale de l'oued El-kébir aval (El Milia , Nord Est algérien). Thèse de Magister., Constantine.

Castany G., 1980 : L'eau propre,Paris . Hachette.

Castany G., 1982 : Principes et méthodes de l'hydrogéologie,Paris.Dunod.

Castany G., 1982 : Prospection et exploitation des eaux souterraines,Paris.Dunod.

Chadi M., 1991 :Étude géologique de monts de Ain M'lila (Algérie orientale). Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy1, 191p

Coiffait P-E., 1992 :Un bassin post-nappe dans son cadre structural l'exemple du bassin de Constantine (Algérie Nord Orientale). Thèse Sciences. Nancy I.P.502.

Deleau P., 1934 : Observations sur la chaine numidique. Le djebel m'cid Aicha, le Kef sema, au sud d'El milia. C.R.somm.Soc.Géol.Fr., p.134. Paris.

Deleau P., 1938 :Étude géologique des régions de Jemmapes, Hammam Meskhoutine et du Col des Oliviers. (Thèse, Paris). Puhl.Serv.Carte.géol.Algérie (2), n°14, texte et atlas. Alger.

Demdoum A., 1996 : Étude hydrogéologique et problème de la qualité des eaux des bassins fermés d'El-eulma. (Thèse de Magister). Constantine.

Dewey, J.E., Pittman, W.C., Ryan, W.B., 1973 :Plate tectonics and the évolution of the alpine system. Bulletin géologique de la société américaine, 84, pp 3137-3180.

Durand-delga M., 1952 : Carte géologique 1/50 000 de Sidi Marouane, Feuille n°50, Publ.Serv.Carte géol. Algérie.

Durand-delga M., 1955 : Carte géologique 1/200 000 de l'ouest de la chaîne numidique et des régions voisines, Assemblage des cartes n° (28 Djidjeli, 29 El Milia, 30 Ain kechra, 49 Tamesguida, 50 Sidi Merouane, 51 Sidi Dris), Publ.serv.carte géol. Algérie.

Durand-delga M., 1955 : Étude géologique de l'Ouest de la chaîne Numidique. Publ. serv. Carte géol. Algérie, Bull. n° 24, 533 p., 143 fig., 16 pl., 10 pl.h.t.

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., 1980 : La Méditerranée occidentale : étapes de sa genèse et problèmes structuraux liés à celle-ci. Mém. H. S. Soc. Géol. Fr., n°10, pp 203-224, 7 fig.

Durand-delga M., Fontbote, J.M 1980 : Le cadre structural de la Méditerranée occidentale. 26° Congrès Géol. Intern., Paris. Colloque 5, Mém. BRGM., n°115, Orléans :67-85.

Flandrin J., 1952 : La chaîne du Djurdjura. XIXe Congr.géol.Intern., Alger. Monogr. Région., n°19, 43 p., 1 fig., 4pl.

Hilly J., 1952 : Présence du Burdigalien dans les massifs du cap de Fer et de la Kabylie de Collo (Nord-Constantinois, Algérie). C.R.Acad.Sc.,t. 234, p. 1073-1076. Paris.

Hilly J., 1957 : Étude géologique du Massif de l'Edough et du Cap de fer (Est-Constantinois). (Thèse, Nancy). Mém.Fac.Sc.Nancy, n°125, 408 p., 109 fig., XXII tabl., XXV pl. Nancy.

Ehrman F., 1928 : Carte géologique 1/50 000 d'El Milia, Feuille n°29, Publ.Serv.Carte géol.Algérie.

Gelard J-P 1969 : Le flysch à base schisto-gréseuse de la bordure méridionale et orientale du massif de Chellata : le flysch maurétanien (Grande Kabylie). Bull.Soc.géol.Fr. (7), XI, p. 676-686, 3 fig., 1 pl. Paris.

Glangeaud L., 1933 :Unités paléogéographiques et structurales de l'Atlas méditerranées (Algérie, Maroc, Tunisie). Actes Soc. Linn. Bordeaux, t.85, p.1-48, 13 fig., 2 pl. Bordeaux.

Guiraud R., 1973 : Évolution 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 Sc. Univ. Nice, 270p. 114 fig. 12 pl. h.t.

Joleaud L., 1910 : Carte géologique 1/50 000 de Sidi Driss, Feuille n°51, Publ. Serv. Carte géol. Algérie.

Joleaud L., 1912 : Étude géologique de la chaîne numidique des monts de Constantine. (Thèse, Paris). Montpellier, Montane, Sicardiet, Valentin édit., 436 p., 6 pl.

Kieken M., 1962 : Les traits essentiels de la géologie algérienne. In **Vila J M.**, 1980 : La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse Sc. Univ. Paris VI, 3 vol, 663 p., 199 fig., 40 pl., 7 pl. h.t.

de Marsily G., 2004 : Cours d'hydrogéologie, 226 p. Université P. et M. Curie, Paris 6^e.

Paquet, J., 1974 : La Tectonique éocène dans les cordillères bétiques, Vers une nouvelle conception de la paléogéographie en méditerranée occidentale. Bulletin de la société géologique de la France., (7), XVI, pp 58 -71.

Raoult J-F., 1969 : Nouvelles données sur les flyschs du Nord du Kef Sidi Driss et dans la zone du Col des Oliviers (Nord du Constantinois, Algérie) Bull. Soc. Géol. Fr., (7), t. XI, pp 516-543, 2 fig.

Raoult J-F., 1974 : Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord - Constantinois, Algérie). Mém. Soc. Géol. Fr., N.S., t. LIII, n°121, 164 p., 62 fig., 11 pl. h.t.

Raoult J-F., 1972 : Précision sur les flyschs massylien : série stratigraphique, variation de faciès, nature du matériel remanié (Nord du Constantinois, Algérie). Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, t. 63, fasc. 1-2, p. 73-92, 3 fig.

Roubault, M., 1934 : La Kabylie de Collo. Étude géologique. Thèse D'état, Paris. Bulletin du service de la carte géologique de l'Algérie, 2, No 10, 272 p.

Roubault, M., 1952 : Sur l'origine des granites tertiaires de la Kabylie de Collo (Département de Constantine). C.R. Acad. Sc., t. 235, p. 307. Paris.

Suzzoni, J-M., Aït M.R., Gérald, J-P., 1992 : Identification d'une période distensive multidirectionnelle par l'analyse microstructurale dans les basaltes d'âge Langhien de Dellys (Grande Kabylie, Algérie). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris., T 314, Série, II, pp 821 -827.

Tapponnier.,P, 1977 : Évolution tectonique du Système alpin en méditerranée. Poinçonnement et écrasement rigide plastique. Bulletin de la société géologique de la France (7),19,pp437 -460.

