



Université d'Oran 2
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
THESE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences
En Sciences de la Terre

Hydrochimie et cartographie de la pollution des eaux souterraines
du synclinal d'Aflou, Atlas Saharien central, Algérie

Présentée et soutenue publiquement par :
Mr Mohamed SEKKOUM

Devant le jury composé de :

NADJI Abdelmansour	Pr	Université d'Oran 2	Président
SAFA Aissa	Pr	Université d'Oran 2	Promoteur
STAMBOUL Madani	Pr	Université de Laghouat	Co-promoteur
MANSOUR Hamidi	Pr	Université d'Oran2	Examineur
AZZAZ Habib	Pr	Université de Mascara	Examineur
BENYAHIA Mohamed	Pr	Université de Sidi Bel Abbes	Examineur

Année 2023

« Hydrochimie et cartographie de la pollution des eaux souterraines du synclinal d'Aflou, Atlas Saharien central, Algérie »

Résumé :

Le présent travail met en lumière les méthodes géochimiques qui permettent de caractériser les interactions des eaux avec l'encaissant et éventuellement de les différencier. Le souci est d'évaluer la vulnérabilité des ressources en eaux souterraines à la contamination de la cuvette d'Aflou, une zone de l'Atlas saharien Algérien. L'étude hydrochimique révèle l'impact de la lithologie sur le chimisme des eaux souterraines de la cuvette d'Aflou. Les eaux souterraines de la région d'Aflou dépendent des aquifères liés au Mio-Plio-Quaternaire et l'aquifère gréseux du Continental Intercalaire (Barrémien et Albien). On peut voir clairement l'influence des minéraux évaporitiques surtout celles des intrusions triasiques où parfois diffus dans les marnes verdâtres qui existent à plusieurs niveaux soit dans les formations du Barrémien- Aptien- Albien du Mio-Pliocène. L'utilisation du diagramme de Piper, les valeurs d'indice de saturation (estimées par la méthode Phreeq-C) ainsi que les outils du SIG ont été utiles non seulement pour créer la base de données pour l'analyse de la variation spatiale des paramètres de qualité de l'eau respectives, mais aussi pour comprendre le processus hydrogéochimique se produisant au niveau des aquifères de notre zone d'étude. La méthode d'interpolation IDW (Inverse Distance Weighted) a été utilisée pour interpoler et estimer les valeurs des cellules dans le synclinal Aflou en faisant la moyenne des valeurs des points de données d'échantillonnages au voisinage de chaque cellule de traitement. L'examen des cartes d'iso-contenus et les résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) montrent que la composition de l'eau est très étroitement liée à la nature lithologique des différentes formations.

Ce travail vise à estimer la vulnérabilité à la pollution des aquifères du synclinal d'Aflou, et à développer un document cartographique. Une simple lecture de ces cartes permet de localiser les zones qui sont très vulnérables et les zones où des protections durables sont nécessaires. Cette cartographie est réussie en utilisant le modèle DRASTIC dans un environnement de système d'information géographique (SIG) pour distinguer les zones vulnérables des eaux souterraines.

Mots clés : *Hydrochimie; Conductivité; Évaporites; Atlas saharien; DRASTIC; Eau souterraines; pollution; cartographie; Aflou.*

« Hydrochemistry and mapping of groundwater pollution of Aflou syncline, Central Saharan Atlas, Algeria »

Abstract:

The current works sheds light on geochemical methods used to characterize water-rocks interaction. The concern is to assess the vulnerability of groundwater resources to contamination in Aflou, an area in central Saharan Atlas of Algeria. This study of hydrochemistry reveals lithological impact on hydrochemistry in Aflou syncline. Our study region is like a basin meaning that the important groundwater resources are located in the sandstones of the Intercalary Continental Aquifer (Barremian and Albian). This study marks a noticeable influence of evaporated minerals and ascents of Triassic materials, which are widely propagated along different levels for several wells of Djebel Amour. Lithology influence on the hydrochemistry of this aquifer is very visible by evaporation contained essentially in the Triassic and in the marly intercalations of the Portlandian, the Barremian-Aptian-Albian and those of the Mio-Pliocene. For Aflou region, the lower Cretaceous (Portlandian) and Upper Jurassic (limestone) formations, the calcium sulphated facies, have very high levels of: SO_4^{4-} , Cl^- , Ca^{2+} and Na^+ . Integration of both graphical and Piper diagram, saturation index values (estimated by Phreeq-C method) and GIS tool was helpful not only to create the database for analysis of spatial variation in respective water quality parameters, but also to decipher the hydrogeochemical process occurring in our study area. This study utilized the Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation method to interpolate and estimate cell values in Aflou syncline by averaging the values of sample data points in the neighborhood of each processing cell. IDW method has been used in establishing maps. The examination of iso-contents maps and the principal component analysis (PCA) results show that the water composition was very closely related to the lithological nature of the different formations. Another aims of this work is to estimate the vulnerability to pollution of the aquifers of the Aflou syncline, and to develop a cartographic document ; the simple reading makes it possible to locate the zones where the aquifers are very vulnerable and the zones where lasting protections are necessary. This mapping succeeds by using the DRASTIC model in a geographic information system (GIS) environment to distinguish vulnerable areas from groundwater.

Key words: *Hydrochemistry; Conductivity; Evaporate; Saharan Atlas; DRASTIC; groundwater; pollution; cartography; Aflou;*

«الكيمياء المائية ورسم خرائط تلوث المياه الجوفية في حوض أفلو، الأطلس الصحراوي المركزي الجزائري»

الملخص:

يسلط هذا العمل الضوء على الطرق الجيوكيميائية المستخدمة لوصف التفاعل بين المياه الجوفية والصخور. ويتمثل العمل في تقييم مدى تعرض موارد المياه الجوفية للتلوث في منطقة أفلو، هذه المنطقة التي تقع في سلسلة جبال العمور للأطلس الصحراوي الجزائري. تكشف هذه الدراسة الهيدروكيميائية عن تأثير الليثولوجي على الكيمياء المائية للمياه الجوفية في منطقة أفلو. تتميز منطقة أفلو. تتميز منطقة أفلو بدراسة بشكلها الحوضي مما يعني أن موارد المياه الجوفية المهمة تقع في الحجر الرملي لخزان الحوض القاري.

توصلت هذه الدراسة لتحديد التأثير الملحوظ للمعادن المتصاعدة وصعود المواد الترياسية، والتي انتشرت على نطاق واسع على مستويات مختلفة لعدة آبار في جبال العمور. ينضح تأثير طبيعة الصخور على الخصائص الكيميائية لمياه هذا الخزان الجوفي من خلال التبخر الموجود بشكل أساسي في صخور الترياسي. بالنسبة لمنطقة أفلو، فإن تكوينات العصر الطباشيري السفلي (البورتلاندي) والجوراسي العلوي (الحجر الجيري)، ووجهات كبريتات الكالسيوم، تحتوي على مستويات عالية جداً من العناصر الكيميائية التالية: Na^+ و Ca^{2+} ، Cl^- ، SO_4^{4-} .

إن الاستعانة بالرسم البياني لنوعية المياه وقيم مؤشر التشبع (المقدرة بطريقة Phreeq-C) وأدوات نظم المعلومات الجغرافية لها فائدة كبيرة ليس فقط لإنشاء قاعدة بيانات لتحليل الاختلاف المكاني لمعاملات جودة المياه المعنية، ولكن أيضاً لفك رموز العملية الهيدروجيوكيميائية التي تحدث في منطقة دراستنا. استخدمت هذه الدراسة طريقة الاستيفاء IDW (المسافة العكسية المرجحة) ونتائج تحليل المكون الرئيسي (PCA) والتي أكدت على أن التركيبة الكيميائية لمياه منطقة الدراسة مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بالطبيعة الصخرية للتكوينات الجيولوجية المختلفة.

ومن بين الأهداف الأخرى لهذا العمل هو تقدير مدى التعرض للتلوث في طبقات المياه الجوفية لمنطقة أفلو، ووضع خرائط تجعل القراءة البسيطة لها تمكن من تحديد المناطق التي تكون فيها طبقات المياه الجوفية أكثر عرضة لمخاطر التلوث والمناطق التي يجب أن تكون فيها الحماية الدائمة ضرورية. هذه الخرائط استخدم فيها نموذج DRASTIC في بيئة نظام المعلومات الجغرافية (GIS) لتمييز المياه الجوفية للمناطق الأكثر عرضة لخطر التلوث.

كلمات مفتاحية : كيمياء المياه الجوفية؛ الناقلية؛ الأطلس الصحراوي؛ المياه الجوفية؛ التلوث؛ أفلو؛

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à adresser mes sincères remerciements à Monsieur SAFA Aissa, Professeur à l'Université Oran 2, qui a bien voulu diriger ce travail tout au long de sa réalisation, grâce à ces critiques et ses encouragements cette étude a pu voir le jour.

Je tiens à remercier Monsieur STAMBOUL Madani, Professeur à l'Université de Laghouat, d'avoir Co-encadré ce travail de thèse. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués.

Je tiens à remercier Monsieur NADJI Abdelmansour, Professeur à l'Université Oran 2, d'avoir accepté de présider mon jury, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde et respectueuse reconnaissance.

Ma gratitude et mes vifs remerciements vont à Monsieur MANSOUR Hamidi, professeur à l'Université Oran 2, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger ce travail.

Je remercie très vivement Monsieur AZZAZ Habib, Professeur à l'Université de Mascara, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur BENYAHIA Mohamed, Professeur à l'université de Sidi Bel Abbes, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury.

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Résumés	i
Remerciements	ii
Table des matières	vi
Liste des figures	xiii
Liste des tableaux	xvi
Introduction générale	1

CHAPITRE I : Considération générales

I.1. Situation géographique de la région d'étude	4
I.2. Cadre géographique générale	5
I.3. L'Atlas Saharien dans le cadre de l'orogénèse alpine	5
I.4. Géologie de l'Atlas Saharien	5
I.5. Géologie du secteur d'étude	9
I.5.1. Le Trias	9
I.5.2. Le Jurassique Supérieur	9
I.5.3. Le Crétacé	9
I.6. Conséquences hydrogéologiques de la lithologie	12
I.6.1. Des formations imperméables	12
I. 6.2. Les formations perméables	12

CHAPITRE II : Climatologie

II.1. Introduction	14
II.2. Les paramètres Climatiques	14
II.2.1. Les précipitations	14
II.2.1.1. Pluviométrie mensuelle station d'Aflou (1990-2017)	14
II.2.1.2. Pluviométrie annuelle (1990-2017)	15

II.2.1.3. Le coefficient pluviométrique	16
II.2.1.4. Etude statistique des précipitations annuelles (1990-2017)	18
A. ajustement des précipitations à une loi statistique	18
B. Test du χ^2	18
C. Etude de la pluviométrie saisonnière	19
II.2.2. Températures	20
II.2.2.1. Variations des températures moyennes mensuelles	20
II.3. Caractérisation du climat	21
II.3. 1. Méthodes graphiques	21
II.3. 2. Les indices climatiques	22
II.3. 2.1. Indice annuel de De Martonne.	22
II.3. 2.2. Indice pluviométrique de Moral	23
II.4. Conclusion sur les indices climatiques	23
II.5. Evaporation et évapotranspiration	23
II.6. L'évapotranspiration	24
II.6.1. Evapotranspiration potentielle ETP	24
II.6.1.1. Formule de Thornthwaite	24
II.6.2. Evapotranspiration réelle ETR	25
II.6.2.1. Formule de Turc	25
II.6.2.2. Méthode de Wundt	25
II.6.2.3. Méthode de Verdeil	26
II.6.2.4. Calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite	27
II.7. Bilan hydrologique	29
II.7.1. Ruissellement superficiel	30
II.7.2. Infiltration	30

CHAPITRE III : Hydrologie

III.1. Introduction	31
III.2. L'oued Sebgag	31
III.2.1. Distribution des débits moyens mensuels pour la période (1966-1967)	34
1. Débits minima mensuels	34
2. Débits maxima mensuels	34
3. Débits moyens mensuels	34
III.3. L'oued Seklafa	35
III.4. Etude du régime des débits de l'oued Seklafa	36
a) Les débits minima	37
b) Les débits moyens	37
c) Les débits maxima	38

CHAPITRE IV : Hydrogéologie

IV.1. Introduction	39
IV.2. Aquifère superficiel (Mio-Plio-Quaternaire)	40
IV.2. 1. Caractéristiques Hydrologiques	40
IV.3. L'Aquifère du Turonien	41
IV.3. L'Aquifère du Barrémien, Aptien, Albien	43
IV.3. 1. La cuvette d'Aflou	43
IV.3. 1. Les sources	43
a) Les sources de Sebgag	43
b) les sources d'Oued Morra	44
c) Les sources d'Aflou	45
IV.3. 2. Les forages	45
a) Le forage d'Aflou	45
IV.3. 3. Caractéristiques hydrodynamiques	47

• Pompage d'essai forage AF III	47
IV.4. Piézométrie	48
• L'unité de Tamaleket (A)	48
• L'unité de Sebgag (B)	49
• L'unité d'El Haoudh (C)	49
• L'unité d'Aflou (D)	49
• L'unité d'Ain Mansour (E)	49
• L'unité de Kef Guourou (F)	50
• L'unité Oued Morra (G)	50

CHAPITRE V : Hydrochimie

V.1. Introduction	51
V.2. Echantionllage et analyse hydrochimique	52
V.2.1 Méthodes d'analyses	52
V.2.1.1 Mesures in situ	52
V.2.1.2 Analyses aux laboratoires	52
V.3. Eude des paramètres physico-chimiques	53
V.4 .Cartographie hydrochimique	53
V.4.1. Conductivité	54
V.4.2. Les cartes d'isoteneurs (Ca^{++} , Na^+ , SO_4^- , et HCO_3^-)	55
V.5. Classification des eaux	57
V.5.1. Familles d'eau et formules caractéristiques	57
V.5.1.1. Faciès chimiques d'après " Schoeller – Berkaloff "	57
V.5.2.Répartition des types d'eau et importance hydrogéologique	58
V.6. Classification dureté des eaux du synclinal d'Aflou	69
V.6.1. Qualité des eaux pour l'irrigation	69
V.6.2. Taux d'absorption du sodium	70
V.6.3.Classification de Wilcox	71
V.5.Evolution des indices de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux prépondérants	73

(évaporites et carbonates)	
V.6. Mise en évidence des échanges de base	75
V.7. Analyse en composantes principales ACP	77
V.7. 1. Principe	77
V.7.1.1. Interprétation	77
V.7.2. Analyses multidimensionnelles	77

CHAPITRE VI : Cartographie de la vulnérabilité a la pollution des eaux du Synclinal d'Aflou

VI.1. Introduction	80
VI.2. Pollution des eaux souterraines	81
VI.2.1. Principales sources et foyers de pollution	81
VI.2.2. pollution d'origine domestique et urbaine	81
VI.2.3. Pollution d'origine agricole	81
VI.2.4. Pollution d'origine industrielle	82
VI.3. Mécanismes et facteurs de pollution de l'eau souterraine	82
VI.3.1. Introduction du polluant dans le sol	82
VI.3.2. Migration et évolution du polluant en zone non saturée	83
VI.3.3. Mécanismes physiques de l'autoépuration	83
VI.3.4. Mécanismes hydrodynamiques de l'autoépuration	84
VI.3.5. Mécanismes hydro chimiques de l'autoépuration	84
VI.4. Mécanismes hydro biologiques de l'autoépuration	85
VI.4.1. Mécanismes de l'adsorption et de la désorption	85
VI.4.2. Propagation et évolution du polluant dans l'aquifère (mécanisme de la dilution)	85
VI.4.3. Persistance de la pollution	86
VI.4.4. Cas de pollution par un produit plus léger que l'eau et qui atteint la nappe (hydrocarbures)	86
VI.4.5. Cas des polluants plus lourds que l'eau	86
VI.5. Concept de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution	88
VI.5.1. Historique du concept et définition	88
VI.6. Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines	89

VI.6.1. Objectifs des cartes de vulnérabilité et échelles de représentation	90
VI.7. Critères de vulnérabilité intrinsèque	91
VI.7.1. Critères relatifs aux conditions de surface ou sub surface	91
VI.7.2. Critères relatifs à la zone non saturée	91
VI.7.3. Critères relatifs à la zone saturée	91
VI.7.4. Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone Saturée	92
VI.8. Description des différents méthodes d'évaluation de la vulnérabilité	93
VI.8.1 Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères	94
VI.8.1.1. La méthode DRASTIC	94
VI.8.1.1.2. La méthode SINTACS	95
VI.8.1.1.3. La méthode AVI	95
VI.8.1.1.4. La méthode SI (Susceptibility Index)	96
VI.8.1.1.5. La méthode GOD	96
VI.8.1.1.6. La méthode EPIK	96
VI.9. Aspects théoriques et pratiques de la méthode DRASTIC	97
VI.9.1. Introduction	97
VI.9.2. Les paramètres de la méthode " DRASTIC"	97
VI.9.3. Système de notation	98
VI.9.4. Interprétation de l'indice DRASTIC	99
VI.10. Concept d'unité hydrogéologique	99
VI.11. Description des paramètres DRASTIC	99
VI.11.1. Profondeur de l'eau	99
VI.11.2. Recharge nette	100
VI.11.3. Nature du matériel aquifère	100
VI.11.4. Type de sol	101
VI.11.5. Topographie	102
VI.11.6. Impact de la zone vadose	102
VI.11.7. Conductivité hydraulique	102
VI.12. Construction de la carte de vulnérabilité	103
VI.13. Établissement de la carte de vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou	106
VI.13.1. Profondeur de la nappe	106

VI.13.2. La recharge efficace	107
VI.13.3. Nature de la zone saturée	108
VI.13.4. La nature du sol	109
VI.13.5. La topographie (pente)	110
VI.13.6. Nature de la zone non saturée (vadose)	110
VI.13.7. La perméabilité	113
VI.14. Carte de carte de vulnérabilité	114
VI.14.1. Interprétation de la carte de vulnérabilité	114
Conclusion générale	116
Bibliographie	121

Table des figures

Fig.I.1 : Situation géographique de la région d'étude	4
Fig.I.2 : Succession lithologique de l'Atlas saharien d'après I.A.P (1973)	8
Fig.I. 3 : Carte géologique de la zone d'étude (synclinale d'Aflou), Extrait de la carte géologique générale.1/200000 (ANRH, 2008)	11
Fig.II. 1 : Variation des précipitations mensuelles à la station d'Aflou (1990-2017)	15
Fig.II. 2 : Variation des précipitations annuelles à la station d'Aflou (1990 – 2017)	16
Fig.II. 3 : Ajustement à une loi normale station d'Aflou (1990-2017)	18
Fig.II. 4 : Variations saisonnière des précipitations (1990-2017)	19
Fig.II. 5: Variation mensuelle de température à la station d'Aflou (1990-2017)	20
Fig.II. 6 : Diagramme Pluvio-thermique de la station d'Aflou	21
Fig.II. 7 : Abaque de l'indice d'aridité annuel de Martonne	22
Fig.II. 8: Evaporation moyenne mensuelle à Aflou (1990-2017)	23
Fig.II. 9 : Localisation de la station d'Aflou sur l'abaque de Wundt	26
Fig.II. 10 : Projection des précipitations moyennes annuelles (Abaque de VERDEIL)	27
Fig.III.1 : Situation des principaux Djebels et Oued dans la région d'Aflou (Monts du Djebel Amour) Photo : Google Earth	32
Fig.III.2 : Schéma géographique des Monts de Djebel Amour	363
Fig.III.3 : Carte des sous bassins versants du bassin Cheliff	33
Fig.III.4 : Les débits caractéristiques de l'oued Sebgag (1966-1967)	35
Fig.III.5 : Chevelu hydrographique du bassin versant de l'Oued M' Zi	36
Fig.III.6 : les débits caractéristiques de l'oued Seklafa (1971-1987)	38
Fig.IV.1: Carte géologique simplifiée de la région d'Aflou et localisation des points de prélèvement	41
Fig.IV.2: Coupe géologique de la région d'Aflou	42
Fig.IV.3 : Carte hydrogéologique de la zone d'étude (synclinale d'Aflou), Extrait de la carte hydrogéologique générale 1/200000,(ANRH,2008)	42
Fig.IV.4: Les sources de Sebgag (D'après Stamboul M)	44