Vila J-M., 1980: La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens .Thèse Sc. Univ. Paris VI, 3 vol, 663 p., 199 fig., 40 pl., 7 pl.h.t.

Vila J-M., 1969 : Relations paléogéographiques et structurales entre le flysch de Penthiève et les unités externes de la dorsale kabyles dans la région de Jemmapes (Nord du Constantinois, Algérie). Bull. Soc. Géol. Fr., (7), XI, p.544-551, 3fig. Paris.

Vila J-M., 1971 : Paléogéographie et tectonique des unités allochtones de type tellien et de type flysch à microbrèches dans le Nord-Est du Constantinois (Algérie). C.R.Acad.Sc. (D), t.272, p.1047-1050, 1fig. Paris.

Vila J-M., 1966 : Sur la présence d'un flysch allochtone titonique et néocomien dans la région située entre Bône (Annaba) et Guelma (Est de la Chaîne numidique, Algérie). C.R. somm. Soc.Géol.Fr., p232, 1fig. Paris.

Wildi W., 1983 :La chaîne tello rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. Rev. Géol. Dyn. géog. Phys., (24), 3, pp 201-297.

Annexes

Puits	X (géogr.)	Y (géogr.)	X utm	Y utm	Z	côte piézo	T°C	cond	pH
1	N36°44'41,61"	E6°16'17,18"	256 208	4 069 538	48	44,5	20,5	1497	8
2	N36°44'19,72"	E6°16'08,17"	256 146	4 069 379	40	36	19,7	931	7,8
3	N36°44'10,51"	E6°16'04,45"	256 044	4 069 095	35	31	17,6	1425	8
4	N36°44'08,02"	E6°16'03,48"	256 021	4 069 140	36	32	17,3	1190	7,9
5	N36°44'01,21"	E6°15'51,91"	255 923	4 068 813	35	31	17,3	1350	7,8
6	N36°44'05,81"	E6°15'55,08"	255 890	4 068 958	34	30	18,5	1379	7,8
7	N36°44'00,34"	E6°15'58,06"	255 587	4 068 787	35	31,5	17,6	1343	8,2
8	N36°44'22,35"	E6°16'01,55"	255 983	4 069 463	34	29,3	19,5	1518	7,6
9	N36°44'19,90"	E6°16'01,53"	255 981	4 069 388	35	31	20,3	1722	7,5
10	N36°44'44,57"	E6°14'31,57"	253 726	4 070 220	37	28	20,6	1807	8,3
11	N36°44'24,77"	E6°15'42,64"	255 466	4 067 702	37	34	21	1503	7,8
12	N36°44'51,53"	E6°14'36,64"	253 885	4 069 806	36	33,5	20,7	2229	7,5
13	N36°44'02,63"	E6°15'17,18"	254 864	4 068 884	41	35	20,6	1395	7,5
14	N36°46'20,70"	E6°15'22,45"	255 119	4 073 139	40	37,5	19,6	1240	7,4
15	N36°46'05,71"	E6°14'15,52"	253 448	4 072 721	35	27	21,6	1390	7,8
16	N36°40'14,63"	E6°15'19,56"	255 056	4 072 937	27	23	19,8	1525	7,7
17	N36°46'06,19"	E6°15'07,56"	254 736	4 072 707	36	32,4	23	1120	7,9
18	N36°43'44,64"	E6°15'53,06"	255 732	4 068 294	39	24	19,2	1510	7,8
19	N36°46'26,71"	E6°15'35,72"	255 451	4 073 314	29	27,5	19,5	1258	8,1
bac 1	N36°44'50,30"	E6°15'57,02"	255 896	4 070 334	23	-	-		
bac 2	N36°44'50,30"	E6°15'57,02"	254 864	4 070 334	23	-	-		
oued	N36°44'50,68"	E6°15'57,08"	254 864	4 070 334	23	-	-		

Précipitations

	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
2001	247,7	110,9	14,2	50,7	50,3	3,7	0	2,5	38,8	1,1	125,2	142,4
2002	71,8	66,3	37,6	49,7	15,3	4,4	16	86,2	49,5	103	182	407,3
2003	333,1	115	30,7	130	70,9	0,8	7,1	0	128	76	82	220,5
2004	137,2	83,3	75,2	96,6	81,2	56,4	1,3	4,3	75,8	34,8	267,1	158,8
2005	262,1	212,6	85,5	121,8	4,8	0	1,2	18,4	56,4	21,4	134,5	171,6
2006	178,2	165,5	54,9	24,1	32,7	2,8	0	34,8	45,3	37,9	39,6	215,4
2007	12,3	74,5	269	70,6	14,4	26,4	3,3	4,8	70,8	143	291,4	211,3
2008	34,3	27,4	172	18,8	144,7	3,7	0	1,3	86,7	30,8	109,8	145,9
2009	207,9	85,9	78,2	183,8	14,4	0,3	0,5	10,8	172,3	68,1	154,9	139,6
2010	121,4	60,2	105	52,5	81	49,5	2,1	1,4	53	219	195,9	110,3
2011	78,6	143,5	89,8	69,7	33,4	27	8,1	0	14,7	247	134,5	160
2012	64,9	368,5	95,9	189,4	3,1	0,6	0,4	111	106	163	82,6	81,4
2013	210,3	211,6	81,2	41,9	144,6	0,6	1,6	42,9	48,5	54,2	349,9	125,2
2014	133,7	85,1	154	13,1	7,1	13,9	0,2	4,1	24,9	49	182,9	338,1
2015	126,6	131,8	73,8	5,27	26,37	0	5,3	10,6	26,4	73,8	79,1	0
2016	52,73	58,01	94,9	79,1	31,64	0	0	0	15,8	21,1	73,83	21,09
2017	142,4	36,91	111	26,37	10,55	26,4	0	0	21,1	26,4	105,47	89,65
2018	21,09	79,1	127	89,65	79,1	15,8	0	26,4	31,6	132	42,19	15,82
2019	126,6	47,46	68,6	21,09	42,19	5,27	0	26,4	52,7	58	89,65	36,91
2020	10,55	26,8	79,1	52,73	15,82	10,6	0	15,8	42,2	36,9	63,28	126,56
2021	31,64	5,27	31,6	41,7	50,34	14,8	1,2	23,9	25,4	22,8	110,54	48,08
Moy	124,05	104,56	91,84	68,03	45,42	12,52	2,32	20,26	56,47	77,52	137,92	141,23