Fig.IV.5 : Les sources de l'Oued Morra (D'après Stamboul M)	44
Fig.IV.6 : Carte piézométrique de la région d'Aflou	48
Fig.V.1 : Carte d'inventaire des points d'eau échantillonnés (synclinal d'Aflou)	52
Fig.V.2 : Carte de la conductivité électrique du synclinal d'Aflou	54
Fig.V.3 : Carte d'isoteneurs en Ca^{+2} du synclinal d'Aflou	55
Fig.V.4 : Carte d'isoteneurs en Na^{+} du synclinal d'Aflou	56
Fig.V.5: Carte d'isoteneurs en SO_4^{-2} du synclinal d'Aflou	56
Fig.V.6 : Carte d'isoteneurs en HCO^{-3} du synclinal d'Aflou	57
Fig.V.7 : Représentation graphique des analyses d'eau du synclinal d'Aflou à l'aide du diagramme de Piper	59
Fig.V.8 : Représentation graphique des analyses d'eau du synclinal d'Aflou à l'aide du diagramme de Schoeller -Berkaloff	60
Fig.V.9 : Diagramme binaires par les rapports caractéristiques (Mg/Ca versus Cl/SO ₄)	61
Fig.V.10 : Diagramme binaires par les rapports caractéristiques (Mg/Ca versus HCO ₃ /Cl)	62
Fig.V.11 : Diagramme binaires par les rapports caractéristiques (Mg/Ca versus HCO ₃ /SO ₄)	62
Fig.V.12 : Evolution de (Ca+Mg) en fonction de Cl ⁻	63
Fig.V.13 : Evolution de la conductivité en fonction des anions	64
Fig.V.14 : Evolution de la conductivité en fonction des cations	64
Fig.V.15 : Disposition des différents points d'eaux analysés par rapport à la ligne de mélange eau douce-eau salée	65
Fig.V.16 : Relation Ca/ Mg vs SO ₄ /Cl	66
Fig.V.17: Relation Ca/Mg vs HCO ₃ /Cl	66
Fig.V.18 : Relation Ca/Mg vs SO ₄ /Cl	67
Fig.V.19 : Carte de répartition des faciès chimiques dans le synclinal d'Aflou	68
Fig.V.20 : Diagramme de classification des eaux d'irrigation en fonction du S.A.R	71
Fig.V.21 : Diagramme de classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de WILCOX	72
Fig.V.22 : Evolution des indices de saturation (gypse et anhydrite)	74
Fig.V.23 : Evolution des indices de saturation (calcite, dolomite et l'aragonite)	74
Fig.V.24 : Corrélations entre minéraux et indices de saturation	75
Fig.V.25 : La relation entre (Ca+Mg-HCO ₃ -SO ₄) et (Na-K-Cl) dans les eaux du Barrémien-Aptien-Albien	76

Fig.V.26 : Projection des variables	78
Fig.V.27 : Projection des individus selon F1-F2	78
Fig.VI.1: Propagation et évolution du polluant dans l'aquifère (Mécanisme de la dilution)	86
Fig.VI.2: Pollution par un produit plus léger que l'eau et qui atteint la nappe	87
Fig.VI.3 : Pollution de la nappe par un produit plus lourd que l'eau	87
Fig.VI.4: Indice de profondeur	107
Fig.VI.5: Indice de recharge	108
Fig.VI.6: Indice de la zone saturée (milieu aquifère)	109
Fig.VI.7: Indice de type sol	110
Fig.VI.8: Indice de topographie (pente)	111
Fig.VI.9: Indice de la zone vadose	112
Fig.VI.10: Indices de conductivité hydraulique	113
Fig.VI.11: La carte de vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou	114

Liste de tableaux

Tab.II.1 : Coordonnées de la station d'Aflou	14
Tab.II.2: Précipitations moyennes mensuelles (1990-2017)	14
Tab.II.3 : Valeurs des précipitations annuelles de station Aflou (1990-2017)	15
Tab.II.4 : Le coefficient pluviométrique	17
Tab.II.5 : les paramètres statistiques	18
Tab.II.6 : Précipitations saisonnières pour la période (1990/2017)	19
Tab.II.7 : Températures moyennes mensuelles station d'Aflou (1990-2017)	20
Tab.II.8 : Moyennes mensuelles de l'évaporation à Aflou (1990-2017)	23
Tab.II.9 : Calcul de l'ETP selon la méthode de Thornthwaite à la station d'Aflou (1990-2017)	25
Tab.II.10 : Bilan hydrique moyen (1990-2017) à la station d'Aflou par la méthode de Thornthwaite	28
Tab.II.11: ETR à la station d'Aflou par les différentes méthodes	29
Tab.III.1: Débits moyens mensuels de l'Oued Sebgag	34
Tab.III.2 : Débits moyens mensuels à la station de Seklafa	37
Tab.III.3 : Débits moyens mensuels caractéristiques de l'oued Seklafa	37
Tab.IV.1 : Variation des paramètres chimiques des eaux souterraines du synclinale d'Aflou	53
Tab.IV.1 : Diagraphie électrique	46
Tab.V.1 : Moyenne des ions majeurs en méq/l	61
Tab.V.2 : Plage de valeurs du titre hydrotimétrique	69
Tab.V.3 : Paramètres statistiques des indices de saturation	73
Tab.VI. 1: Les 7 paramètres "Drastic" et leur poids	98
Tab.VI. 2: Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (1)	104
Tab.VI. 3: Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (2)	104
Tab.VI. 4: Paramètres de la méthode DRASTIC	105
Tab.VI. 5: Notation et pondération du paramètre de la profondeur	107
Tab.VI. 6: Notation et pondération du paramètre de la recharge	108

Tab.VI. 7: Notation et pondération du paramètre de la zone saturée	109
Tab.VI. 8: Notation et pondération de la nature du sol	110
Tab.VI. 9: Notation et pondération du facteur de la pente	111
Tab.VI. 10 : Notation et pondération de la couche vadose	112
Tab.VI. 11 : Classes et notations retenues pour la perméabilité	113

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les zones arides couvrent environ 40 % de la superficie des terres mondiales (Dregne et al., 1991 ; Bridget et al., 2006 ; Standish-Lee et al, 2005) et accueillent 2 milliards de personnes, dont 90 % vivent dans les pays en développement. Ces zones reçoivent des quantités faibles et irrégulières (dans l'espace et dans le temps) de précipitations (MEA, 2009 ; ONU, 2011 ; Goudie, 1987 ; Thornes, 1994a ; Lange & Leinbundgut, 2003 ; Unganai & Mason, 2002; Love et al. 2010). Elles se caractérisent notamment par des vents fréquents desséchants et violents qui accélèrent l'évaporation de l'eau et activent la transpiration des plantes (FAO, 2005). Les zones arides correspondent à des territoires caractérisés par la présence d'un couvert végétal dégradé (Le Houerou, 1995) et par un déséquilibre marqué entre la quantité d'eau disponible et le pouvoir évaporant du climat (CNUCLD, 2009). Ces zones sont l'objet de tensions environnementales importantes, du fait de leur grande fragilité écologique et de la rareté des ressources en eau (Qadir et al., 2007). La croissance et la transformation des besoins des populations accentuent la pression sur les ressources naturelles et peuvent engendrer des phénomènes de dégradation du milieu, souvent amplifiés par les changements climatiques (Simonneaux, 2009).

L'Algérie est classée comme étant une zone semi- aride à aride du fait de l'importance de l'évapotranspiration par rapport aux précipitations. Les zones arides représentent près de 95% du territoire national, dont 80% dont le domaine hyper aride (saharien) Halitim (1988) Nedjraoui, 2003), Haddouche (2009). Ces régions arides se caractérisent notamment par des zones steppiques qui représentent un espace et parcours privilégié de l'élevage ovin extensif (Hirche et al., 2007). Elles jouent un rôle fondamental dans l'économie agricole du pays. Toutefois, ces régions sont soumises à des sécheresses récurrentes et à une pression anthropique croissante : surpâturage, exploitation de terres impropres aux cultures (Nedjraoui.2008). Depuis plus d'une trentaine d'années, elles connaissent une dégradation de plus en plus accentuée de toutes les composantes de l'écosystème (flore, couvert végétal, sol et ses éléments, faune et son habitat).

Le présent travail a pour objectif en premier lieu de préciser les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines et d'étudier l'influence des minéraux évaporitiques sur la minéralisation de ces eaux via des méthodes géochimiques et statistiques.

En second lieu l'étude et l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution de la zone d'étude, le synclinal d'Aflou, une zone du centre de l'Atlas saharien d'Algérie.

L'étude hydrochimique révèle un impact lithologique sur l'hydrochimie des eaux souterraines du synclinal d'Aflou, c'est le secteur localement qualifié de cuvette qui rassemble les ressources les plus importantes en eaux souterraines contenues essentiellement dans les grés du Continental Intercalaire (Barrémien – Albien). La nappe est implantée dans une structure synclinale allongée sur plus de 100 km suivant une direction SSW –NNE pour une largeur moyenne de 10 à 12 km et une épaisseur dépassant les 1500 m.

La présente étude montre l'influence remarquable des minéraux évaporiques du Trias et aussi des gypses diffus dans les marnes verdâtres qui existent à plusieurs niveaux soit dans les formations du Barrémien- Aptien- Albien ou celle du Mio-Plio-Quaternaire.

Dans ce contexte, le travail consiste à faire une description des facteurs géographiques, une étude géologique, une étude hydro-climatique et en dernier lieu une interprétation hydrochimique basée sur les résultats d'analyse physico-chimique des eaux souterraines échantillonnées.

L'utilisation de l'outil SIG à été utile non seulement pour créer la base de données pour l'analyse de la variation spatiale des paramètres de qualité de l'eau respectives, mais aussi pour prédire le processus hydrogéochimique se produisant au niveau des aquifères de notre zone d'étude.

L'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution est un outil efficace pour limiter et maîtriser les risques de dégradation de la qualité de l'eau. Le principal objectif de cette étude est l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution de la zone d'étude (le synclinal d'Aflou). Cette zone est menacée par la pollution de nombreuses activités (urbanisation, industrie, exploitations agricoles, décharges et activités agricoles). L'augmentation de la demande en eau s'accompagne d'une pollution des oueds et des nappes. Compte tenu des coûts importants qui nécessitent la restauration des aquifères contaminés. La protection des eaux souterraines devient primordiale. Ce travail vise à estimer la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère du synclinal d'Aflou, et à développer un document cartographique. Une simple lecture de ces cartes permet de localiser les zones où l'aquifère est très vulnérable et les zones où des protections durables sont nécessaires. Cette cartographie est réussie en utilisant le modèle

DRASTIC dans un environnement de système d'information géographique (SIG) pour distinguer les zones vulnérables des eaux souterraines.

Cette thèse s'organise suivant 06 chapitres accompagnés d'une introduction et d'une conclusion générale et dont le plan suivi est comme ceci :

Introduction générale

Chapitre **I** : aborde une considération générale qui s'étale sur la présentation de la situation géographique de la région d'étude, et le contexte géologique de la zone d'étude ;

Chapitre **II** : on s'intéresse à l'étude climatologique de la station d'Aflou (1990-2017).

Chapitre **III** : est consacré à l'hydrologie de la région en se basant sur les données hydrométriques.

Chapitre **IV** : intéresse l'hydrogéologie du synclinal d'Aflou (étude de la nappe de Barrémien-Aptien-Albien, et apport de la géophysique)

Chapitre **V** : traite l'hydrochimie du synclinal d'Aflou (description sommaire des paramètres physico-chimiques, classification des eaux, cartographie hydrochimique des paramètres chimiques.

Chapitre **VI** : est consacré à l'étude de la vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou (établissement des différentes cartes de synthèse), réalisation et l'interprétation de la carte de vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou.

Conclusion générale

Bibliographie

CONSIDERATIONS GENERALES

I.1. Situation géographique de la région d'étude

La cuvette d'Aflou se localise dans la partie médiane du Djebel Amour à environ 300 Kilomètres au Sud-Ouest d'Alger, située à mi-distance entre les villes de Djelfa au Nord-Est et El Bayadh au Sud-Ouest (Fig.I.1) de coordonnées géographiques 34°E et 2°N. Elle s'étend sur 100 km suivant un axe Sud-Ouest- Nord Est et sur 10 à 12 km suivant un axe perpendiculaire. La région est allongée suivant une direction générale Sud-Ouest-Nord Est (Nord 60° E), l'altitude moyenne est de 1400 m.

La zone d'étude est entourée par des reliefs montagneux, elle est limitée :

- Au Nord par Djebel Gourou (1706m), Djebel Chebka (1483m), Djebel Sidi Okba (1707m), Oum El Gueddour (1650m) et Guern Arif (1721m).
- Au Sud par Djebel Mzara (1482m) et Djebel Bou Redim (1475m).
- A l'Est par Argoub Djedour.
- A l'ouest par la continuité du Djebel Djahaifa et Djebel Lekdam (1432m).

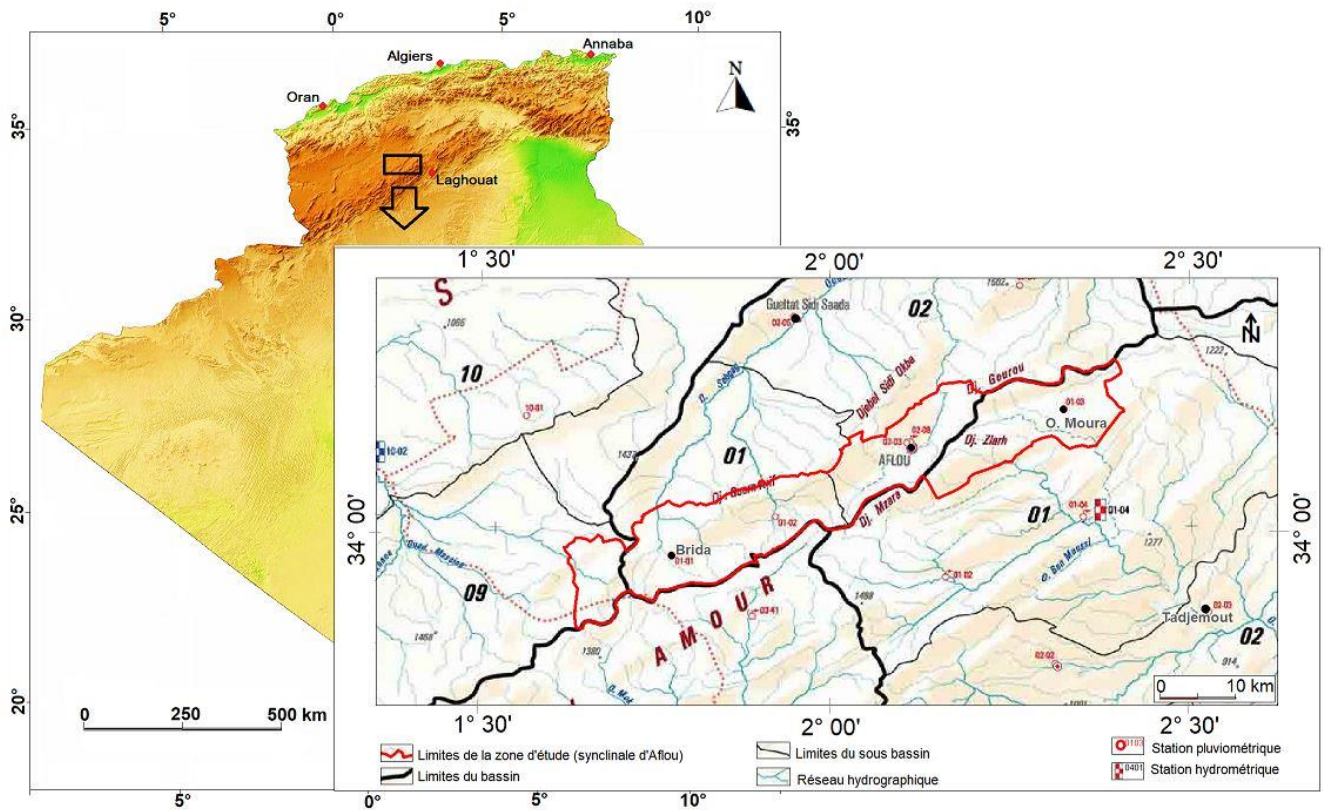


Fig.I.1 : Situation géographique de la région d'étude

I.2. Cadre géographique générale

Géographiquement l'Atlas Saharien est considéré comme le domaine de transition entre le domaine des Hauts Plateaux au Nord et le domaine saharien au Sud.

L'Atlas Saharien est une chaîne montagneuse intracontinentale orientée SW-NE, dans son ensemble elle est constituée par la succession de chaînes montagneuses de direction SW au NE dont les caractéristiques sont fondamentalement semblables sur toute l'étendue du Maroc au Nemmemcha.

L'Atlas Saharien se décompose en Algérie de cinq faisceaux qui se relaient d'Ouest en Est :

- Les Monts des Ksour.
- Le Djebel Amour.
- Les Monts des Ouled Nail.
- Les Aurès
- Les Nemmemcha

Ces faisceaux sont décalés les uns par rapport aux autres, mais rattachés entre eux par une série de plis secondaires légèrement obliques à la direction principale.

I.3. L'Atlas Saharien dans le cadre de l'orogénèse alpine

Profondément tectonisé au Tertiaire avant de subir les effets de relaxation du Pliocène et du Quaternaire, l'Atlas Saharien présente :

- des anticlinaux généralement coffrés et faillés avec des remontées axiales de Trias et de roches vertes.
- des plis qui présentent de rapides ennoyages axiaux et se relayant pour donner la structure en « chenilles processionnaires » définie par E. Ritter en 1902.
- des synclinaux typiques des formations où ils sont établis dans les grès du Barrémien et de l'Albien (cuvette d'Aflou); on rencontre des systèmes larges à fonds plats et à flancs redressés parfois jusqu'à la verticale et très fracturés, les formations récentes sont le plus souvent conservées dans les cuvettes synclinales alors qu'elles ont été enlevées par l'érosion au niveau des anticlinaux.

Dans le Cénomaniens et le Turonien : on rencontre des systèmes beaucoup plus étroits et généralement perchés le plus souvent à une altitude supérieure à celle des charnières des anticlinaux voisins.

Dans le Djebel Amour, leur forme est celle de tombeaux, d'où leur nom de Kebour.

La liaison avec les Hautes Plaines Oranaises du Nord se fait par un accident complexe, le plus souvent décrochant de rejet pouvant atteindre 1200 à 1500 m (CORNET, 1952) qui vient s'éteindre au niveau d'Aflou (DURAND DELGA, 1949).

La limite méridionale de l'Atlas Saharien correspond à l'accident complexe désigné sous le nom de «Flexure Sud Atlasique ». Il s'agit d'un système de failles et de flexures qui se relaient du Sud-Ouest au Nord Est avec un rejet parfois supérieur à 2000 m qui ont pour résultat un abaissement général du Sahara vis à vis de sa bordure atlasique. Les différentes failles constituant la Flexure Sud Atlasique semblent s'établir de façon quasi - systématique sur le flanc Sud des anticlinaux.

Orographiquement, la chaîne de l'Atlas Saharien Central est caractérisée par des crêtes qui atteignent en moyenne 1400 à 1500m ; les altitudes maximum près d'Aflou s'élèvent à 1721m (Djebel Guern Arif), 1707m (Djebel Sid Okba) et 1583m (Djebel Zlag).

I.4. Géologie de l'Atlas Saharien

- L'interprétation de la carte géologique au 1/500.000 établie en 1952 montre que l'Atlas Saharien est composé essentiellement de dépôts mésozoïques qui vont du Trias au Crétacé, Plus on se dirige vers l'Ouest du pays plus les formations deviennent très anciennes et en même temps on assiste à un passage progressif du milieu marin au milieu continental pour les mêmes terrains. Les séries mésozoïques et cénozoïques présentent un ensemble plissé à sédimentation marine et continentale d'âge Jurassique et Crétacé. Les formations du Mésozoïque, de même âge deviennent de plus en plus carbonatées vers l'Atlas Saharien Oriental et détritiques vers l'Atlas Saharien Occidental.

- Les dépôts du Trias, représente par un mélange d'argiles, de marnes, parfois de grés, brunâtres, violines ou versicolores avec des intercalations de gypse ou de halite et présentant des intrusions de roches vertes en dykes ou emballées dans les argiles. Ces affleurent au contact par l'intermédiaire de faille dont le rejet dépasse parfois les 1000 m.