Températures

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
2001	12,9	11,8	15,97	15,1	18,16	23,5	25,65	26,6	23,08	22,67	15,87	12,1
2002	11,5	12,7	14,07	15,76	18,98	23,6	24,47	24,9	23,1	20,45	16,37	13,87
2003	11,8	10,6	13,06	15,59	18,23	24,7	28	28,9	23,69	20,95	16,61	12,44
2004	12	12,5	13,37	14,53	16,83	21,8	25,47	27,1	24,15	22,41	15,16	12,97
2005	10,1	9,54	12,45	14,74	19,22	23,4	26,06	25,3	23,4	20,98	16,3	12,05
2006	10,6	10,9	13,48	16,52	20,2	23,2	26,87	25,5	23,87	22,15	17,76	13,9
2007	13	13,1	13,12	15,58	19,28	22,7	25,79	26,5	23,16	19,95	15,06	12,62
2008	12,3	12,6	13,23	16,05	18,78	21,8	26,03	26,5	24,09	20,59	15,35	12,05
2009	11,7	10,9	12,65	14,05	19,51	23,5	27,6	27,1	23,35	19,81	16,94	14,52
2010	12,6	12,8	13,51	15,91	17,92	21,5	26,1	26	23,35	20,37	15,8	12,9
2011	11,9	11,5	13,09	16,37	18,76	22,1	25,99	26,7	24,41	20,55	16,62	13,52
2012	11,9	9,34	13,37	15,36	18,59	24,7	26,6	28,6	23,8	21,28	17,27	13,46
2013	12,3	10,7	13,96	15,58	17,44	20,9	25,66	25,7	23,46	22,84	15,77	12,87
2014	12,8	12,9	12,65	16,16	18,42	23,1	25,41	26,5	26,05	22,26	18,44	13,21
2015	11,9	10,7	12,97	15,68	19,66	23,1	27,4	27	24,25	21	16,61	14,35
2016	13,8	13,5	13,23	16,1	18,63	23	25,88	25,6	24	22,47	17,62	14,49
2017	11	12,9	14,23	15,88	20,11	24,4	27,3	28,1	23,65	20,43	15,95	12,37
2018	12,6	10,8	13,56	15,51	17,23	22,1	26,58	26,2	24,98	20,47	16,4	14,05
2019	11,5	11,7	13,6	15,08	17,51	24	27,2	27,7	24,51	21,72	15,9	14,52
2020	12,4	13,8	14,26	16,51	20,19	22,7	26,4	27,5	23,79	19,65	17,83	13,69
2021	12,4	13,9	13,55	15,68	19,34	23,7	27,44	28,4	26,19	20,68	16,07	13,43
Moy.	12,04	11,87	13,49	15,61	18,71	23,02	26,38	26,77	24,02	21,13	16,46	13,30

Humidité

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
2001	73,44	74,94	71,31	73,19	75,56	60,44	63,19	64,1	73,31	71,88	75,19	74,81
2002	72,44	74,31	74,56	72,44	66,19	60,44	67,94	70,3	71,38	69,69	74,56	79,69
2003	79,81	78	77,62	80,81	79,81	68,81	60,5	59,3	74,06	74,38	74,25	76,38
2004	80,81	77,38	76,81	77,75	76,69	73,69	64,31	62,6	65,69	63,69	77,56	77,94
2005	77,88	78,5	81,25	81,25	74,5	69,38	63,5	66,1	70,12	72,75	73,94	75,69
2006	75,19	79	76,5	74,44	74,06	61	60,94	65,6	66,75	67	71,81	74,69
2007	76,62	79,12	77,44	80,56	71,56	69,69	61,12	62,3	70,56	77,31	75,19	77,5
2008	77	75,69	76,88	71,12	74,25	70,5	64,06	64,3	67,81	72,38	72,5	77,88
2009	79,94	74,94	75,75	78,81	73,19	63,75	58,69	66,4	72,62	74,06	70,81	75,38
2010	76,44	75,25	75,94	78,12	71,06	70,25	62,38	62,6	68,31	67,88	76	72,25
2011	78,44	77,81	78,75	77,75	76,69	71,81	62,69	60,8	69,69	72,38	77,69	77,69
2012	78,62	78	78,06	78	74,19	65,19	63,06	58,2	68,25	69,19	74,81	75,88
2013	77,75	76,62	76,5	75,38	74,25	66,94	66,62	66,3	75,06	71,88	75,06	77,62
2014	75,31	75,12	79,44	74,69	69,75	66,12	60,31	63,4	63,62	67,44	66,94	75,75
2015	78,19	77,19	77,69	75,44	69,12	65,56	60,19	65,7	68,38	71,69	76,56	73,62
2016	74,69	74	75,19	77,19	70,88	65,5	61,19	62,4	67,88	69,44	69,5	77,44
2017	75,44	75,88	76,12	71,94	66,31	65,88	57,5	59,7	66,12	69,12	70,56	75,88
2018	77,44	78,25	76,31	79,81	80,12	70,06	62	68,7	71,19	72,31	72,25	76,75
2019	77,19	75,06	74,88	77,25	70,88	63,62	60,62	66,1	73,56	69,62	73,19	75,38
2020	74,56	74,25	74,5	76,31	70,12	66,44	61,31	61	70,19	67,19	72,25	76,75
2021	76,38	73,06	75,31	74,25	71,69	68,94	58,06	59,9	67,38	67,75	75,62	76,62
Moy	76,84	76,30	76,51	76,50	72,90	66,86	61,91	63,60	69,62	70,43	73,63	76,27