-
- La série mésozoïque présente un ensemble plissé à sédimentation marine et continentale d'âge jurassique et Crétacé. Dans L'Atlas saharien central est occidental, jurassique supérieure et le Crétacé inférieure constituent un complexe détritique continental (grés) dont l'origine est deltaïque. L'observation de la carte géologique montre l'importance des affleurements jurassiques dans les Monts des Ksour par rapport aux autres unités morphologiques (Atlas Saharien Central et Oriental), ou le Crétacé l'emporte en affleurement.
 - Le Crétacé supérieure (Cénomaniens et Turoniens) est constitué par des argiles et marno-calcaires et au sommet par des calcaires massifs et calcaires dolomitiques.
 - Notons que les dépôts tertiaires correspondent aux sédiments post-Turoniens représentés par des couches argilo-gréseuses, des conglomérats et des calcaires lacustres (CONET 1949).
 - Le quaternaire résulte de l'accumulation dans des zones topographiquement basses du matériel sédimentaire arraché à la chaîne par les actions érosives.
 - La série lithostratigraphique établie par l'Institut Algérien du Pétrole (I.A.P) en 1973 peut être résumée par la coupe allant depuis les terrains triasiques jusqu'aux dépôts du Tertiaire continental.

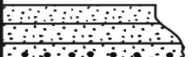



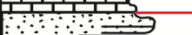


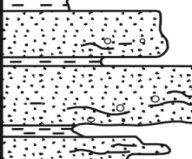

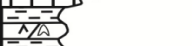




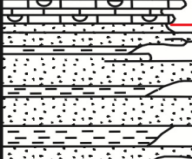
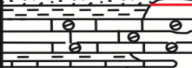

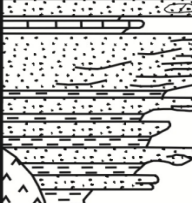

AGE	Puissance (m)	LOG	Description lithologique
TERTIAIRE CONTINENTAL	400		Argiles à gypse avec des conglomérats à la base.
SENNIEN S.L.	300		Intercalation de dolomie et argiles gypseuses.
TURONIEN	70		Barre dolomitique.
CENOMANIEN	100		Argiles à gypse.
ALBIEN SUP.	60		Calcaire fin blanc.
ALBIEN INF.	250		Grès à dragées supérieurs "Formation de Machereb"
APTIEN.	15-20		Barre calcaire intragrésuse "Formation de Drabina"
BARREMIEN	850		Grès à dragées inférieurs. "Formation de Machereb"
NEOCOMIEN SUP.	160-230		Barre calcaire.
NEOCOMIEN INF.	150-170		Marnes gypseuses. } "Formation de Tadmit supérieur"
PORTLANDIEN SUP.	150-200		Grès à chenaux. "Formation de Tadmit inférieur"
PORTLANDIEN INF.	200-350		Marno-calcaires bleutés. "Calcaires de Zeireg"
	50-130		Marnes gypseuses et calcaires "Formation M'Zi"
	170		Marnes gypseuses et calcaires lumachelliques "membre de Tadjemout"
KIMMERIDGIEN	200		Grès rouges à blanchâtres à intercalation d'argiles vertes à barre de calcaires dolomitiques "Formation khaoula"
	500		
	100		Calcaires à polyphyres "Membre Azreg"
OXFORDIEN	800		Grès inférieurs
DOGGER	300		

Fig.I.2 : Succession lithologique de l'Atlas saharien d'après I.A.P (1973)

I. 5. Géologie du secteur d'étude

I.5.1. Le Trias

Constitué d'argiles brunâtres ou violines intercalées de veines de gypse qui peuvent être solubilisées donnant des figures pseudokarstiques et présentant des intrusions de roches vertes. (Visible à Chaabet Djahaifa).

I.5.2. Le Jurassique Supérieur

Le Portlandien : (formation de Tadmit supérieur), Correspond à l'ancienne barre hauterivienne d'A.CORNET (1949), formant ainsi dans la topographie une corniche nette appelée quelquefois barre calcaire, visible au niveau du Djebel Mzara au sud et Djebel Chabka au nord d'Aflou. On distingue deux unités du bas en haut :

Le Portlandien inférieur : Constitué de marnes vertes à gypse : épaisse de 150 m formée par des marnes gypsifères de couleur verdâtre alternant avec des bancs de calcaires d'épaisseur variable.

Le Portlandien supérieur : d'une épaisseur d'environ de 200 m. Débute par une interstratification formée de grés fins, des argiles détritiques de couleur rouge admettent de fines passées gréseuses et quelques petits bancs de calcaires en plaquettes renfermant des débris de Gastéropodes.

La série se continue par des calcaires noduleux bioclastiques s'intercalant avec des couches marneuses plurimétriques renfermant des oursins irréguliers et des brachiopodes. Vers le toit, ce sont des calcaires oolithiques d'épaisseur d'environ 40 mètres qui forme, elle aussi, une corniche abrupte nettement visible dans la topographie. Ces calcaires sont par endroit fins ou massif, en gros ou en petits bancs et riches ou pauvres en fossiles.

I.5.3. Le Crétacé

Le Barrémien : (Grés à dragées inférieur de Machereb) : Le Barrémien marque une importante phase régressive dans le cycle sédimentaire. Cet étage se représente en effet avec des faciès continentaux dans tout l'Atlas Saharien. Les limites inférieures et supérieures de cette formation sont :

- Vers le bas, la série marno-calcaire fossilifère du sommet du Portlandien.

- Vers le haut la barre aptienne elle est plus ou moins bien marquée sur le terrain : la formation étant argileuse au toit et au mur.

- En outre, le Barrémien constitué des « Grés à Dragées Inférieures » est souvent mal définie sur le terrain par suite de la médiocrité des affleurements extrêmement étalés dans les zones synclinales et cette formation se confond parfois avec les grés de l'Albien. Donc c'est une limite purement lithologique qui quoique arbitraire du point de vue stratigraphique marque un changement très net dans le cycle sédimentaire.

- Ce sont des grés à dragées de quartz, de couleur ocre rouge en petits ou gros bancs admettant de fines interstratifications d'argiles vertes et des intercalations de petits niveaux de dolomies grises vers le sommet, alternant avec des argiles rouges à fines passées gréseuses à stratifications entrecroisées. L'épaisseur dépasse les 1000 m.

a) L'Aptien : (Formation de Drabina) : C'est barre calcaire intragréseuse. Au niveau de notre secteur d'étude, elle n'est pas toujours pu être identifiée. C'est une formation le plus souvent azoïque, formée de calcaires jaunâtres marneux et dolomitique parfois à gypse existant en intercalations décimétriques dans des marnes et verdâtres. L'épaisseur de cette formation n'excède pas les 50 m.- Dans L'Atlas Saharien central est occidental l'Aptien supérieur est continental car il n'est pas touché par la transgression qui a atteint son maximum dans l'Atlas oriental.

b) L'Albien : (Grés à dragées supérieur de Machereb) :- Ces grés à dragées et à ciment calcitique, présente une épaisseur de 250 à 300 m. le passage de l'Aptien à l'Albien se fait par l'intermédiaire d'une série argilo-silteuse à intercalation gréseuses d'une trentaine de mètres de puissance (Djebel Gourou à Est de notre secteur d'étude).

Ce complexe gréseux à comporte peu de niveaux conglomératiques à dragées (dont le diamètre varie du millimètre au centimètre). Les structures sédimentaires dans ces grés sont nombreuses : des chenaux décamétriques voir parfois hectométriques. L'Albien forme généralement l'auréole de base de la majeure partie des synclinaux perchés et plus rarement le cœur de quelques anticlinaux.

c) Le Cénomaniens : A Sebgag (Oum El Gueddour) : La formation est constituée de marnes gypsifères verdâtres, parfois intercalées de calcaires dolomitiques d'épaisseur métrique. Au sommet de la série apparaissent des bancs de gypse dont l'épaisseur ne dépasse pas un mètre. L'épaisseur de la formation est de 200 à 250 m.

d) Le Turonien : A Sebtag (Oum Gueddour, Guern Arif, Sidi Okba et Kef Gourou) le Turonien débute par une alternance de calcaires micritiques parfois dolomitiques à patine beige, à cassure rose avec des marnes verdâtres gypsifères. Cette formation se continue par des calcaires massifs et de très rares nodules de silex. L'épaisseur de la formation atteint 120 à 150 m.

e) Le Tertiaire et Quaternaire : Il résulte de l'accumulation dans des zones topographiquement basses du matériel sédimentaire arraché à la chaîne par les actions érosives. Les alluvions ainsi formées sont constituées par des sédiments généralement fins. Ce sont des limons de couleur ocre souvent très chargés en matériel gréseux. Les niveaux grossiers à graviers ou galets y sont rares et lorsqu'ils existent sont bien localisés à la périphérie des formations conglomératiques du Tertiaire continental. Suivant leur limite d'accumulation, les alluvions ont des épaisseurs variables sans oublier que le réseau hydrographique actuel les entaille profondément.

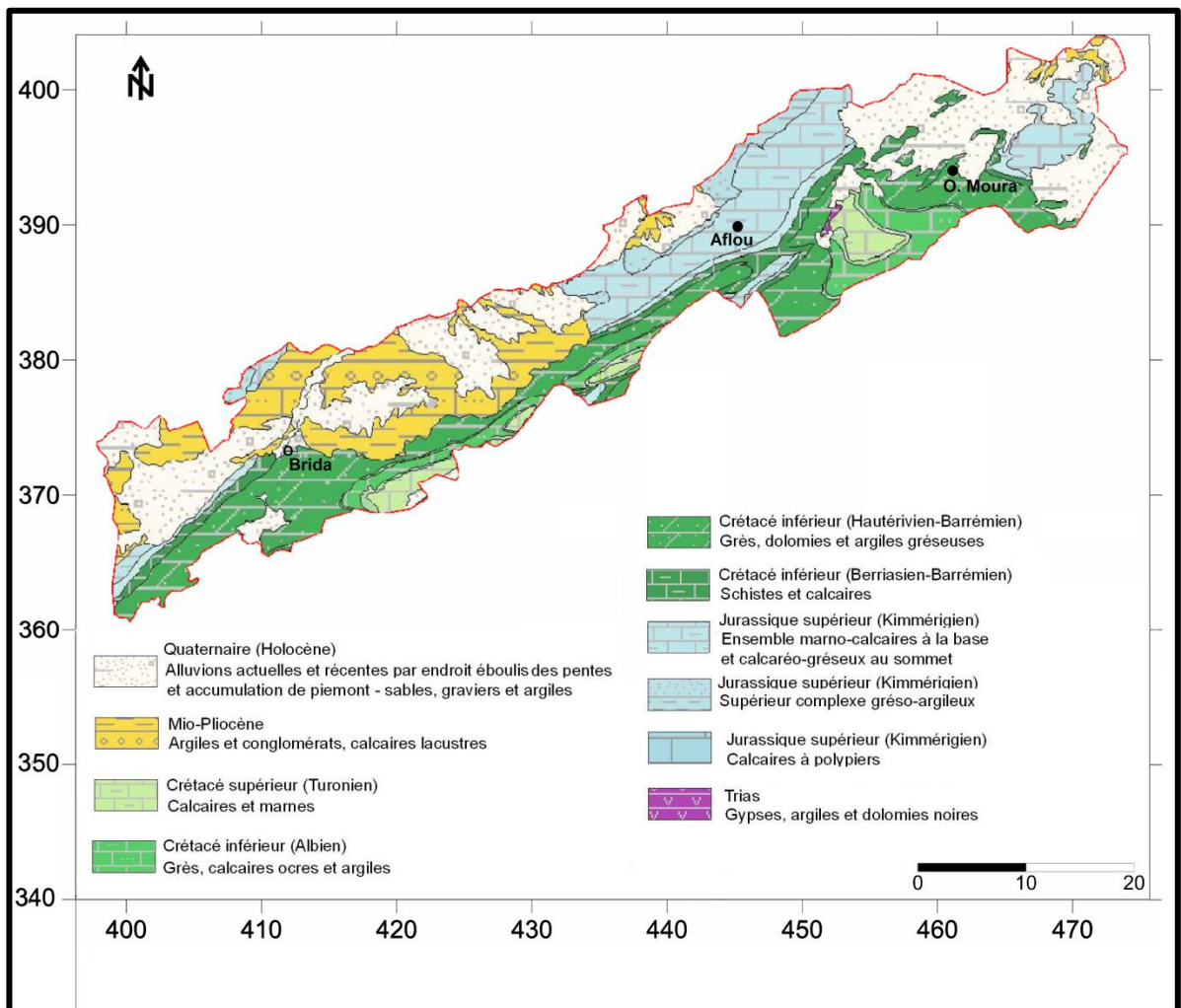


Fig.I. 3 : Carte géologique de la zone d'étude (synclinale d'Aflou), Extrait et modifié de la carte géologique générale, 1/200000 (ANRH, 2008).

I.6. Conséquences hydrogéologiques de la lithologie

Nous pouvons distinguer :

I.6.1. Des formations imperméables

a) Le Trias :

Constitué d'argiles brunâtres ou violines intercalées de veines de gypse qui peuvent être solubilisées donnant des figures pseudo-karstiques et présentant des intrusions de roches vertes.

b) Le Jurassique :

Portlandien inférieur : Epais de 100 à 150 m. Il s'agit de marnes gypsifères verdâtres présentant en intercalation des barres de calcaires dont l'épaisseur n'excède pas 1 m.

c) Le Crétacé :

Aptien : D'une épaisseur évaluée entre 15 et 50m, l'Aptien est constitué principalement de calcaire en plaquettes intercalés de marnes vertes gypseuses.

Cénomaniens : Epais de 140 à 250m. Ce sont des marnes gypsifères alternant avec des barres de calcaires dolomitiques. C'est donc là un milieu particulier caractérisé, par la présence des formations solubles que sont les calcaires et les gypses.

I. 6.2. Les formations perméables

a) Formations à perméabilité de fissures

Nous distinguons :

Portlandien supérieur : La série épaisse de 50m à 400m. La formation est constituée de calcaires en barres métriques très riches en fossiles.

Calcaire dolomitique du Turonien : D'épaisseur voisine de 130m, calcaires dolomitiques bien cristallisés très fissurés.

b) Formations présentant à la fois une perméabilité d'interstices et une perméabilité de fissures :

Barrémien : série puissante de 500 m à 1000 m, ce sont des grès de couleur ocre d'épaisseur variable.

Albien : d'une épaisseur supérieure à 300 m, ce sont généralement des grès rougeâtres à rosâtres, moyens à grossiers contenant des dragées de quartz.

c) Les formations à perméabilités d'interstices :

Nous classons ici les niveaux attribués au Mio - Pliocène, d'épaisseur comprise entre 30 et 120 m avec un système conglomératique à la base et des sables argileux à niveaux gypsifères au sommet de la série.

CLIMATOLOGIE

II.1. Introduction

Dans un pays comme l'Algérie caractérisé par le contraste entre le climat méditerranéen de la bordure littorale et le climat désertique du sud en passant par le climat des montagnes, des hauts plateaux, il est nécessaire de pouvoir préciser le type climatique du secteur que l'on étudie.

Notre région d'étude, sur le plan météorologique, constitue une zone de transition entre plusieurs phénomènes climatiques, notamment, le passage du régime climatique méditerranéen au climat saharien caractérisé par des influences desséchantes qui règnent, pendant une partie de l'année, sur le Sahara septentrional/Le relief caractérisé par les derniers chaînons de l'Atlas Saharien et formant une barrière aux influences méditerranéennes accentue les contrastes climatiques entre l'Atlas Saharien et la Plate-Forme Saharienne.

Les données climatologiques intéressent la station d'Aflou sont fournies par l'ANRH

Tab.II.1 : Coordonnées de la station d'Aflou

station	X	Y	Z	Année d'Installation
Aflou	34°6'46"	2°6'8"E	1406	1847

II.2. Les Paramètres Climatiques

II.2.1. les précipitations :

II.2.1.1. Pluviométrie mensuelle station d'Aflou (1990-2017) :

Tab.II.2: Précipitations moyennes mensuelles (1990-2017)

Station	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mar	Avri	Mai	Juin	Juil	Aou	Année
Aflou (1990-2017)	44,00	31,54	30,63	24,95	22,87	32,36	30,04	26,72	18,21	9,85	8,42	16,83	296,42

Cette station est installée à une altitude de 1406 m, la période d'observation comporte 28 ans de 1990 jusqu'à 2017, avec une moyenne mensuelle égale à 24,70 mm. Les précipitations atteignent leur maximum en septembre (44,00 mm), les minima apparaissent durant le mois de Juillet avec (8,42 mm). La moyenne mensuelle n'est pas atteinte par les mois suivants :

- janvier, mai, juin, juillet et août.
- Par contre, elle est dépassée par les autres mois.

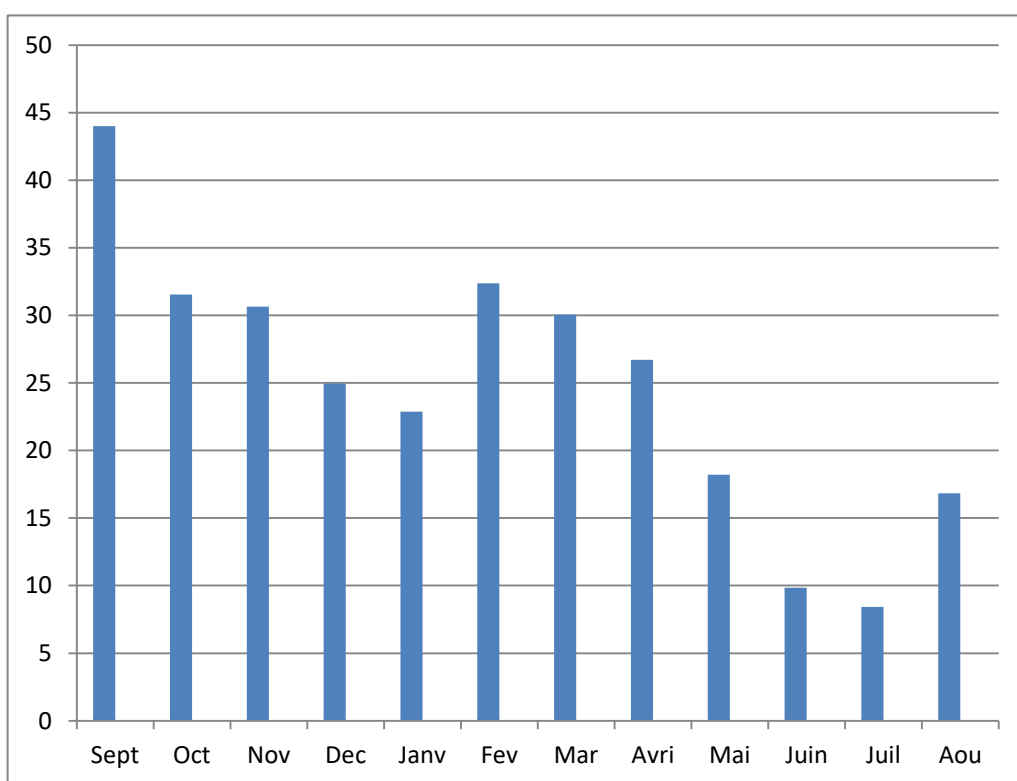


Fig. II. 1 : Variation des précipitations mensuelles à la station d’Aflou (1990-2017)

II.2.1.2. Pluviométrie annuelle (1990-2017)

Tab.II.3 : Valeurs des précipitations annuelles de la station d’Aflou (1990-2017).