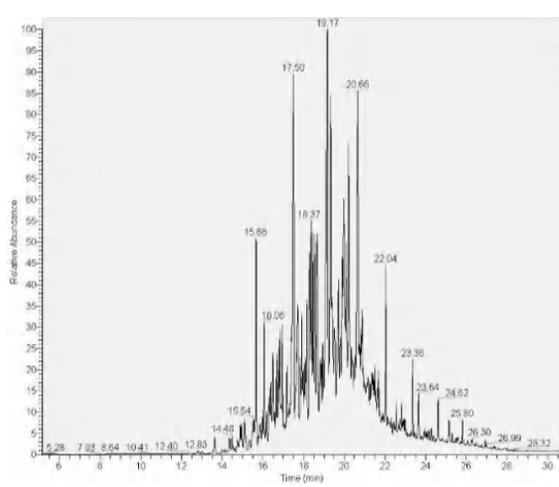
Insolation

	Jan	Fév	Mars	vril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
2001	4,87	6,3	8,16	9,9	11,07	11,52	11,25	10,26	8,7	6,85	5,2	4,42
2002	4,86	6,29	8,15	9,89	11,07	11,53	11,25	10,27	8,72	6,86	5,21	4,42
2003	4,86	6,27	8,13	9,88	11,06	11,52	11,25	10,28	8,73	6,87	5,22	4,42
2004	4,84	6,28	8,18	9,92	11,07	11,52	11,23	10,24	8,69	6,83	5,19	4,41
2005	4,87	6,3	8,16	9,9	11,07	11,52	11,24	10,25	8,7	6,84	5,2	4,41
2006	4,87	6,28	8,14	9,89	11,06	11,52	11,24	10,26	8,71	6,85	5,21	4,42
2007	4,85	6,27	8,13	9,88	11,05	11,52	11,25	10,27	8,72	6,87	5,22	4,42
2008	4,84	6,28	8,17	9,91	11,07	11,52	11,23	10,24	8,68	6,82	5,19	4,41
2009	4,87	6,3	8,16	9,9	11,07	11,52	11,24	10,25	8,7	6,84	5,2	4,41
2010	4,86	6,28	8,15	9,89	11,06	11,52	11,24	10,26	8,71	6,85	5,21	4,42
2011	4,85	6,27	8,13	9,88	11,06	11,52	11,25	10,27	8,73	6,87	5,22	4,42
2012	4,84	6,29	8,18	9,92	11,08	11,52	11,23	10,24	8,68	6,82	5,19	4,42
2013	4,87	6,3	8,17	9,91	11,07	11,53	11,24	10,25	8,7	6,84	5,2	4,42
2014	4,86	6,29	8,15	9,89	11,07	11,52	11,25	10,26	8,71	6,85	5,21	4,42
2015	4,85	6,28	8,14	9,89	11,06	11,52	11,25	10,27	8,72	6,87	5,22	4,42
2016	4,85	6,29	8,18	9,92	11,08	11,52	11,23	10,24	8,68	6,82	5,19	4,41
2017	4,87	6,3	8,16	9,91	11,07	11,52	11,24	10,25	8,69	6,83	5,2	4,41
2018	4,86	6,29	8,15	9,9	11,06	11,52	11,24	10,26	8,71	6,85	5,21	4,42
2019	4,85	6,27	8,13	9,88	11,06	11,52	11,25	10,27	8,72	6,86	5,22	4,42
2020	4,84	6,29	8,18	9,92	11,08	11,52	11,23	10,24	8,68	6,82	5,19	4,41
2021	4,87	6,31	8,17	9,91	11,07	11,52	11,24	10,25	8,69	6,83	5,2	4,42
Moy	4,86	6,29	8,16	9,90	11,07	11,52	11,24	10,26	8,70	6,84	5,20	4,42

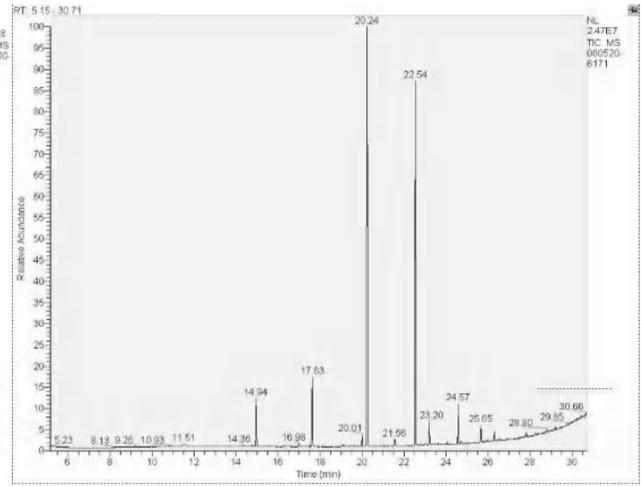
Vents

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
2001	15,76	16,27	15,15	13,45	12,16	9,97	16,27	8,91	8,41	10,62	17,13	15,7
2002	13,37	15,71	12,03	21,77	11,53	11,22	10,91	10,85	12,43	18,48	21,84	16,8
2003	18,88	21,4	12,22	14,08	9,81	9,5	10,26	9,53	12,2	14,83	14,27	18,2
2004	14,67	16,5	13,78	16,88	15,95	11,55	7,25	8,67	9,41	13,36	18,22	19,54
2005	19,62	19,09	13,29	18,94	11,48	8,05	10,53	11,25	10,39	8,6	13,55	14,98
2006	12,71	11,99	18,94	13,74	10,08	10,32	9,4	8,89	12,41	10,99	14,14	16,34
2007	14,42	19,2	16,06	12,91	12,4	12,3	9,27	10,62	10,61	13,55	12,86	12,84
2008	14,53	11,59	19,98	18,91	11,73	8,5	9,9	9,38	11,05	12,56	17,88	13,98
2009	21,7	15,02	18,75	14,21	14,25	9,66	10,55	9,48	9,05	17,61	14,5	16,81
2010	18,83	17,68	13	13,17	15,9	11,55	8,2	7,2	17,05	13,71	17,77	17,3
2011	13,59	15,64	12,98	13,19	13,08	9,78	9,84	8,95	12,12	13,29	13,84	15,66
2012	14,25	14,96	10,56	14,44	14,92	11,2	12,09	8,85	12,55	14,14	17,77	14,91
2013	19,7	16,21	18,88	15,4	15,59	9,39	8,9	11,16	10,89	9,21	18,34	17,38
2014	18,8	14,4	18,62	19,09	11,91	11,1	9	9,98	9,09	12,25	14,45	17,23
2015	17,29	17,88	17,16	13,34	13,69	10,35	9,72	8,95	10,25	16,51	17,58	7,24
2016	15,62	16,13	16,48	11,83	12,72	11,07	8,57	8,98	9,41	11,3	15,25	16,03
2017	13,75	19,16	12,46	10,96	11,27	11,43	8,52	9,41	14,48	10,83	14,51	15,28
2018	15,37	13,31	16,24	10,98	15,48	9,23	9,77	6,59	10,44	20,3	19,96	14,57
2019	18,7	15,63	13,38	13,28	12,6	13,1	8,98	8,34	11,02	12,22	15,99	17,63
2020	13,89	10,42	19,9	16,12	14,66	10,49	9,1	10,42	14,04	14,52	12,75	16,38
2021	17,3	14,69	12,78	11,15	12,46	7,85	9,38	11,26	9,7	11,39	19,76	18,11
Moy	16,32	15,85	15,36	14,66	13,03	10,36	9,83	9,41	11,29	13,35	16,30	15,85