Années	P (mm)	Année	P (mm)
1990	243,80	2004	237,80
1991	383,50	2005	292,30
1992	150,70	2006	230,90
1993	168,90	2007	159,50
1994	313,30	2008	341,00
1995	328,60	2009	372,70
1996	351,80	2010	312,00
1997	350,80	2011	385,50
1998	87,10	2012	281,90
1999	115,40	2013	312,30
2000	138,90	2014	373,50
2001	153,00	2015	282,90
2002	170,30	2016	268,10
2003	337,00	2017	143,20
Moyenne (mm) = 260,24		Ecart type = 92.57	

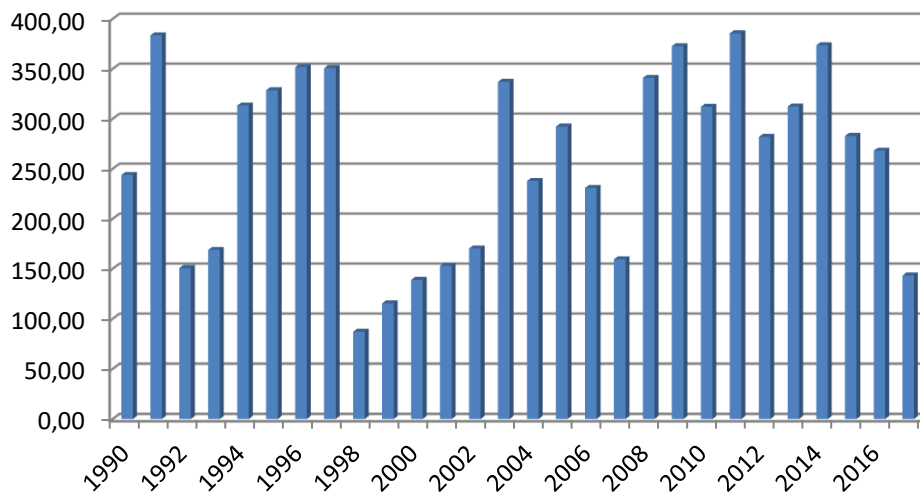


Fig. II. 2 : Variation des précipitations annuelles à la station d’Aflou (1990 – 2017)

L’analyse des variations annuelles des précipitations sur une période de vingt-huit ans (1990-2017) montre que la période 1994 -1997 est la plus arrosée avec un maximum de 350,8mm en 1997 suivie d’une autre période 2003-2005 avec 335 mm en 2003. La valeur la plus élevée est enregistrée en 1999 avec 438.2 mm. Les périodes les plus sèches s’observent de 1996 à 1993 avec un minimum de 150,7 mm et une période secondaire qui s’étale de 1998 à 2002 avec 130 mm en 1999.

II.2.1.3. Le coefficient pluviométrique :

C’est le rapport de la pluviométrie d’une année donnée à la pluviométrie moyenne (Tab) il permet de distinguer les années déficitaires des années excédentaires $H > 1$: Année excédentaire ; $H < 1$: Année déficitaire.

$$\text{Coefficient pluviométrique} = \frac{P_i}{P_{\text{moy}}}$$

P_i : pluviométrie d’une année donnée

P moy : pluviométrie moyenne pour une période de N années.

Tab.II.4 : Le coefficient pluviométrique

Années	H	Année
1990	0.93	Déficitaire
1991	1.47	Excédentaire
1992	0.58	Déficitaire
1993	0.65	Déficitaire
1994	1.20	Excédentaire
1995	1.26	Excédentaire
1996	1.35	Excédentaire
1997	1.34	Excédentaire
1998	0.33	Déficitaire
1999	0.44	Déficitaire
2000	0.53	Déficitaire
2001	0.58	Déficitaire
2002	0.65	Déficitaire
2003	1.29	Excédentaire
2004	0.91	Déficitaire
2005	1.12	Excédentaire
2006	0.88	Déficitaire
2007	0.61	Déficitaire
2008	1.31	Excédentaire
2009	1.43	Excédentaire
2010	1.20	Excédentaire
2011	1.48	Excédentaire
2012	1.08	Excédentaire
2013	1.20	Excédentaire
2014	1.43	Excédentaire
2015	1.08	Excédentaire
2016	1.03	Excédentaire
2017	0.55	Déficitaire

D'après les résultats on remarque :

Une période déficitaire assez longue qui s'étale de 1998 à 2007 (Le coefficient pluviométrique est inférieure à 1 exception faite pour 2003 et 2005

Deux épisodes excédentaires de 1994 à 1997 et de 2008 à 2011 avec un coefficient pluviométrique de 1,49 en 2011.

II.2.1.4. Etude statistique des précipitations annuelles : (1990-2017)

A. ajustement des précipitations à une loi statistique :

Tab.II.5 : les paramètres statistiques

Moyenne (mm)	260.24
Ecart type	92.57
Coef. de variation	0,35
Selon le CV :	Loi Normal
P décennale (U= 1,28)	378.73
P centenaire (U=2,23)	466,67
P millénaire (U=3,09)	246,28

Station Aflou : ajustement a une loi normale

Période : 1990-2017

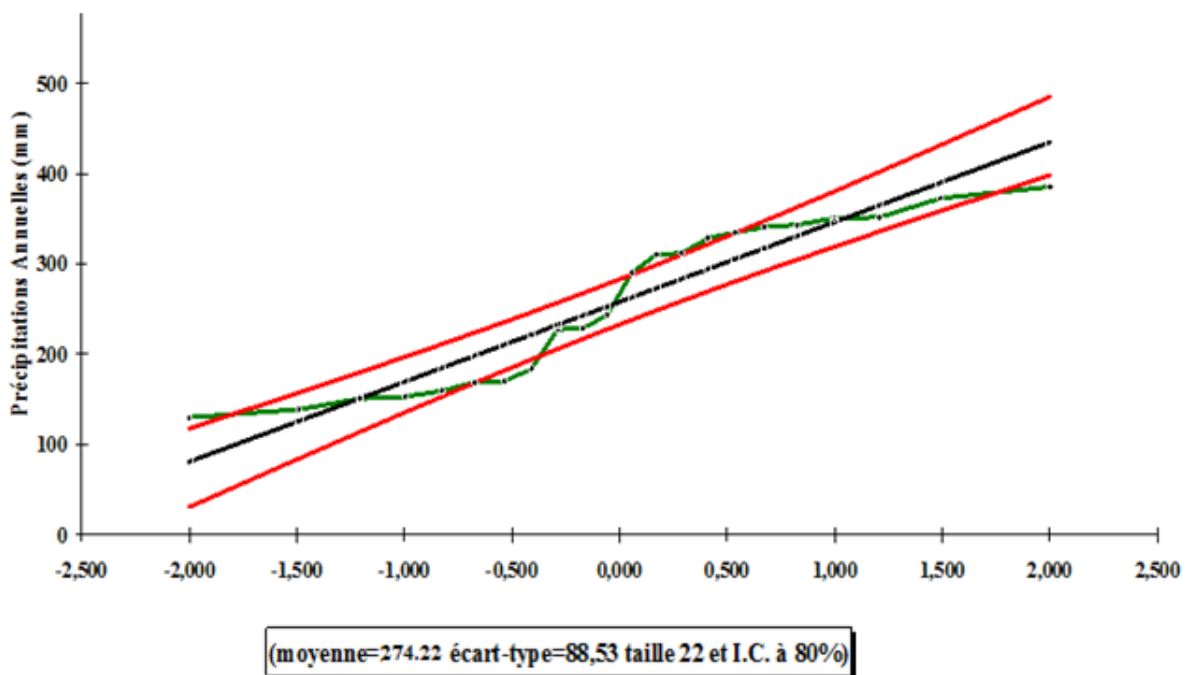


Fig. II. 3 : Ajustement à une loi normale station d'Aflou (1990-2017)

B. Test du χ^2

Le coefficient de variation $Cv < 0.5$; pour la station Aflou ; l'ajustement suit une loi normale, le test du χ^2 permettra de vérifier cette adéquation. Dans le but de déterminer la valeur du χ^2 , on a repris les séries des modules observés et on a réparti ces valeurs en classes.

Le χ^2 calculé (2.53) étant inférieur au χ^2 tabulé (5.96), pour un degré de liberté égal à 2 (5 classes et 2 paramètres) et un risque d'erreur tolérée de 5%, donc l'ajustement des précipitations pour la station Aflou suit une loi de distribution normale.

C. Etude de la pluviométrie saisonnière :

Le tableau si dessous représente les données des précipitations saisonnières de stations Aflou pour la période (1990/2017).

Tab.II.6 : Précipitations saisonnières pour la période (1990/2017)

Station		Automne	Hiver	Printemps	Eté
Aflou (1990-2017)	mm	87,12	85,27	54,78	69,25
	%	29,39	28,76	18,49	23,36

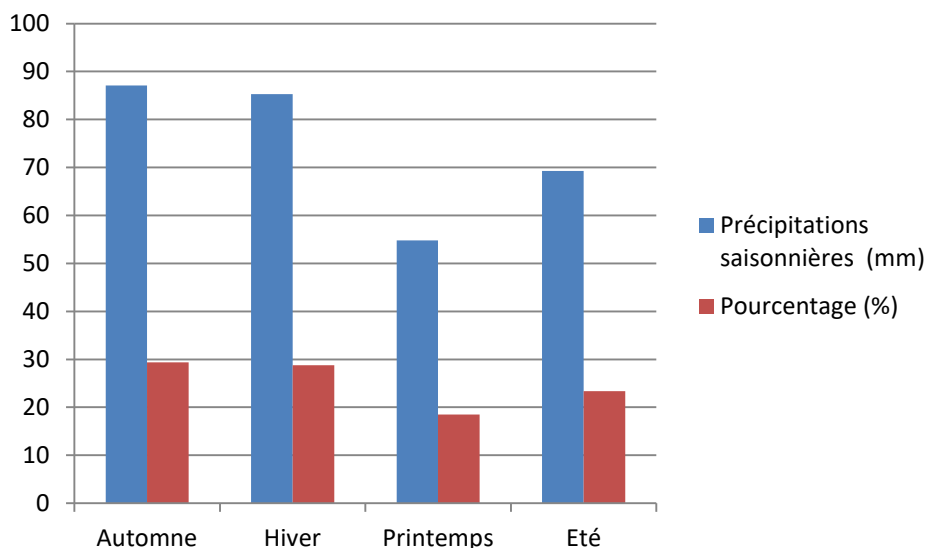


Fig.II. 4 : Variations saisonnière des précipitations (1990-2017)

L'étude de la variabilité saisonnière est indispensable pour voir si la baisse ou la hausse de la pluviométrie est spécifique à une saison particulière ou à plusieurs saisons.

La distribution saisonnière des précipitations montre, que le printemps et l'été correspondent à la saison la sèche. L'ensemble l'Automne et l'hiver forme la saison humide ou s'effectuerait la plus grande partie des écoulements.

II.2.2. Températures

Liée à la radiation solaire, la température est un élément essentiel du climat car elle influe sur la transformation des eaux en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol. Donc, elle agit sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent sur le ruissellement, l'infiltration et sur taux de salinité des eaux en particulier de surface. Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique.

II.2.2.1. Variations des températures moyennes mensuelles : stations d'Aflou (1990-2017):

On dispose des données de températures moyennes mensuelles et annuelles de la station d'Aflou pour une période de 28 ans (1990/2017). Ces données sont mentionnées dans le tableau suivant :

Tab.II.7 : Températures moyennes mensuelles station d'Aflou (1990-2017).

Station	Période	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D	Moy
Aflou	1990-2017	4,31	4,59	8,54	13,31	18,06	22,47	25,70	25,16	21,29	16,47	9,51	5,25	14,56

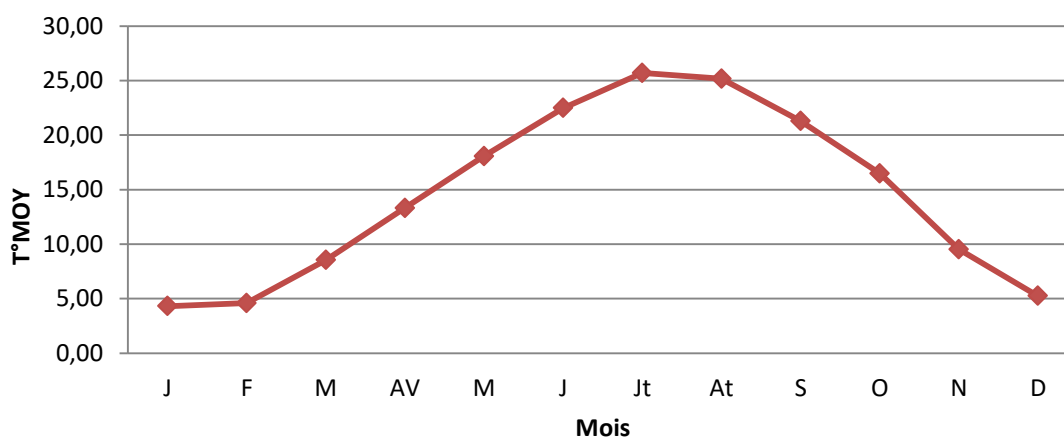


Fig.II. 5: Variation mensuelle de température à la station d'Aflou-1990-2017

Les basses températures s'observent les mois de Janvier et de février avec 4,59°C et 4.31°C. Les températures élevées s'observent durant la période estivale avec en juillet 25,16°C et d'Août 25,70°C. Quant à la température moyenne annuelle, elle est de 14,56°C. L'écart thermique entre le mois chaud et le mois froid varie de 20,85 °C.

Généralement la période froide, s'étend de Novembre à Avril; qui correspond à la période pluvieuse. La période chaude s'étend de Mai à Octobre correspondant à la saison estivale avec des pics importants en Juillet et en Août.

II.3. Caractérisation du climat

Les indices et les diagrammes bioclimatiques, permettent de caractériser le niveau de sécheresse ou d'aridité d'un lieu ou d'un climat. Il est nécessaire de préciser le type climatique dans lequel nous devons insérer le régime de la région étudiée.

Les méthodes possibles sont nombreuses :

II.3. 1. Méthodes graphiques

a) Diagramme Pluvio-thermique

C'est parmi les diagrammes les plus utilisés. Il tient compte des moyennes mensuelles des précipitations (P en mm) et de la température (T en °C) et donne une expression relative à la sécheresse estivale en durée et en intensité (Gausсен et Bagnouls, 1952). Un mois donné est considéré comme sec quand $P < 2T$, c'est-à-dire quand les pertes en eaux (supposées causées par une température trop forte) sont supérieures aux apports (précipitations).

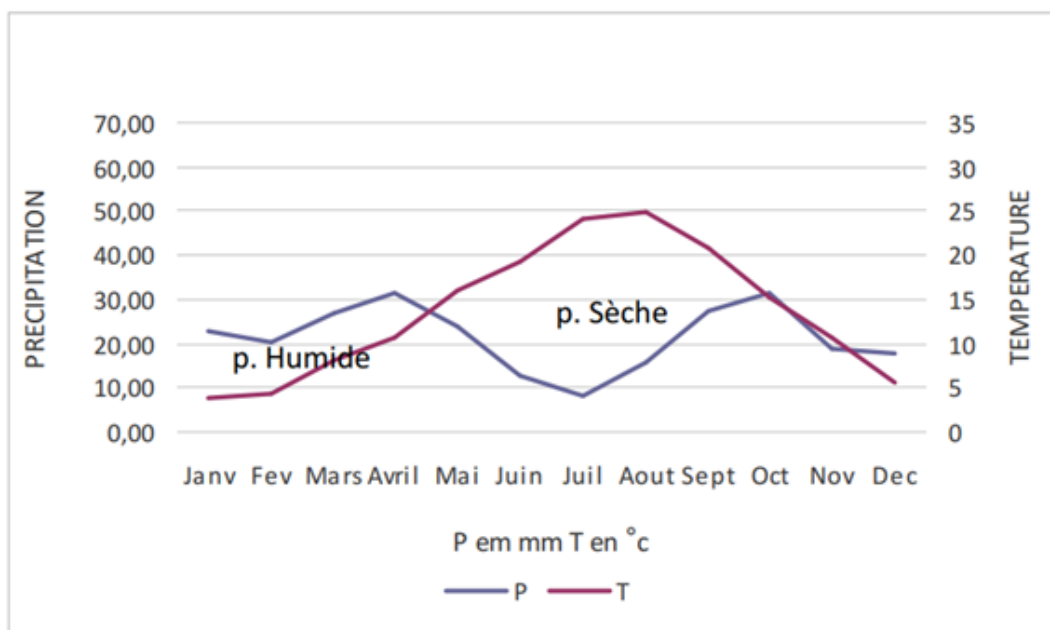


Fig.II.6 : Diagramme Pluvio-thermique de la station d'Aflou

Appliquée à la station d'Aflou, il résulte que la saison sèche s'étend du mois d'Avril jusqu'à mi-novembre.

II.3. 2. Les indices climatiques

II.3. 2.1. Indice annuel de De Martonne :

En 1923, De MARTONNE a défini un indice d'aridité "A" comme suite :

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

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

T : température moyennes annuelles (°C).

A < 5 : climat hyperaride

5 < A < 7,5 : climat désertique

7,5 < A < 10 : climat steppique

10 < A < 20 : climat semi-aride

20 < A < 30 : climat tempéré

A=10,59 pour la station d'Aflou donc un climat semi-aride

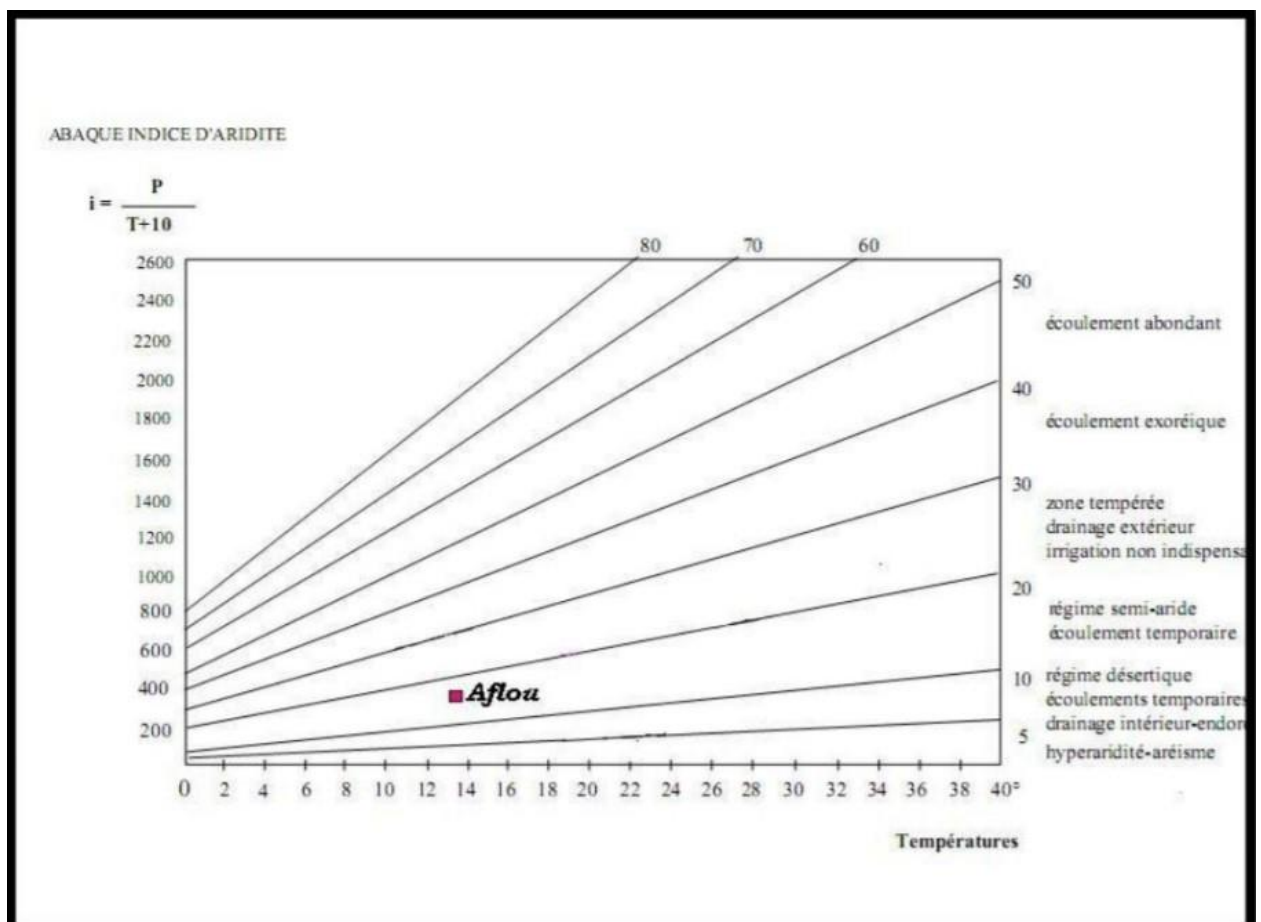


Fig.II. 7 : Abaque de l'indice d'aridité annuel de Martonne

II.3. 2. 2 Indice pluviométrique de Moral :

l'indice pluviométrique de Moral (IA), permet de distinguer un climat sec ($IA < 1$) d'un climat humide ($IA > 1$) défini comme suite:

$$(IA) = P/T^2 - 10T + 200$$

IA : indice pluviométrique annuel

P : Précipitation moyenne annuelle en mm

T : température moyenne annuelle en °C

Appliqué à la station d'Aflou $IA = 0,46$ caractérisant un climat sec.