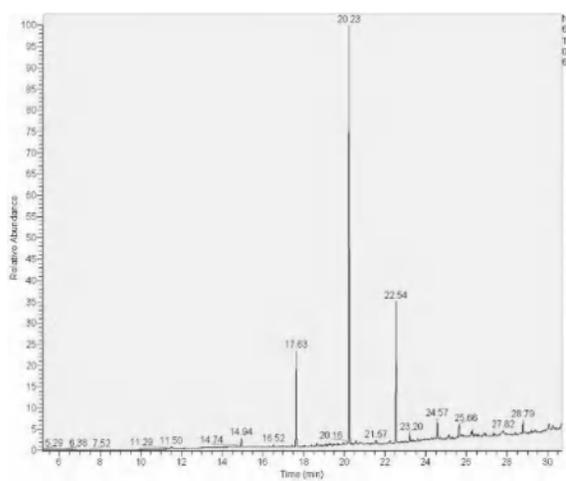
Les chromatogrammes du Courant d'Ions Total obtenus en phase gazeuse (SPME-GC-MS) pour les 3 échantillons (1 à 3) avec le blanc (échantillon 4)



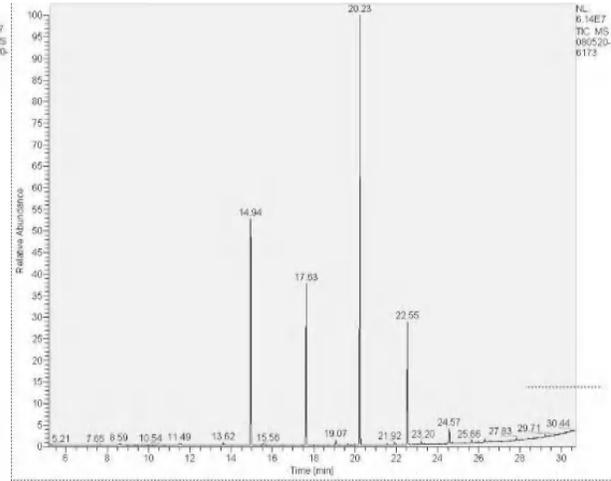
Echantillon 1



Echantillon 2



Echantillon 3



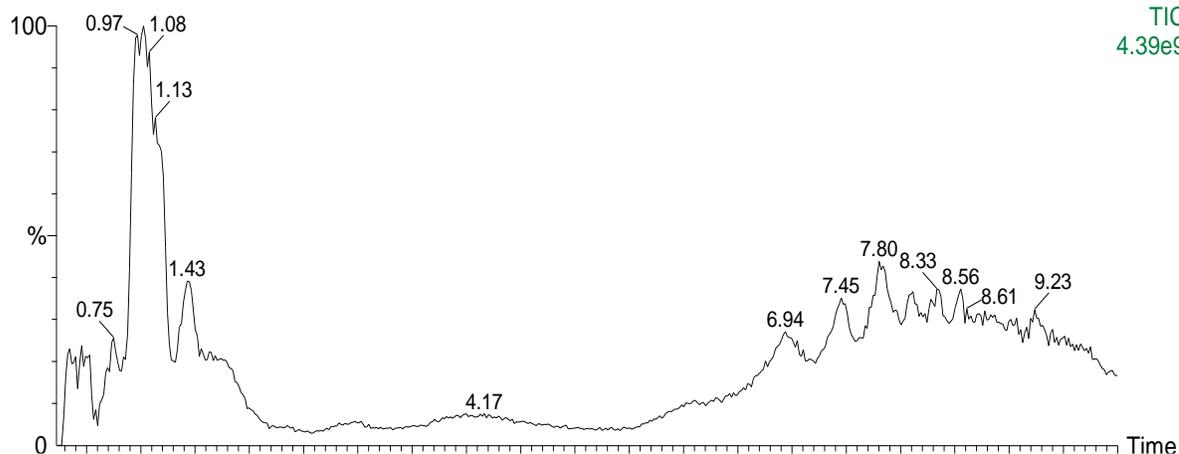
Echantillon 4

Les chromatogrammes du Courant d'Ions Total obtenus en phase gazeuse (SPME-GC-MS) pour les 3 échantillons (1 à 3) avec le blanc (échantillon 4)

Chromatogramme de l'échantillon n° 1

CEB080428-6170-ACN-CONC MOINS 6173

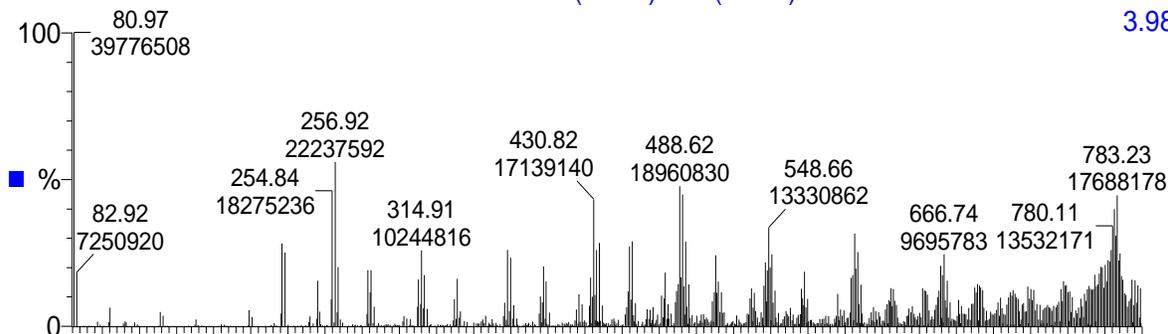
Scan ES+
TIC
4.39e9



Pic au temps de rétention : 1.025 (dessous) et 1.429 (au-dessus) de l'échantillon 1

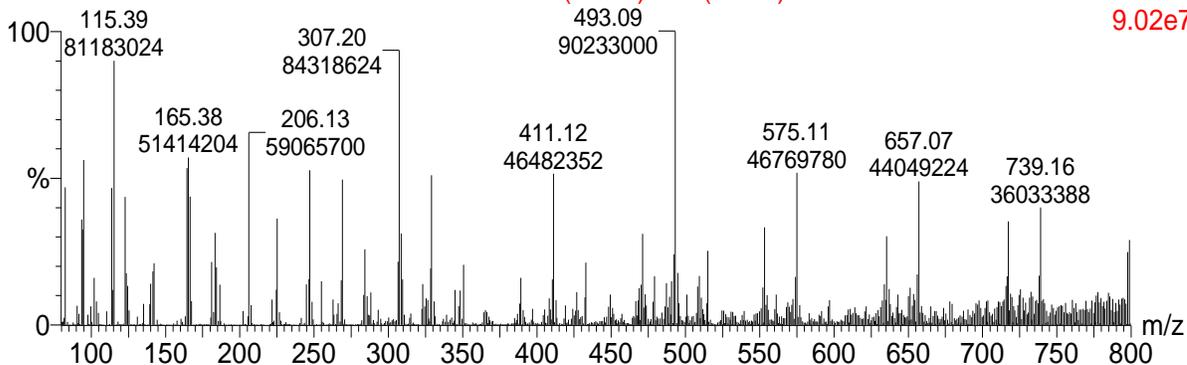
CEB080428-6170-ACN-CONC MOINS 6173 66 (1.429) Cm (62:69)

Scan ES+
3.98e7



CEB080428-6170-ACN-CONC MOINS 6173 44 (1.025) Cm (38:54)

Scan ES+
9.02e7



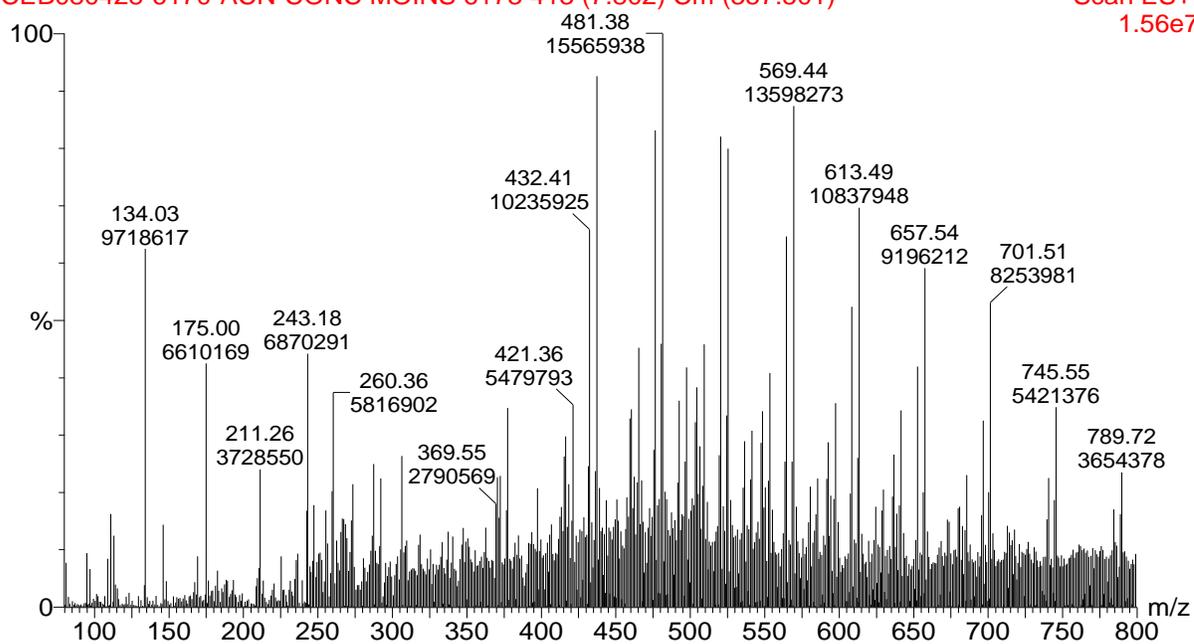
Combinaison des pics allant de 6.94 à 9.23 de l'échantillon 1

5g+ACN conc

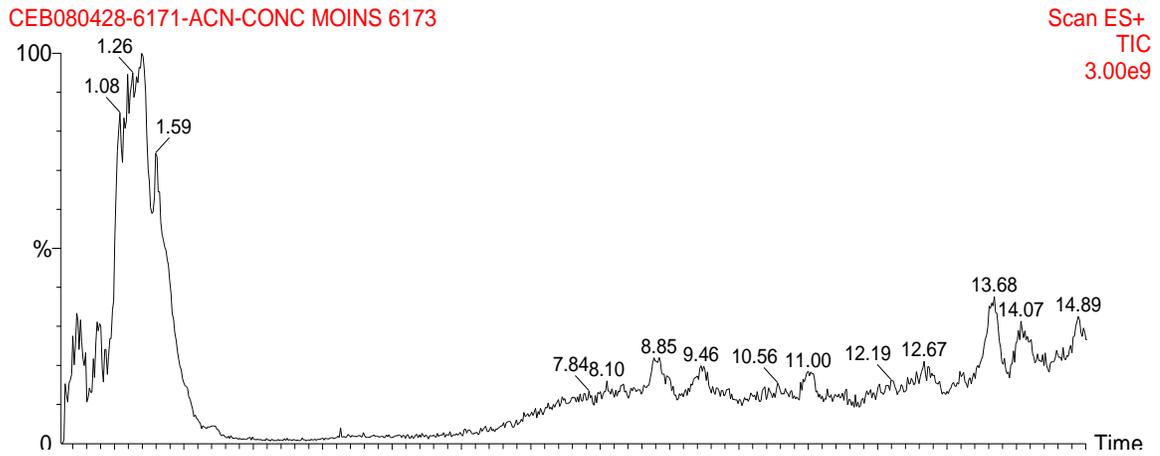
29-Apr-200816:50:11

CEB080428-6170-ACN-CONC MOINS 6173 413 (7.802) Cm (357:501)