II.4. Conclusion sur les indices climatiques :

Sachant que les éléments climatiques les plus importants pour caractériser un climat sont les précipitations, les températures et l'évaporation; les méthodes combinant ces éléments sont plus intéressantes que celles qui incluent un seul élément. Les méthodes utilisées montrent un climat semi-aride pour Aflou.

II.5. Evaporation et évapotranspiration

II.5. 1. Evaporation : Les enregistrements sont réalisés avec un évaporomètre Piche.

Tab.II.8 : Moyennes mensuelles de l'évaporation à Aflou (1990-2017)

Station	Période	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
Aflou (1999- 2017)	(1990- 2017)	65,08	40,11	19,52	11,73	9,11	12,07	25,43	35,13	62	85,6	108,5	95,22	569,52

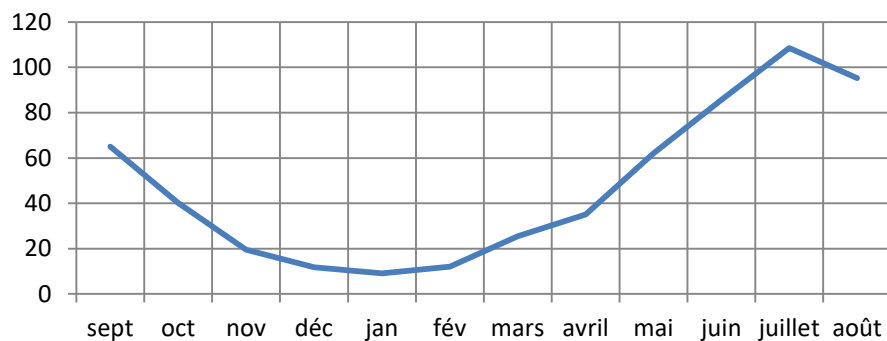


Fig. II. 8: Evaporation moyenne mensuelle à Aflou (1990-2017).

Pour la station d'Aflou l'évaporation la plus élevée est observée au mois de Juillet avec 108,52 mm, la plus faible au mois de Janvier avec 9,11 mm.

II.6. L'évapotranspiration

L'évaporation représente le processus au cours duquel l'eau se transforme en vapeur. L'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration est connu sous le nom d'évapotranspiration. Cette dernière est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique. La précision avec laquelle l'évaporation est estimée est essentielle pour le calcul du bilan hydrique.

II.6.1. Evapotranspiration potentielle ETP :

C'est la quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou par un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant.

L'estimation de l'évapotranspiration potentielle, a été établie par la formule de Thornthwaite.

II.6.1.1. Formule de Thornthwaite :

On a appliqué la formule de THORNTHWAITE à la station d'Aflou:

$$ETP = 16 [10T/ I]^a \text{ (mm)}$$

Où :

ETP : L'évapotranspiration potentielle non corrigée, (mm).

T : La température moyenne mensuelle en C°.

I : L'indice annuel de chaleur, $I = \sum_{i=1}^{12} i$

i : L'indice mensuel de chaleur, $i = [T/5]^{1.514}$

a : L'exposant climatique, ($a = 0.016 I + 0.5$)

Les valeurs de l'ETP calculées par cette formule doivent être corrigées à l'aide d'un facteur correctif **K**, qui dépend du temps et du lieu de la station intéressée:

$$ETP \text{ corrigée} = ETP.K$$

Les résultats obtenus, sont mentionnés dans le tableau, avec : $I = 60,8$ et $a = 1,47$.
Donc, l'ETPc = 828,233 mm, soit 279,30 % des précipitations.

**Tab.II.9 : Calcul de l'ETP selon la méthode de Thornthwaite à la station d'Aflou
Période (1990-2017).**

Aflou	J	F	M	A	M	J	JT	AT	S	O	N	D	Année
ETP calculée	9,73	10,63	26,17	49,82	77,6	106,49	129,38	125,49	98,49	67,88	30,63	12,93	630,84
K	0,88	0,85	1,03	1,09	1,2	1,2	1,22	1,16	1,03	0,97	0,87	0,86	
ETP corrigée	8,56	9,03	26,95	54,3	93,12	127,79	157,84	145,57	101,4	65,84	26,64	11,11	828,23

II.6.2. Evapotranspiration réelle ETR :

L'évapotranspiration réelle est une réponse, en termes de vapeur d'eau, d'un milieu donné à la demande exercée par l'évapotranspiration potentielle, compte tenu de la quantité d'eau disponible.

L'évapotranspiration réelle est estimée à l'aide des formules de TURC, WUNDT, VERDEIL et THORNTHWAITE.

II.6.2.1. Formule de Turc :

En utilisant la hauteur annuelle de pluie et la température moyenne annuelle, la formule de Turc nous permet d'évaluer l'évapotranspiration réelle annuelle au niveau de notre secteur d'étude.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

ETR : Evapotranspiration réelle (en mm/an)

P : Hauteur annuelle de pluie (en mm) = 274,22

T : Température moyenne annuelle (en °C) = 14,56

Pour la station d'Aflou, l'**ETR = 259,94 mm**

II.6.2.2. Méthode de Wundt :

Cette méthode permet d'obtenir à partir d'un diagramme le déficit d'écoulement en fonction de la température et des précipitations. **ETR Aflou = 270 mm**

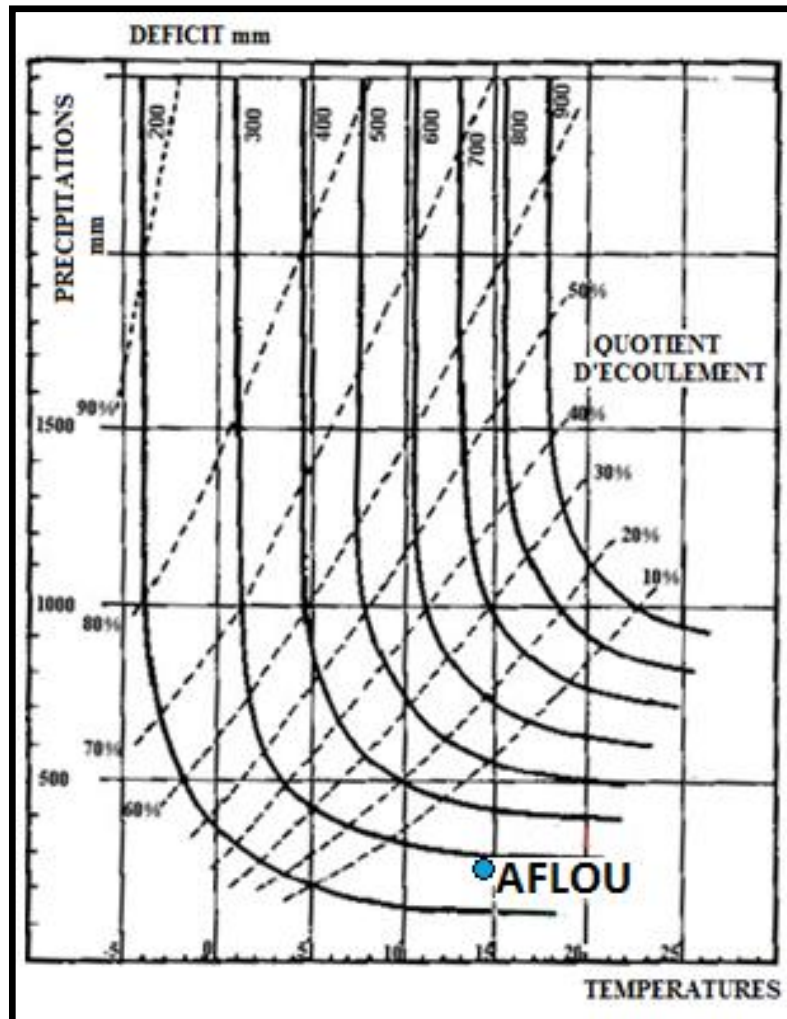
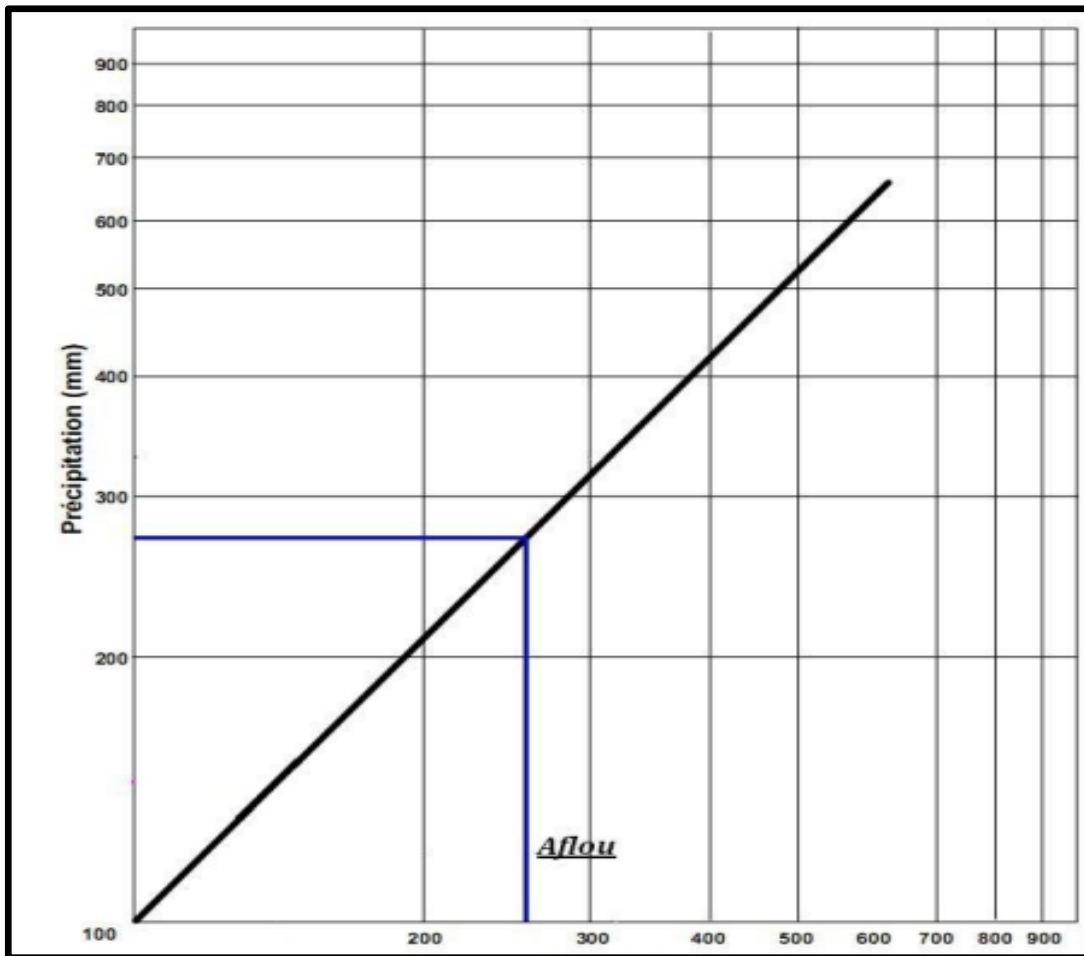


Fig.II. 9 : Localisation de la station d'Aflou sur l'abaque de Wundt.

II.6.2.3.Méthode de Verdeil :

En 1989, Verdeil a établi un abaque bi-logarithmique pour les régimes semi-arides où les précipitations ne dépassent pas les 600 mm, en tenant compte que des précipitations. Pour Aflou $ETR = 260 \text{ mm}$.



**Fig.II. 10 : Projection des précipitations moyennes annuelles
(Abaque de VERDEIL)**

II.6.2.4. Calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite :

Cette méthode est utilisée pour les climats subhumide et semi-aride, ce qui convient à notre secteur d'étude, vu les caractéristiques de son climat. Elle est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). L'estimation de ce paramètre a été faite par l'application de la formule de Hallaire 1960 (cité par J.Ricard1979).

$$\mathbf{RFU = (C - F / 100) * h * D + 30 \text{ mm}}$$

Avec :

RFU : Réserve facilement utilisable en (mm)

C : Capacité de rétention aux champs

F : Capacité au point de flétrissement des plantes

h : profondeur de la couche traversée par les racines

D : Densité apparente du sol, supposée : $D = 1$

30 mm : correspondent au déracinement capillaire.

Hallaire propose :

C – F = 05 % : un sol sableux

C – F = 10% -15% : un sol limoneux

C – F = 20 % : un sol argilo – limoneux

Selon la majeure partie du sol de la région on prend C-F = 10 %

La profondeur du sol $h = 650$ mm.

$$RFU = (10 / 100) * 650 * 1 + 30 \text{ mm}$$

$$RFU = 95 \text{ mm.}$$

Dans cette méthode, on se base sur le principe suivant:

$$\text{Si : } P > ETP \rightarrow ETR = ETP \rightarrow RFU = P - ETP.$$

Si : $P = ETP \rightarrow$ Les précipitations sont suffisantes pour alimenter le sol mais il n'y aura pas de surplus pour alimenter la RFU donc $[RFU = 0]$.

Si : $P < ETP \rightarrow$ on a épuisement des réserves, dans ce cas on aura un déficit du bilan ($ETP - ETR$), ou encore $(ETP - P)$ qui représentera la quantité d'eau qu'il faudra ajouter à l'ETR pour atteindre l'ETPD

**Tab.II.10 : Bilan hydrique moyen (1990-2017) à la station d'Aflou
par la méthode de Thornthwaite.**

	Nov	Dec	Janv	Fev	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Année
P (mm)	30,63	24,95	22,87	32,36	30,04	26,72	18,21	9,85	8,42	16,83	44	31,54	296,42
E.T.P. (mm)	26,65	11,11	8,56	9,03	26,95	54,3	93,12	127,79	157,84	145,57	101,4	65,84	828,23
Variation de la réserve (mm)	3,99	13,84	14,31	23,33	3,09	-27,58	-74,91	-117,94	-149,42	-128,74	-57,4	-34,3	
Réserve d'eau utile (mm)	3,99	15,1	29,41	52,74	55,83	28,25	0	0	0	0	0	0	185,32
ETR	26,65	11,11	8,56	9,03	26,95	54,3	46,46	9,85	8,42	16,83	44	31,54	293,7
Déficit (mm)	0	0	0	0	0	0	46,66	117,94	149,42	128,74	57,4	34,3	534,46
Excédent (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coef.mensuel d'humidité													

L'observation du bilan hydrologique nous amène à dire que :

Pour notre secteur d'étude l'ETP est importante durant la période estivale avec un maximum de 149,28 mm en Juillet, durant la période hivernale ou humide et à partir du mois de décembre, on assiste à une reconstitution réserves qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU, qui atteint son maximum en mars avec 35,26 mm, le déficit agricole apparait à partir du mois de mai jusqu'à la fin du mois de novembre ou il atteint son minimum de 13,04 mm, le maximum est en juillet avec 141,23 mm. L'Etr est de 248,82 mm.

Tab.II.11: ETR à la station d'Aflou par les différentes méthodes

Méthodes	P (mm)	ETR	
		mm	% des P
Turc	274,53	272.58	99,29
Wundt		270	98,35
Verdeil		260.00	94,70
Thorntwaite		293.7	/

Il nous paraît que la méthode de Verdeil donne des valeurs acceptables.

II.7.Bilan hydrologique

Un système hydraulique qui peut être un lac, une rivière, un aquifère, ou un bassin versant comme notre cas est conditionné par une équation de base qui permet de distribuer les précipitations s'écrit : Variation de stock=entrées -sorties

Les **entrées** : qui peuvent être des précipitations, infiltration dans le sol, percolation ou bien des apports artificiels (stockage souterrain d'eau).

Les **sorties** : comme l'évaporation, la transpiration, le ruissellement de surface, le ruissellement souterrain, et le pompage.

Le calcul du bilan hydrologique est fonction de plusieurs facteurs du système hydrologique tels que: les précipitations, le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation.

Le bilan s'écrit selon la formule :

$$P = E + R + I$$

Où :

P : Pluviométrie moyenne annuelle en mm

E : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle en mm

R : Ruissellement moyen annuel en mm

I : Infiltration moyenne annuelle en mm

II.7.1. Ruissellement superficiel :

estimé comme suite par la formule de Tixeront-Berkaloff :

$$R = P^3 / 3(ETPc)^2$$

Appliqué à la station d'Aflou on'a :

Stations	P (mm)	Etpc (mm)	R (mm)	
Aflou	274,22	828,23	10,02	3.65% des P

II.7.2. Infiltration :

L'infiltration est déduite à partir de l'équation principale du bilan

$$P = ETR + R + I$$

L'application de la formule nous donne une infiltration de 4,2 mm soit 1,53%.

Conclusion :

L'étude hydro climatologiques, montre que la région d'Aflou est caractérisée par des précipitations irrégulières avec une moyenne annuelle de 274.22 mm. La température annuelle moyenne est 14,56 °C, le maximum est atteint en juillet avec 25,70 °C, le minimum est 4.31 °C en janvier.

La région, jouit d'un climat semi-aride. Pour l'évapotranspiration réelle seule la méthode de Verdeil donne des résultats acceptables soit 260 mm pour Aflou.

Le ruissellement superficiel est de l'ordre de 10,02 mm soit 3,65 % des précipitations à Aflou.

L'infiltration est de 4,2 mm soit 1,53% des précipitations.

HYDROLOGIE

III.1. Introduction

Les relevés des débits d'un cours d'eau pendant une longue série d'années montrent des variations saisonnières systématiques (position des hautes et basses eaux) en fonction des principaux facteurs influençant l'écoulement : le régime des précipitations, la nature du bassin versant, sa situation géographique, l'infiltration, etc. Le régime hydrologique d'un cours d'eau résume l'ensemble de ses caractéristiques hydrologiques et son mode de variation.

La nécessité de comprendre l'évolution des données hydrométriques recueillies au niveau d'une station de jaugeage, servira d'une part l'évaluation des apports liquides à différentes échelle de temps, et d'autre part l'analyse de la variabilité événementielle de l'écoulement.

Sur le plan hydrographique, les cours d'eau ou oueds de l'Atlas Saharien suivent une ligne de pente insensible à l'œil au milieu de la steppe étendue et s'épandent souvent dans des bassins fermés et vont alimenter les dayas et les chotts situés plus au Nord. Tous ces oueds sont à sec la plupart du temps. Exception faite pour les Oueds : Sebgag et Seklafa.

L'Oued Sebgag situé à l'Ouest d'Aflou qui est l'unique rivière de l'Atlas saharien Central qui se déverse dans la mer Méditerranée et qui constitue la source de l'un des plus importants cours d'eau d'Algérie : le Chélif.

L'Oued Seklafa, nait sur le versant méridional de l'Atlas au Sud d'Aflou, et se déverse dans le Chott Melrhir au Sud de Biskra, après avoir longé le pied de l'Atlas.

III.2. L'oued Sebgag :

A 20 kilomètres à l'Ouest d'Aflou, il existe un certain nombre de sources pérennes donnant naissance à l'Oued Sebgag qui reçoit en aval plusieurs affluents pour former l'oued Touil, puis l'oued Cheliff.

L'étude hydrologique intéresse les débits relatifs de la période (1966-1967) ou une station hydrométrique a été implantée par les services de la DHW (Direction de l'hydraulique de la Wilaya de Tiaret) à une centaine de mètres au Sud de Guern- Arif, sur l'emplacement de l'ancienne retenue.

Cette situation a été choisie car elle permet de prendre en compte l'ensemble des sources émergeant dans la dépression de Sebgag. Les mesures de débit ont été effectuées journalièrement du premier Novembre 1966 au 31 Août 1967.

Il n'a pas été établi de courbe de tarage de la station et nous n'avons aucune indication sur les hauteurs d'eau (pas plus d'ailleurs que sur les méthodes utilisées pour l'estimation des débits).