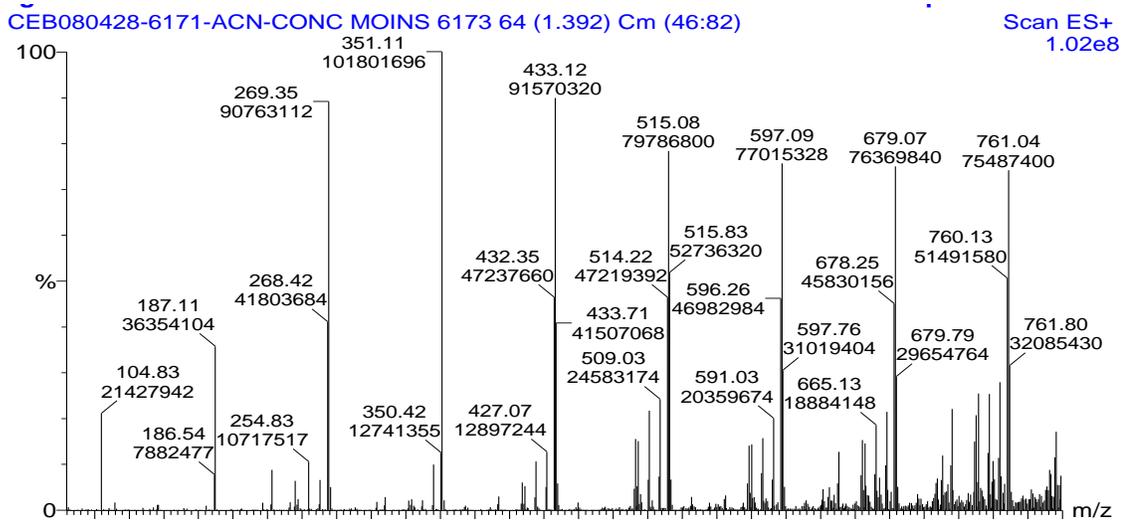
Scan ES+
1.56e7



Chromatogramme de l'échantillon n° 2



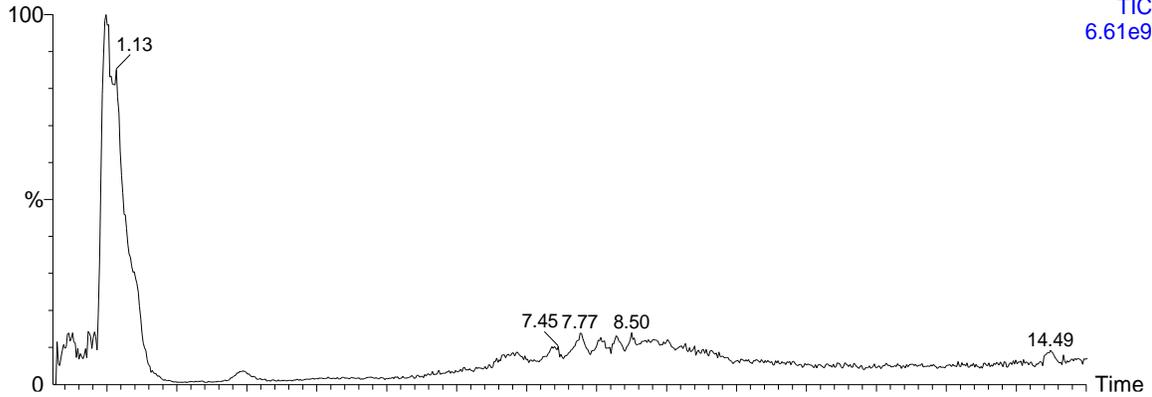
Spectre du pic à 1.26 minutes de l'échantillon 2



Chromatogramme de l'échantillon n° 3

CEB080428-6172-ACN-CONC MOINS 6173

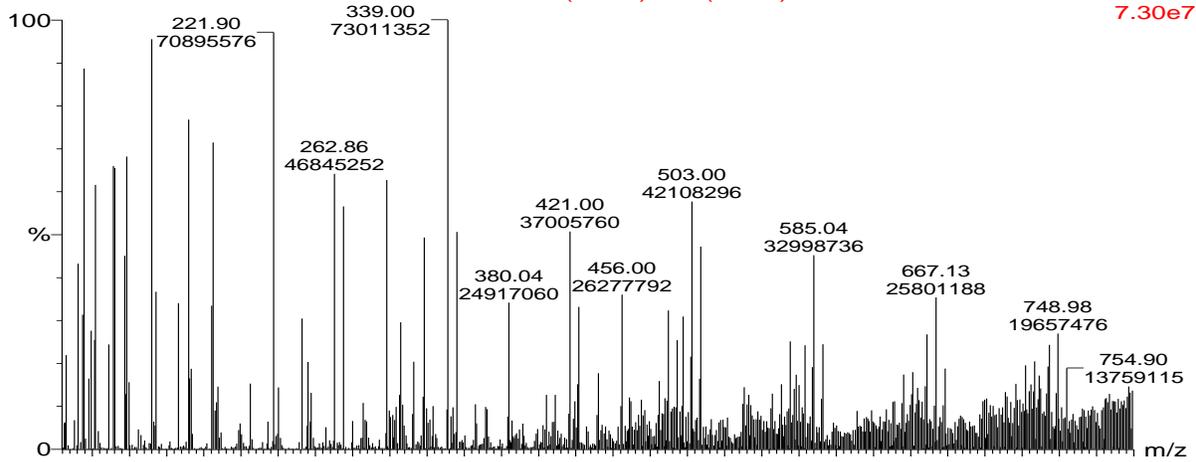
Scan ES+
TIC
6.61e9



Spectre au temps de rétention 1.13 minutes de l'échantillon 3

CEB080428-6172-ACN-CONC MOINS 6173 42 (0.988) Cm (35:63)

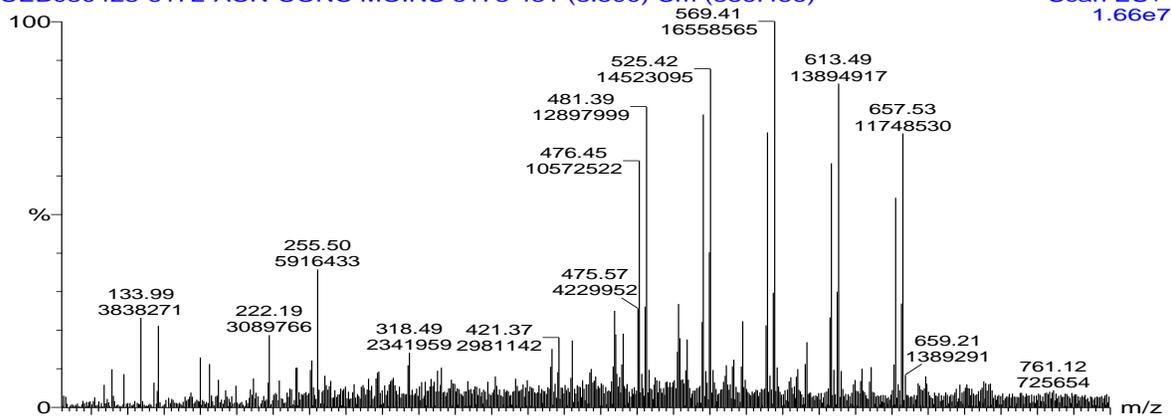
Scan ES+
7.30e7



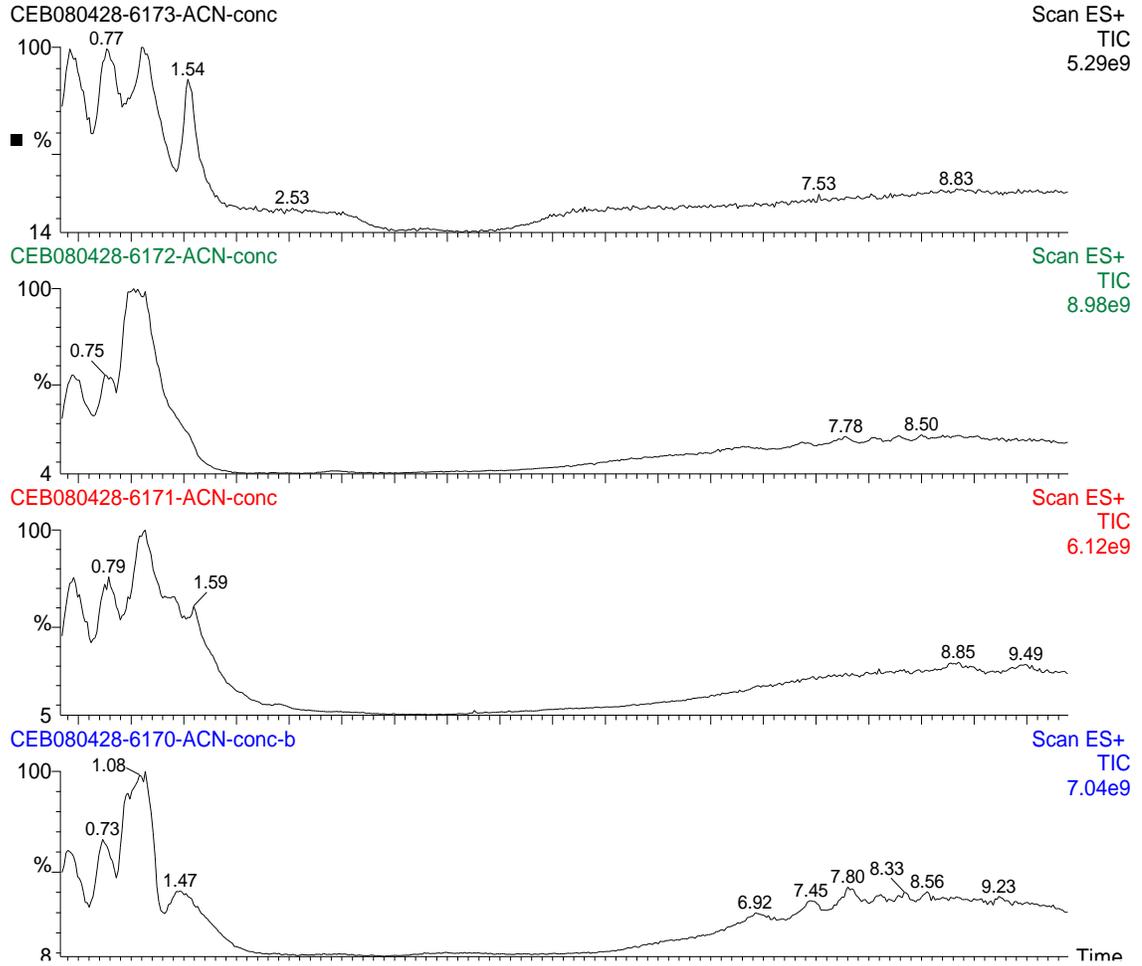
Spectre combiné du groupe de pic au temps de rétention de 7.45 à 8.5 de l'échantillon 3

CEB080428-6172-ACN-CONC MOINS 6173 451 (8.500) Cm (386:456)

Scan ES+
1.66e7



Les 4 chromatogrammes (avant traitement au logiciel)



Concentrations anionique et cationique des eaux échantillonnées
au début de la période de hautes eaux (en milli-grammes par litre)

échant	HCO3 mg/l	SO4 mg/l	Cl mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l
P 1	433,1	310	181	83,233	29,237	167,861	7,394
P 2	378,2	95	134,9	46,935	21,517	128,32	6,836
P 3	664,9	150	195,25	65,389	30,442	114,583	3,424
P 4	536,8	120	159,75	64,122	24,533	47,862	3,036
P 5	616,1	230	198,8	58,418	31,704	254,188	4,741
P 6	671	210	191,7	59,465	36,647	264,385	4,415
P 7	591,7	205	159,75	60,653	33,859	204,029	4,755
P 8	671	305	142	71,876	35,86	151,355	7,126
P 9	542,9	300	170,4	74,113	39,844	114,471	10,897
P 10	573,4	130	220	22,444	14,521	306,091	5,438
P 11	244	305	213	80,881	33,854	74,418	7,27
P 12	237,9	97	337,25	128,427	56,58	23,479	1,711
P 13	325,7	260	145,55	66,53	24,531	102,35	4,16
P 14	278,1	200	170,4	85,878	22,269	99,36	11,575
P 15	353,8	220	184,6	75,669	30,024	111,78	4,268
P 16	386,7	76	149,1	64,12	29,156	76,36	13,5
P 17	317,2	80	120,7	50,5	17,133	101,66	2,875
P 18	219,6	265	177,5	48,89	26,141	194,58	7,599

Concentrations anionique et cationique des eaux échantillonnées
au début de la période de hautes eaux (en milli-équivalent par litre)

échant	HCO3 méq/l	SO4 méq/l	Cl méq/l	Ca méq/l	Mg méq/l	Na méq/l	K méq/l	Ca +Mg méq/l	HCO3 + SO4 méq/l
P 1	7,10	6,46	5,10	4,16	2,44	7,30	0,19	6,60	13,56
P 2	6,20	1,98	3,80	2,35	1,79	5,58	0,18	4,14	8,18
P 3	10,90	3,13	5,50	3,27	2,54	4,98	0,09	5,81	14,03
P 4	8,80	2,50	4,50	3,21	2,04	2,08	0,08	5,25	11,30
P 5	10,10	4,79	5,60	2,92	2,64	11,05	0,12	5,56	14,89
P 6	11,00	4,38	5,40	2,97	3,05	11,50	0,11	6,03	15,38
P 7	9,70	4,27	4,50	3,03	2,82	8,87	0,12	5,85	13,97
P 8	11,00	6,35	4,00	3,59	2,99	6,58	0,18	6,58	17,35
P 9	8,90	6,25	4,80	3,71	3,32	4,98	0,28	7,03	15,15
P 10	9,40	2,71	6,20	1,12	1,21	13,31	0,14	2,33	12,11
P 11	4,00	6,35	6,00	4,04	2,82	3,24	0,19	6,87	10,35
P 12	3,90	2,02	9,50	6,42	4,72	1,02	0,04	11,14	5,92
P 13	5,34	5,42	4,10	3,33	2,04	4,45	0,11	5,37	10,76
P 14	4,56	4,17	4,80	4,29	1,86	4,32	0,30	6,15	8,73
P 15	5,80	4,58	5,20	3,78	2,50	4,86	0,11	6,29	10,38
P 16	6,34	1,58	4,20	3,21	2,43	3,32	0,35	5,64	7,92
P 17	5,20	1,67	3,40	2,53	1,43	4,42	0,07	3,95	6,87
P 18	3,60	5,52	5,00	2,44	2,18	8,46	0,19	4,62	9,12