Fig.III.1 : Situation des principaux Djebels et Oued dans la région d'Aflou

(Monts du Djebel Amour) Photo : Google Earth

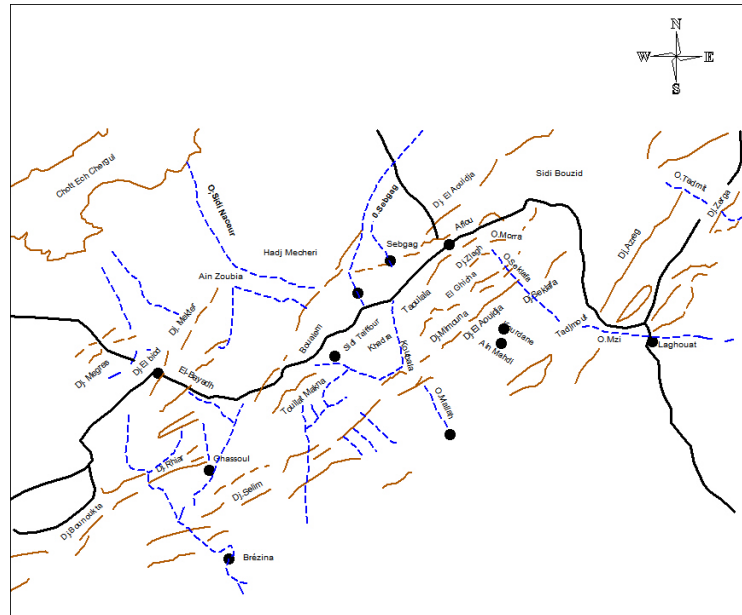


Fig.III.2 : Schéma géographique des Monts de Djebel Amour

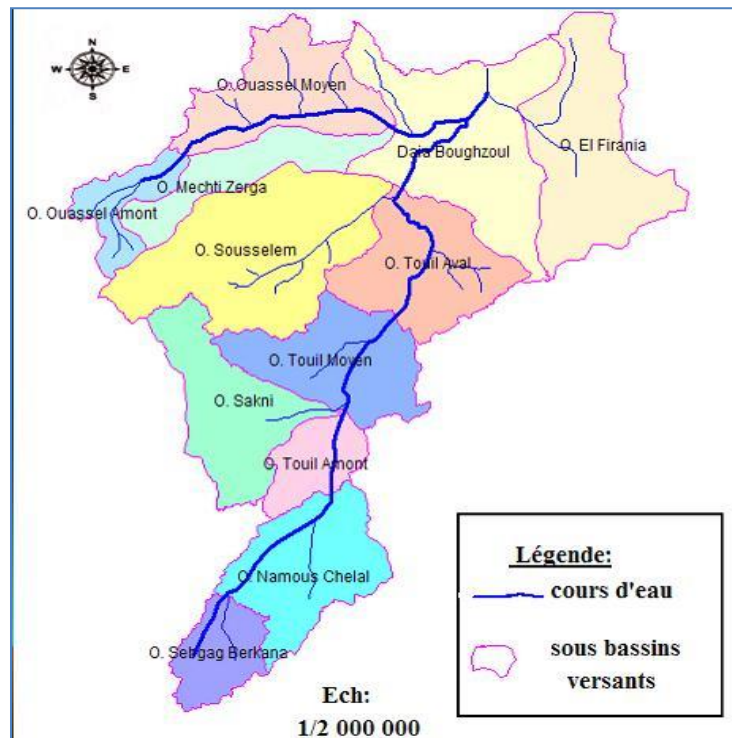


Fig.III.3 : Carte des sous bassins versants du bassin Cheliff

III.2.1. Distribution des débits moyens mensuels pour la période 1966-1967:

Les débits moyens mensuels de la période 1966-1967 sont reportés dans le tableau suivant :

Tab.III.1: Débits moyens mensuels de l'Oued Seb gag

	Débits mensuels minima	Débits mensuels	Débits mensuels
Septembre	/	/	/
Octobre	/	/	/
Novembre	0,14	0,23	0,23
Décembre	0,16	0,17	0,17
Janvier	0,16	0,25	0,18
Février	0,17	0,22	0,19
Mars	0,16	0,2	0,18
Avril	0,094	0,22	0,16
Mai	0,04	0,2	0,069
Juin	0,044	0,094	0,058
Juillet	0,032	0,069	0,048
Août	0,04	0,069	0,053

1- Débits minima mensuels :

De Novembre à Mars les minima mensuels oscillent, entre 0.14 et 0.17 m³ /s. La valeur la plus élevée se présentant en Février. Au - delà la courbe décroît rapidement pour atteindre un minimum de 0.032 m³/s en Juillet.

2- Débits maxima mensuels :

Le débit le plus élevé a été observé le 12 Janvier 1967. De janvier à Mai les débits oscillent entre 0.20 et 0.25 m³/s. En Juin, apparaît une rupture brusque, et les débits continuent à décroître jusqu'au minimum observé de 0.069 m² /s en Août.

3- Débits moyens mensuels :

Du maximum observé de Janvier à Avril les débits varient assez peu, restant compris entre 0.19 et 0.16 m³/s.

La rupture observée en juin pour les débits maxima apparaît ici en Mai, les débits tombent ensuite à $0.069 \text{ m}^3/\text{s}$. La décroissance se poursuivra jusqu'à juillet où un maximum de $0.048 \text{ m}^3/\text{s}$ est noté.

Le débit moyen mensuel le plus fréquent (30 % des observations), suivi de 0.048 (20% des observations) les débits les moins fréquents (0 à 5 % des observations) sont compris entre 0.1 et $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$.

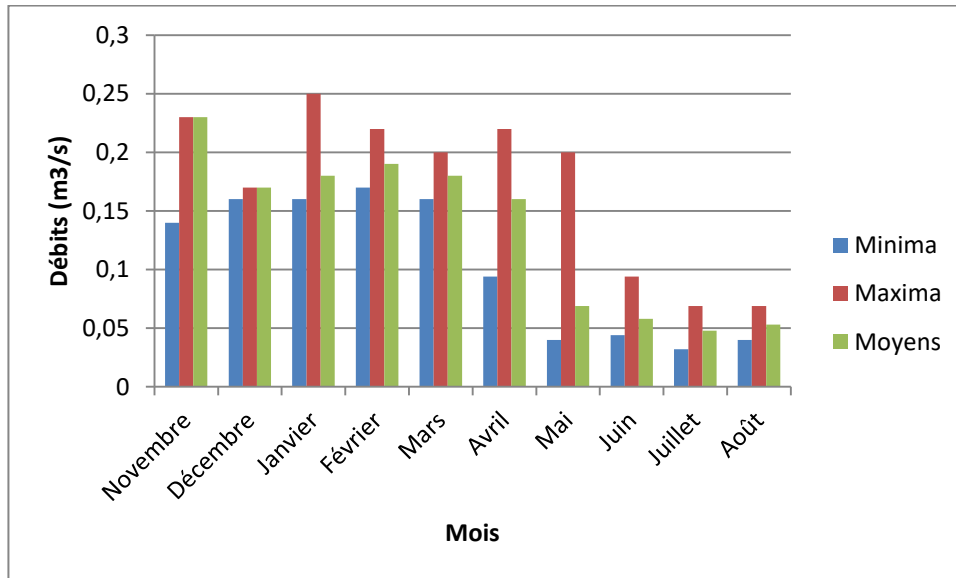


Fig.III.4 : les débits caractéristiques de l'oued Sebqag (1966-1967)

III.3. Oued Seklafa :

Né dans le Djebel Amour, il descend en direction de Laghouat. Au – delà de la zone d'épandage située immédiatement à l'aval de Ksar El Hirane, il prend le nom d'Oued Djedi qu'il conservera jusqu'à son débouché sans le Chott Melghir.

- L'Oued M'ZI qui constitue la branche principale du système prend naissance à 1600 mètres d'altitude et draine un bassin de 4500 km^2 , la longueur de l'oued principale est de 106 km. Les deux principaux sous bassins sont l'Oued Seklafa et celui de Tadjemout.

- Les débits ont été mesurés de 1938 à 1951 à Laghouat pour la partie qui nous intéresse mais aussi plus à l'aval à Ouled Djellal et vers Biskra.

- Plus récemment enfin, une station hydrométrique a été installée à Seklafa et a fonctionné depuis 1971 dans laquelle nous avons pu disposer des relevés concernant les débits moyens portant sur la période 1971 – 1987, les débits minima et maxima pour la période 1973-1986 mais il faut signaler d'importantes lacunes en 1980– 1983. A noter que cette station a cessé de fonctionner à partir de 1990.

III.4. Etude du régime des débits de l'oued Seklafa :

Situé au Sud-Est d'Aflou, il constitue l'affluent le plus important de l'Oued M'Zi (d'une longueur de 40 kilomètres, il draine un bassin de 775,6 km²). C'est au niveau des grés du Barrémien - Aptien - Albien et des calcaires du Jurassique que jaillissent à débit très faible et variable les sources de l'Oued Morra dont la plus importante est Ain Arar (environ 4 l/s).

- Le débit de l'Oued est contrôlé par une station hydrométrique implantée au niveau de Seklafa, situation qui lui permet de prendre en compte l'ensemble des eaux venant de l'amont.

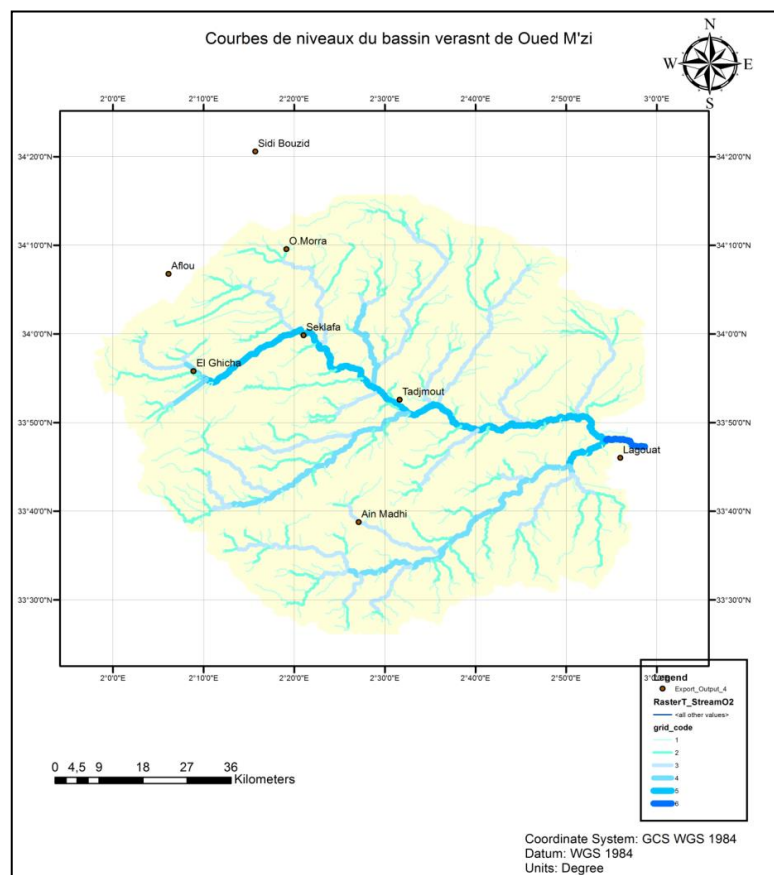


Fig.III.5: Chevelu hydrographique du bassin versant de Oued M'Zi.

Tab.III.2 : Débits moyens mensuels à la station de Seklafa

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Jt	At	Moy
Année													
1971-72	0,014	0,125	0,160	0,199	0,207	0,19	0,159	0,22	0,19	0,189	0,168	0,128	0,162
1972-73	0,132	0,164	0,164	0,187	0,194	0,19	0,192	0,185	0,154	0,177	0,126	0,154	0,168
1973-74	0,177	0,146	0,16	0,18	0,168	0,15	0,224	0,149	0,138	0,236	0,186	0,116	0,169
1974-75	0,156	0,163	0,158	0,162	0,146	0,158	0,124	0,119	0,143	0,135	0,118	0,099	0,14
1975-76	0,94	0,141	0,116	0,131	0,108	0,149	0,176	0,143	0,192	0,141	0,173	0,13	0,212
1976-77	0,165	0,176	0,207	0,153	0,154	0,167	0,153	0,153	0,15	0,138	0,146	0,244	0,167
1977-78	0,14	0,143	0,179	0,237	0,194	0,185	0,215	0,188	0,201	0,154	0,137	0,142	0,176
1978-79	0,197	0,132	0,159	0,194	0,203	1,289	0,184	0,118	0,139	0,123	0,125	0,194	0,254
1979-80	0,153	0,226	0,145	0,137	0,165	0,159	0,161	0,16	0,143	0,16	0,153	0,164	0,169
1983-84	0,74	0,161	0,155	0,152	0,165	0,2	0,742	0,195	0,207	0,15	0,142	0,148	0,263
1984-85	0,18	0,197	0,15	0,171	0,238	0,967	0,193	0,144	0,168	0,181	0,157	0,14	0,24
1985-86	0,185	0,383	0,12	0,116	0,12	0,13	0,13	0,112	0,155	0,096	0,096	0,096	0,29
1986-87	0,095	0,095	0,891	0,096	0,115	0,119	0,232	0,101	0,085	0,091	0,094	0,094	0,176
Moy	0,252	0,181	0,213	0,163	0,167	0,312	0,222	0,153	0,19	0,152	0,145	0,147	0,191

a) **Les débits minima** : Les valeurs minimales s'observent durant la période sèche de Mai jusqu'à octobre avec une valeur minimale de 0,014m³/s en septembre, de novembre à mars les débits croissent pour atteindre 0,124 m³ /s. La moyenne des débits minima est de 0.095 m³/s

Tab.III.3 : Débits moyens mensuels caractéristiques de l'oued Seklafa

	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Jt	At
Min	0.014	0.095	0.116	0.096	0.108	0.119	0.124	0.101	0.085	0.091	0.094	0.094
Moy	0.252	0.181	0.213	0.163	0.167	0.312	0.222	0.153	0.19	0.152	0.145	0.147
Max	0.197	0.383	0.891	0.237	0.238	1.289	0.742	0.22	0.207	0.236	0.186	0.244

b) **Les débits moyens** : La moyenne est de 0,191 m³/s, le maximum apparait en février avec 0,312 m³/s et un maximum secondaire en septembre de 0,252 m³/s, les minima s'observent durant la période sèche il est de 0,145 m³/s en juillet, 0,147 m³/s en aout et 0,152 m³/s en juin.

c) **Les débits maxima :** L'Oued Seklafa présente un maximum en février avec 1,289 m³/s et un maximum secondaire en novembre de 0,891 m³/s. Durant la période sèche le minimum apparaît en juillet avec 0.186 m³/s, et un minimum secondaire en septembre avec 0.197 m³/s.

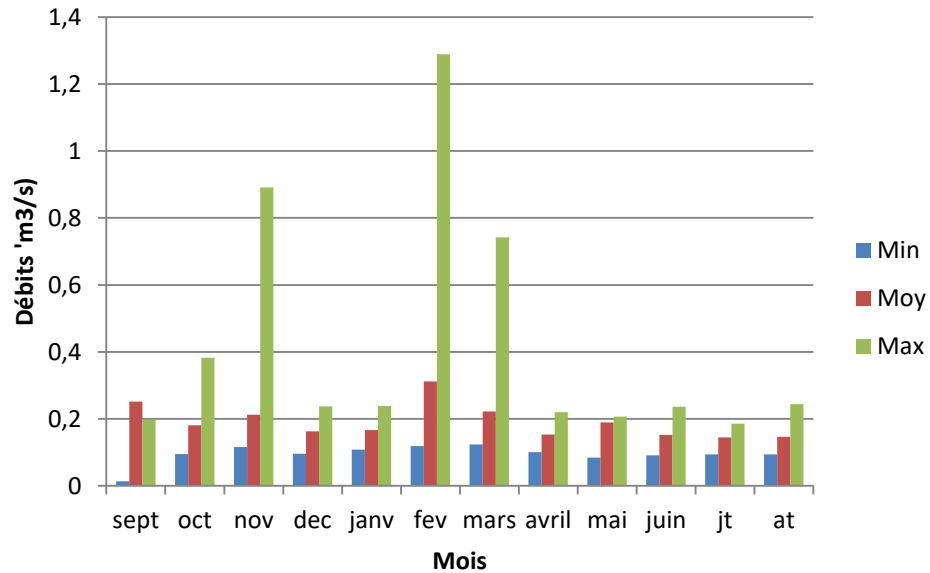


Fig.III.6 : Les débits caractéristiques de l'oued Seklafa (1971-1987)

HYDROGEOLOGIE

IV.1. Introduction

Au Sud des hauts plateaux, l'Atlas Saharien Central (Dj. Amour) constitue une bande de terrains plissés, formant une succession d'anticlinaux et de synclinaux orientés suivant une direction majeure Nord Est – Sud-Ouest.

Au niveau du synclinal d'Aflou affleurent les grès continentaux du Barrémien-Albien, recoupé par sondages sur plusieurs centaines de mètres. La roche est généralement friable avec un ciment calcique. Ces grès sont largement fissurés suivant deux directions majeures d'orientation N 67°E et N 140° E. Plus de 600 puits, dont la profondeur varie de 3 à 867 mètres, sollicitent ces formations. Le centre de ce synclinal est occupé par les formations du Mio-Plio-Quaternaire, formées essentiellement d'argiles rouges, de sables et des conglomérats; l'épaisseur varie de quelques mètres à plus de cinquante mètres au niveau de l'axe de la cuvette.

Les terrains du Crétacé Supérieur (Cénomaniens-Turonien) forment de petits synclinaux perchés: Djebel Guern Arif, Oum El Gueddour, Sidi Okba et Kef Gourou. Les formations cénomaniennes constituées de marnes gypsifères verdâtres, parfois intercalées de bancs de calcaires d'épaisseur métrique, présentant une puissance de 200 à 250 m. Le Turonien est constitué en presque totalité par des calcaires dolomitiques bien cristallisés de couleur blanchâtre. La série d'une puissance de 80 m est azoïque au niveau de ce secteur.

Sous la puissante série gréseuse, se trouvent des calcaires jaunâtres en petits bancs et les marnes vertes gypsifères du Portlandien, l'épaisseur est de 200 m. Le Trias constitué par un mélange d'argiles brunâtres, violines ou versicolores avec des intercalations de gypse, d'halite et présentant des intrusions de roches vertes en dykes ou emballées dans les argiles. Il se localise à l'ouest du synclinal d'Aflou et juste à l'ouest de Kef Gourou.

Toutes les études réalisées jusque-là, aussi bien celles de E. Ritter (1902), A. Cornet (1952), l'hydraulique de Tiaret (1968), Z. Makhloufi (1986), T. Rahmani (1997), l'ANRH (agence nationale des ressources hydriques 1987 -1988) et nous-même (1982 - 2001), ont confirmé la présence d'un aquifère très important dans les formations gréseuses du Continental Intercalaire. L'aquifère est proche de la surface du sol, il se montre très cloisonné par les argiles. Les débits des forages varient de 20 à 60 l/s. L'eau est généralement de bonne qualité et présente un résidu sec qui varie de 1 à plus de 3 g/l.

IV.2. Aquifère Superficiel (Mio-Plio - Quaternaire)

L'aquifère intéresse un ensemble de formations sablo- argileuses attribuées au Mio-Pliocène qui s'étendent au niveau de la dépression d'Aflou, à Oued Morra, Sebgag et Brida. Ces formations, dont les affleurements sont d'extension réduite ne peuvent constituer à elles seules un aquifère important, mais les ressources qu'elles renferment pourraient répondre aux besoins domestiques et agricoles à petite échelle.

La surface du niveau statique de cet aquifère est en communication directe avec le réseau Hydrographique drainant les eaux superficielles.

IV.2. 1. Caractéristiques hydrologiques :

Les seules indications que nous possédions proviennent des travaux effectués par la mission Soviétique de 1967 qui nous donnent :

- Coefficient de vitesse d'infiltration : 0,1 à 0,5 m / j
- Coefficient de cohésion : 0,01 kg / cm²
- Porosité totale : 50 %

Les méthodes de détermination de ces paramètres ne sont pas indiquées.

Une série de sondages de reconnaissance effectués à la tarière a permis de mettre en évidence la présence d'une nappe semi – captive, l'eau remontant de 0m 25 cm dans le trou de la sonde.

Les différents forages effectués dans la région d'Aflou pour capter la nappe des grès ont montré que l'aquifère du Mio - Pliocène n'avait qu'une extension très limitée, il est séparé de l'aquifère des grès Barrémien, Aptien, Albien par des argiles rougeâtres, qui limitent tous transferts de débit entre les deux formations.

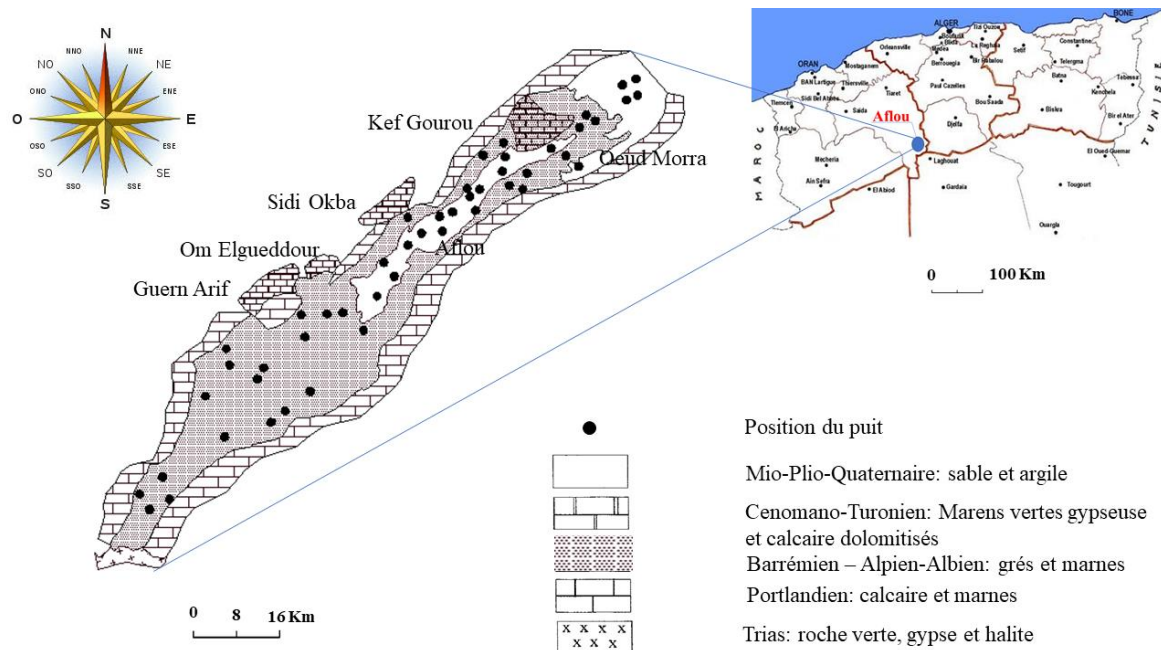


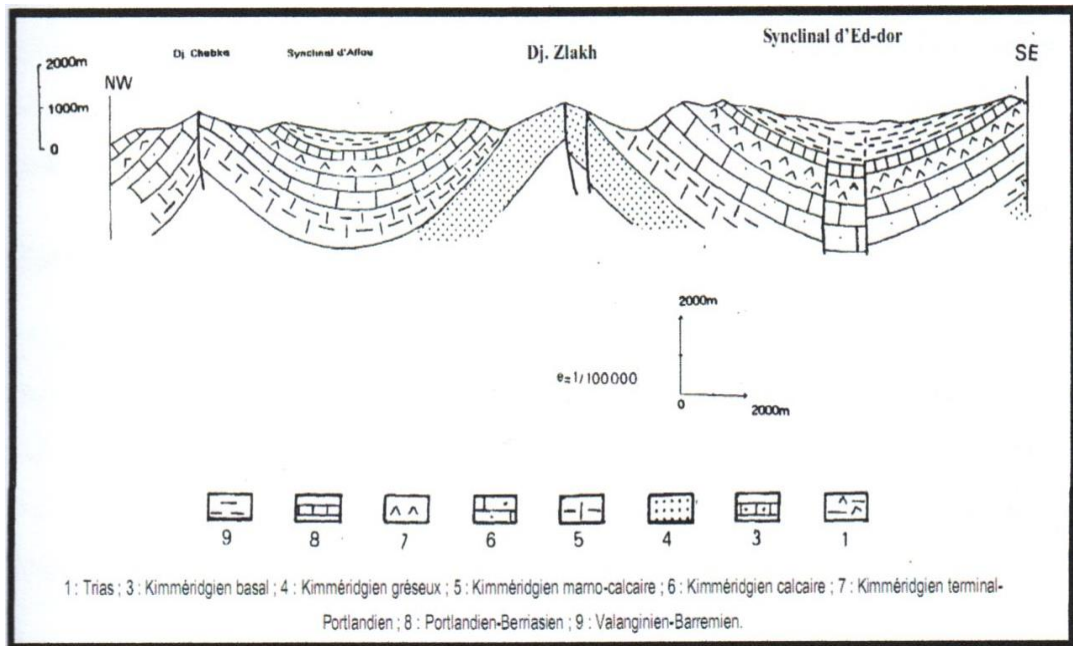
Fig.IV.1: Carte géologique simplifiée de la région d'Aflou et localisation des points de prélèvement

IV.3. L'aquifère du turonien :

La nappe est installée dans le réseau de fissures qui affecte les calcaires dolomitiques. L'étude des Djebels Guern Arif, Oum El- Gueddour, Sidi Okba et Kef Gourou a montré un karst superficiel caractérisé par la présence de fissures dont l'ouverture varie de 1mm à 20 mm et présentant une orientation préférentielle N 130° E.

Le karst profond ne nous est pas connu, seules les émergences d'Oum El - Gueddour (sur le flan Est), d'Ain Haimeur (Au Nord de Guern Arif) et de Sidi Okba qui se situent au contact des calcaires et les marnes Cénomaniennes permettent de présumer de son existence.

Ces sources sont pérennes, les débits sont faibles : ils ne semblent pas dépasser 3l/s.



**Fig.IV.2: Coupe sériée à travers les structures du Djebel Amour
(Nouar, 1992)**

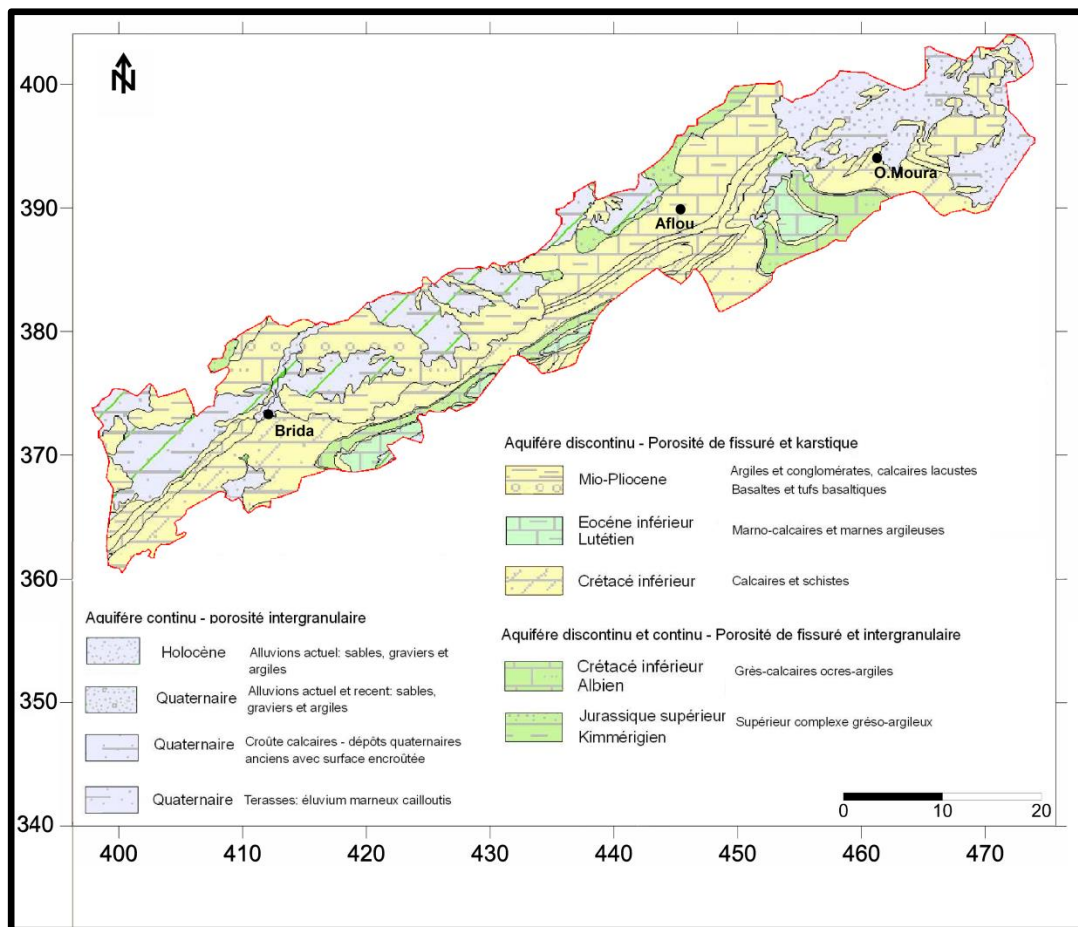


Fig.IV.3 : Carte hydrogéologique de la zone d'étude (synclinale d'Aflou), Extrait et modifié de la carte hydrogéologique générale 1/200000 (ANRH/ 2008).

IV.3. L'Aquifère du Barrémien, Aptien, Albien :

IV.3. 1. La cuvette d'Aflou :

C'est une cuvette avec une largeur pouvant dépasser 10 km pour une longueur supérieure à 80km (cuvette d'Aflou), les axes sont orientés NE – SW, les couches sont subhorizontales ou présentent un faible pendage, c'est cette cuvette qui constitue l'aquifère le plus important de la région.

C'est un aquifère multicouche avec un système supérieur libre et un système inférieur captif à perméabilité mixte, où la fissuration joue un rôle important dans la circulation des eaux. L'épaisseur de cette formation dépasse les 1000 m.

Cette aquifère comporte un niveau superficiel qui, lorsque les conditions structurales s'y prêtent, dessert par place une série d'émergences. Leur débit varie de 1 l/s à plus de 30 l/s (Ain Assoul à Sebgag).

IV.3. 1. Les sources :

a) Les sources de Sebgag :

La position de ces émergences paraît étroitement liée à la structure tectonique complexe limitant localement le versant Nord du synclinal, notamment la présence d'un accident majeur de direction SW-NE accompagné de pointements de roches éruptives vertes, de failles et de décrochements transverses.

Les relations entre la position des sources et de structure géologique de la région de Sebgag ont été approfondies, afin de caractériser les conditions d'émergence. Notre inventaire nous a ainsi permis de reconnaître :

- Sur l'Oued Gharbi 23 sources : dont le débit varie de 5l/s à 30l/s (Ain Assoul)
- Sur l'Oued Tinesli : 10 sources dont le débit varie de 3l/s à plus 20l/s (Ain Tinesli)
- Sur l'Oued Nagli : 8 sources dont le débit varie 1l/s à 5l/s

Le débit de l'ensemble de ces sources varie de 80l/s à l'étiage à plus 200l/s en période humide.

Conditions d'émergences :

La direction des oueds coïncide avec celle des fissures des séries gréseuses (N 140E), on peut penser que ces fissures sont associées à des failles de même direction et qui ont imposé ou tout au moins facilité la mise en place du réseau drainant aérien.

L'écoulement des eaux souterraines se fait du Nord vers le Sud suivant le pendage imposé à la formation gréseuse par basculement de la série entre l'Oued Nagli et l'Oued El Gharbi.

L'approfondissement du lit des oueds ayant entraîné le recoupement de niveau aquifère, des émergences se sont mises en place sur des positions liées aux conditions structurales des niveaux Barrémien, Aptien, Albien.

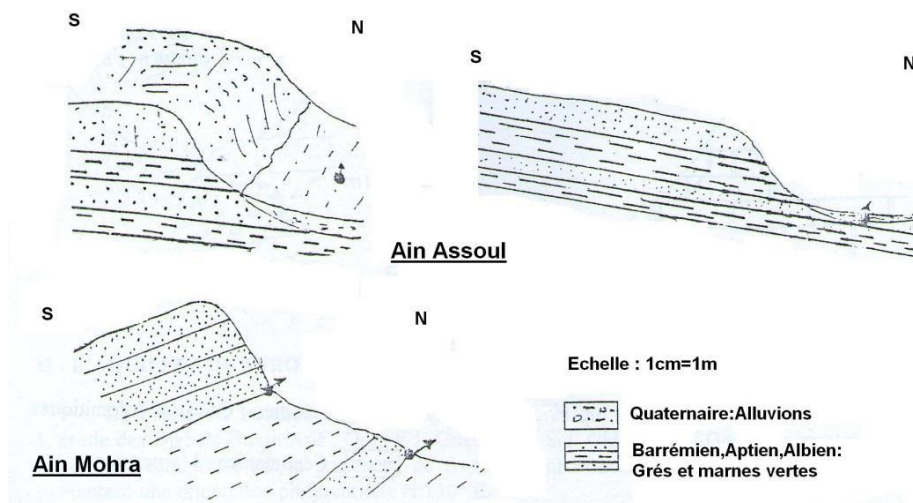


Fig.IV.4: Les sources de Sebgag (D'après Stamboul M)

b) les sources d'Oued Morra :

On note l'existence de plusieurs sources au niveau de la dépression de l'Oued Morra, notre inventaire nous a permis de reconnaître huit sources dont les conditions d'émergence sont les mêmes, la plus importante est celle de Ain Arar. Le débit varie de 1l/s à Gueltat Baida à 5 l/s à Ain Arar.

Conditions d'émergences :

Ce sont des sources de débordement, l'eau des grès Barrémien piégée entre les marnes émerge dans le sens inverse du pendage imposé à ces formations.

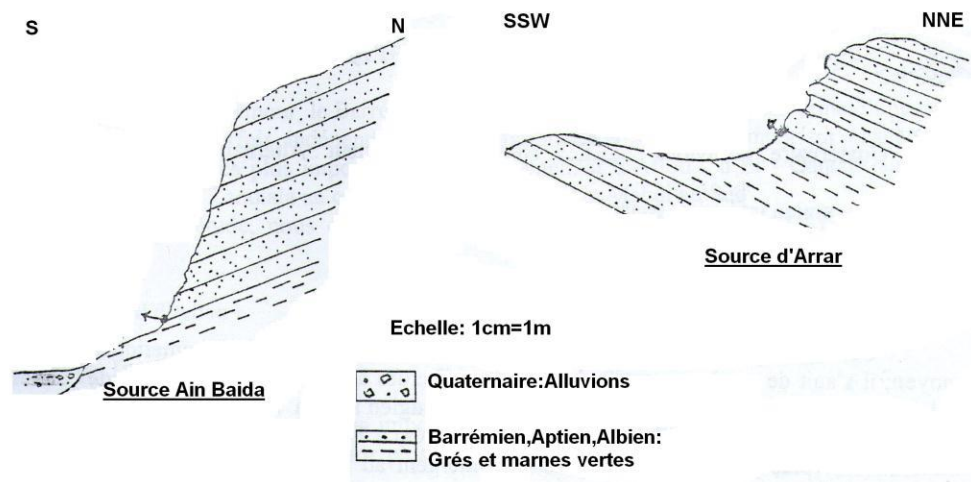


Fig.IV.5 : Les sources de l'Oued Morra (D'après Stamboul M)

c) Les sources d'Aflou :

Ce sont des sources de déversement dont la plus importante est celle d'Ain Mansour qui présente un débit de 6 l/s, elle émerge au contact des grès et des marnes de l'Albien.

IV.3. 2. Les forages :

a) Le forage d'Aflou :

C'est un forage de reconnaissance profond de 867 m réalisé sur le flanc Sud du synclinal à 400 m de l'axe de la cuvette d'Aflou. Ce forage a été implanté pour permettre d'atteindre une meilleure connaissance des différents aquifères du complexe gréseux du Barrémien, Aptien, Albien.

A notre avis ce forage ne capte que les aquifères du Barrémien, il est décalé des formations de l'Aptien et de l'Albien affleurant vers le Nord juste au pied du versant Sud du Kef Gourou et la limite entre l'Aptien et le Barrémien longe la route Aflou – Laghouat (Limite très visible au niveau de l'embranchement vers Oued - Morra).

- Diagraphie : Une étude par diagraphie électrique a été réalisée au niveau de ce forage.

• Rappel de la méthode d'Archie :

Considérons un terrain dépourvu d'argile de porosité ϕ et saturé d'eau qui présente seule une conductibilité ionique. Si on fait circuler un courant électrique, les lignes de courant suivront les cheminements existants à travers les pores remplis d'eau.

On aura approximativement :

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{is}} + \frac{1}{R_w} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} R_t : \text{Résistance de la roche saturée.} \\ R_{is} : \text{Résistance des minéraux.} \\ R_w : \text{Résistance de l'eau.} \end{array}$$

Or nous savons que la résistance des minéraux est très élevée, cela revient à dire que $1/R_{is}$ tend vers zéro et $1/R_t = 1/R_w$.

Il s'ensuit par simple déduction que ρ_t (Résistivité de la roche saturée) et ρ_w (Résistivité de l'eau saturant la roche) sont reliées par un facteur noté F dit facteur de formation dépendant de la taille des grains d'où l'expression :

$$\rho_t = F \cdot \rho_w$$

Dans le cas des formations saturées en eau

$$F = a / \phi^m$$

Où a et m sont des coefficients dépendant de la lithologie qui varie de 0,6 à 2.

m : facteur de cimentation.

Cette équation se simplifie avec une bonne approximation en prenant a = 1 et m = 2 et on aura

$$\text{alors : } \phi = (\rho_w / \rho_t)^{1/2}$$

Résultats : Au niveau du forage 12 aquifères superposés ont pu être différenciés :

Tab.IV.1 : Diagraphie électrique

	Cote (m)	ϕ	F (0,62/ $\phi^{2,15}$)	Rw ($\Omega.m$)
1	384-393	pas de mesure	-	-
2	414-425	0,39	4,69	7,25
3	432-465	pas de mesure	-	-
4	470-500	0,44	3,60	6,66
5	502-529	0,38	4,92	6,91
6	530-618	0,38	4,92	7,11
7	624-629	0,272	10,16	5,61
8	635-744	0,38	4,92	7,92
9	748-763	0,36	5,34	7,30
10	770-810	0,33	6,88	6,97
11	812-829	0,32	6,96	6,97
12	832-850	0,33	6,88	7,04

La porosité varie de 0,272 à 0,44, elle est en moyenne de 38%, mais elle a tendance à diminuer en profondeur.

La qualité de l'eau est potable à médiocre, mauvaise pour le septième aquifère.

IV.3. 3.Caractéristiques hydrodynamiques :

Les pompages d'essai réalisés sur les ouvrages implantés pour l'alimentation en eau potable nous ont montré que nous avons affaire à un milieu transmissif, touchant dans la majorité des cas des aquifères libres à semi captifs et disposant de ressources raisonnables.

a) Pompage d'essai forage AF III :

Un pompage à débit constant (20l/s) a été exécuté pendant 12 heures sur le forage AF III à l'aide d'une pompe immergée pour une hauteur manométrique de 150 mètres.

La remontée des niveaux doit être observée pendant une durée telle que le niveau statique soit atteint. L'exécution et l'interprétation des données mesurées, rabattement et temps, reposent sur l'emploi des expressions d'hydrodynamique en régime transitoire, le pompage d'essai a pour but principal de calculer les paramètres hydrodynamiques : la transmissivité « T », le coefficient d'emmagasinement « S » sous réserve qu'il existe un ou plusieurs piézomètres de référence et la perméabilité « K ».

- Caractéristiques de l'ouvrage :

160 m pour la colonne d'exploitation établie en 13'' 3/8 (340 mm).

140 m pour la colonne de captage qui comporte des crépines de 9'' 5/8 (240 mm) à nervures repoussées de 2 mm.

Un massif de graviers a été établi avec des éléments de 2 à 3 mm de diamètre. Le développement a été effectué par air lift à débit variable. Le pompage a été poursuivi pendant 80 heures jusqu'à clarification des eaux

Résultats obtenus :

Quel que soit la méthode utilisée, nous avons obtenus donc pour la transmissivité des valeurs proches les unes des autres que nous pouvons résumer dans le tableau suivant :

0,675 x 10⁻³ m² / s Logan.

0.546 x 10⁻³ m² / s Theis et Jacob.

0,550 x 10⁻³ m² / s Jacob.

IV.4. Piézométrie

L'écoulement souterrain se fait en général suivant une direction SW - NE avec des variations du niveau piézométrique allant de 1440 m à 1320 m. On peut distinguer dans cet ensemble un minimum de sept unités hydrogéologiques (Fig. IV. 6).

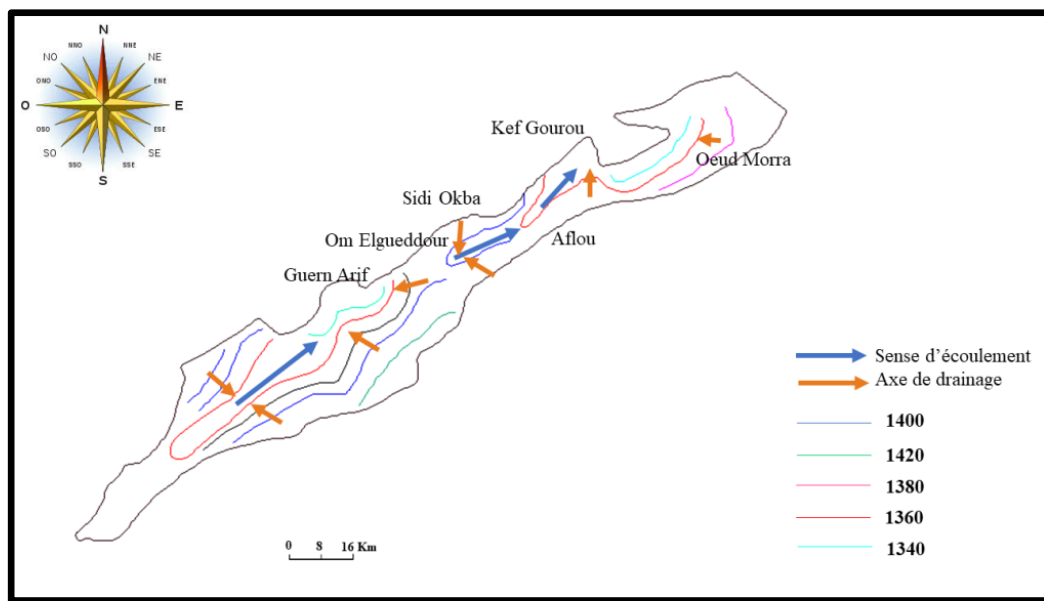


Fig. IV. 6 : Carte piézométrique de la région d'étude (2015).

Ces sept unités hydrogéologiques d'Ouest en Est sont :

- **L'unité de Tamaleket (A) :**

Avec existence d'une crête piézométrique qui coïncide avec la remontée du mur de l'aquifère du Barrémien, Aptien, Albien (voir carte du mur de l'aquifère du Barrémien, Aptien, Albien) à partir de cette crête les eaux souterraines se partagent en 3 sous bassins:

A Tamaleket on observe un écoulement du Sud vers le Nord avec des variations du niveau piézométrique de 1430 m à 1380 m - 1390 m sur les points d'émergence des sources. Le gradient hydraulique décroît dans le même sens de 0,008 à 0,004, cette amélioration est due à la présence de formations alluviales vers l'aval.

- **L'unité de Sebgag (B) :**

C'est la plus importante de la cuvette d'Aflou, la carte piézométrique montre un écoulement souterrain suivant une direction Sud - Nord avec des variations du niveau piézométrique de 1440 m au Sud et 1320 m vers le Nord où émergent les sources les plus importantes de la région, le gradient hydraulique décroît dans le même sens de 0,013 à 0,0066, ceci est dû d'une part au dépôt des alluvions au niveau de la dépression de Sebgag d'autre part au pendage des couches gréseuses qui est très faibles à cet endroit et ne dépasse pas les 10%. Cette unité coïncide avec le synclinal du Barrémien, Aptien, Albien.

- **L'unité d'El Haoudh (C) :**

L'écoulement général présente une direction du Sud vers le Nord avec des variations du niveau piézométrique de 1430 m - 1435 m à 1400 m au Nord et un gradient hydraulique de 0,02 à l'Est et 0,0044 vers le milieu et le Nord ceci traduit l'amélioration de la perméabilité (dépôts alluviaux), cette unité coïncide avec l'axe du synclinal gréseux (Barrémien – Aptien - Albien).

- **L'unité d'Aflou (D):**

L'écoulement converge de l'Ouest et de l'Est vers le centre pour prendre ensuite une direction Nord - Sud. Les isopièzes décroissent de 1435 m à moins de 1410 m au Nord. Le gradient hydraulique qui est de 0,008 au niveau des lignes de partage des eaux à l'Est et à l'Ouest prend une valeur de 0,003 Au Nord.

- **L'unité d'Ain Mansour (E) :**

D'une direction générale Sud - Nord avec des convergences en provenance de l'Est et de l'Ouest; les isopièzes décroissent de 1440 m à l'Est et l'Ouest et de 1480 m au Sud à 1360 m vers le Nord. Le gradient hydraulique décroît dans le même sens, sa plus haute valeur se localise au Sud: 0,08, à l'Est et l'Ouest varie entre 0,02 et 0,04; vers le Nord il prend une valeur de 0,002. Ces variations sont liées à la présence de dépôts alluviaux et au pendage faible des couches gréseuses au Nord. Cette unité coïncide avec l'axe du synclinal gréseux du Barrémien, Aptien, Albien.

- **L'unité de Kef Gourou (F) :**

En raison de la présence d'une crête piézométrique (due à la remonté du Trias); les eaux souterraines ont un écoulement convergeant vers le NE avec des variations de niveau de 1460 m au Sud à 1320 m au Nord Est; le gradient hydraulique est de: (0,0066 à l'Est à 0,02 au Sud), et (0,015 à l'Ouest à 0,005 au Sud).

C'est au Sud et au niveau de la Daiet El Malha que les dépôts alluvionnaires sont les plus importants.

- **L'unité Oued Morra (G) :**

L'écoulement se fait vers le Sud Est avec des variations piézométriques de 1420 m à 1250 m. Le gradient hydraulique décroît dans le même sens de 0,04 à 0,01.

HYDROCHIMIE

V.1. Introduction

L'hydrochimie constitue un moyen d'investigation privilégié intervenant aussi bien dans l'identification des aquifères que dans la compréhension des règles régissant l'écoulement des eaux dans les nappes souterraines. Cent soixante-onze prélèvements ont été effectués. La grande majorité concerne l'aquifère du Barrémien-Albien au niveau de la cuvette d'Aflou. Partant de ces données et en nous fondant sur une analyse statistique sur la teneur des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-), nous avons cherché à établir les liens entre les eaux et les aquifères assurant leur conservation ou leur cheminement.

V.2 Echantillonnage et analyse hydrochimique:

Le chimisme des eaux souterraines dépend, principalement, de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-). Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface

Nous avons effectué une campagne de prélèvement d'eau en Octobre 2014, où on a sélectionné lors de l'inventaire cent soixante-onze points d'eau basant sur leur répartition spatiale dans le synclinale d'Aflou (Fig.V.1). On note aussi l'utilisation des résultats d'analyse des années précédentes.

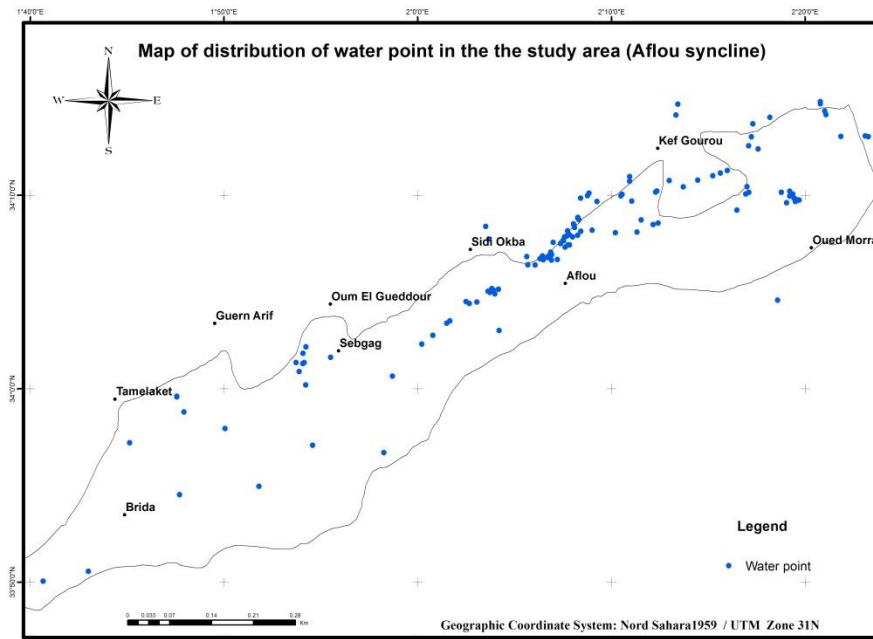


Fig.V.1 : Carte d'inventaire des points d'eau échantillonnés (Synclinal d'Aflou)

V.2.1 Méthodes d'analyses :

V.2.1.1 Mesures in situ :

Les mesures de température, conductivité électrique, et de pH ont été mesurés in situ, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'un pH mètre et un conductimètre de terrain.

V.2.1.2 Analyses aux laboratoires :

Les analyses d'eau ont été effectuées au laboratoire de l'Agence National des Ressources Hydraulique (ANRH) et le laboratoire de l'ADE. Elles ont porté sur les éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-).

Les méthodes utilisées sont : la méthode volumétrique pour les éléments (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^-), et la méthode de spectrophotométrie d'absorption atomique pour les éléments (Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^-). La méthode de la Balance Ionique est utilisée est pour analyser la fiabilité des résultats d'analyse, on a procédé à l'application de la méthode de la balance ionique et une erreur de 10 % a été acceptée.

V.3 Etude des paramètres physico-chimiques :

Le récapitulatif de la variation des caractéristiques statistiques des paramètres physico-chimiques des eaux de l'aquifère du Barrémien-Albien du synclinal d'Aflou sont donnés sur le tableau suivant.

Tab.V.1 : Variation des paramètres chimiques des eaux souterraines du synclinal d'Aflou.

Paramètres (mg / l)	T (°C)	pH	EC (μ S /cm)	Ca ⁺² (mg / l)	Mg ⁺² (mg / l)	Na ⁺ (mg / l)	K ⁺ (mg / l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻² (mg / l)	Cl ⁻ (mg / l)	NO ₃ ⁻ (mg / l)
Max	20	8.2	2700	680	256	340	29	827	2090	795	485
Min	15.1	7.4	400	40	6	5	0	60	0	10	0
Moyenne	17.3	7.9	1655	145.09	60.97	66.51	5.51	241.11	329.81	132.27	47.54
SD	1.13	0,20	927.2	91.42	46.25	61.18	4.33	94.04	327.30	124.45	59.28
CV %	6.46	2.67	58.78	62.72	65.98	91.94	78.39	39.02	99.13	94.23	117.90
Norme OMS (2004)		6.5-8.5	2000	200	150	200	12		250	250	50

Note: CV: coefficient de variation; SD: écart type

V.4. Cartographie hydrochimique :

L'étude de la répartition spatiale des faciès chimique constitue un outil très appréciable dans la vision de l'évolution spatiale d'un constituant chimique quelconque. Plusieurs outils informatiques et logiciels ont été utilisés. Le logiciel diagrammes a été utilisé pour tracer le diagramme de Piper et Schöeller Berkaloff. Le programme Phreeq-C a été utilisé pour déterminer un indice de saturation de certains minéraux spécifiques. Le logiciel de cartographie ArcGIS a été utilisé pour l'établissement des cartes d'isoteneurs (Ca⁺⁺, Na⁺, SO₄⁻, et HCO₃⁻).

V.4.1. Conductivité:

La conductivité électrique est comprise entre $8\mu\text{S} / \text{cm}$ et $48 \mu\text{S} / \text{cm}$. D'une manière très générale la conductivité a tendance d'augmenter d'ouest vers l'est liée certainement à la présence du trias à proximité de Kef Gourou (Daïia El Malha) et à la présence d'évaporites surtout le gypse au niveau des formations aptiennes qui longent pratiquement le sud de la route nationale N°23 de Kef Gourou sur plusieurs kilomètres en se dirigeant vers l'est. (Fig.V.2)

Nous constatons que les fortes valeurs se situent soit :

Dans les régions à vocation agricole (utilisation d'engrais) et pompage intense, d'où une dissolution importante des évaporites englobées dans les marnes du Mio-Pliocène et du Barrémien — Aptien — Albien (La cuvette d'Aflou).

Au rejet d'eaux résiduaires et à leur utilisation pour l'irrigation (à l'est d'Aflou).

A l'influence directe de la lithologie et surtout des formations évaporitiques du Trias (Kef Gourou).

A la tectonique, les maximums coïncident avec des failles (entre Sebgag et Aflou) ce qui nous permet d'admettre l'arrivée d'eau minéralisée en provenance des nappes sous-jacentes.

Au sens d'écoulement, qui entraîne un enrichissement en éléments chimiques.

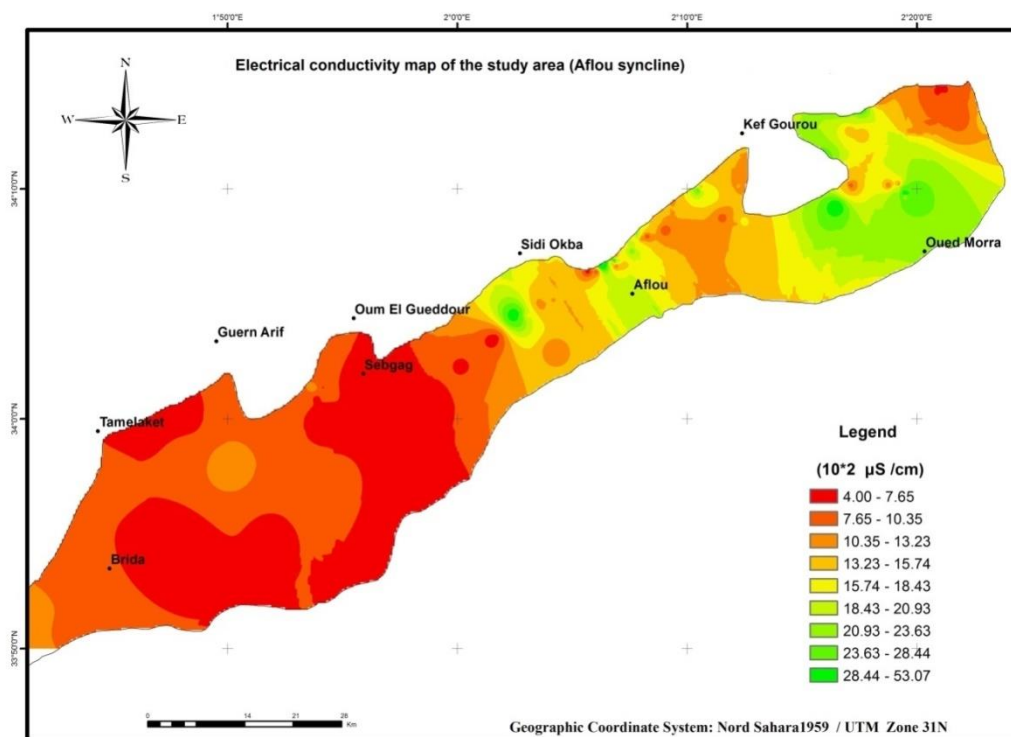


Fig.V.2 : Carte de la conductivité électrique du synclinal d'Aflou

V.4.2. Les cartes d'isoteneurs (Ca^{++} , Na^+ , SO_4^{--} , et HCO_3^{--})

Les cartes montrent une évolution identique à celle de la conductivité. On peut distinguer une zonalité forte caractérisée par trois plages situées respectivement d'ouest en est: Le sud de Sidi Okba, Aflou et Kef Gourou. Ces fortes concentrations s'expliqueraient par:

L'existence d'évaporites englobant à la fois des niveaux gypsifères et des intercalations salifères dans les formations triasiques situées à l'extrémité est du synclinal d'Aflou (Daia El Malha: Plaine salée), à cet endroit les courbes se ferment autour d'un maximum.

Au niveau d'Aflou des maximums de moindre importance apparaissent; liés à l'existence d'évaporites présentes dans le Mio-Pliocène ou dans les marnes du Barrémien — Aptien - Albien.

- Le sud de Sidi Okba les fortes teneurs sont dues à la dissolution des niveaux évaporitiques du Mio-Pliocène. Les courbes d'iso-teneurs se ferment autour d'un maximum qui coïncide avec une ligne de partage des eaux, et la concentration diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de cette ligne traduisant un mélange avec des eaux moins minéralisées. Vers l'ouest de la cuvette d'Aflou, les fortes teneurs en Na^+ , Cl^- et SO_4^{--} sont liées à la présence d'halite et de gypse dans les formations triasiques.

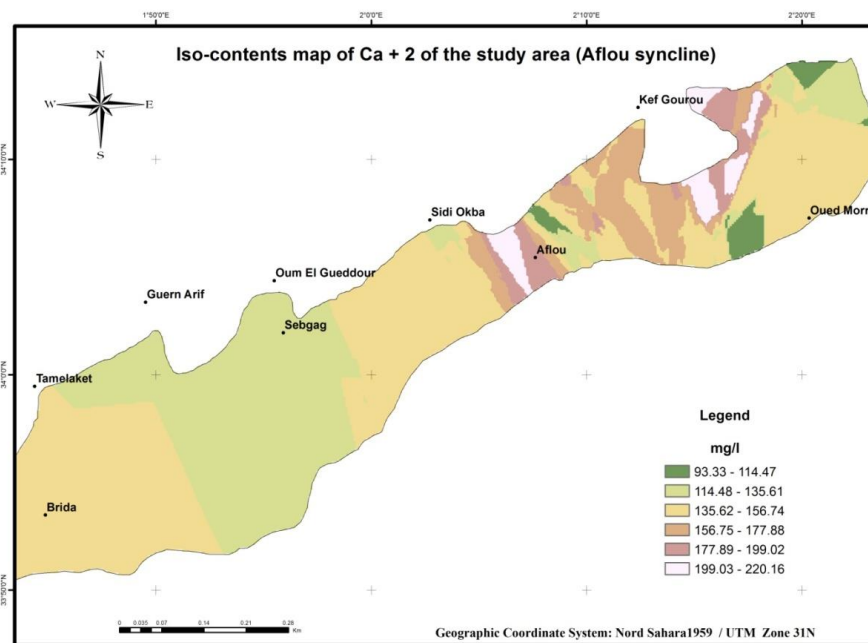


Fig.V.3 : Carte d'isoteneurs en Ca^{+2} du synclinal d'Aflou

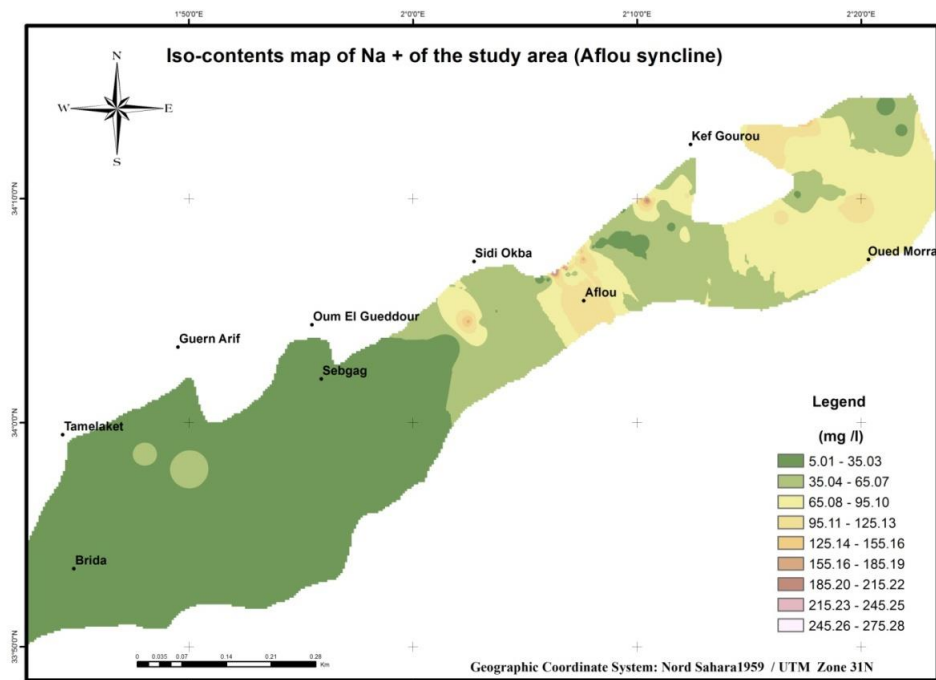


Fig.V.4: Carte d'isoteneurs en Na⁺ du synclinal d'Aflou

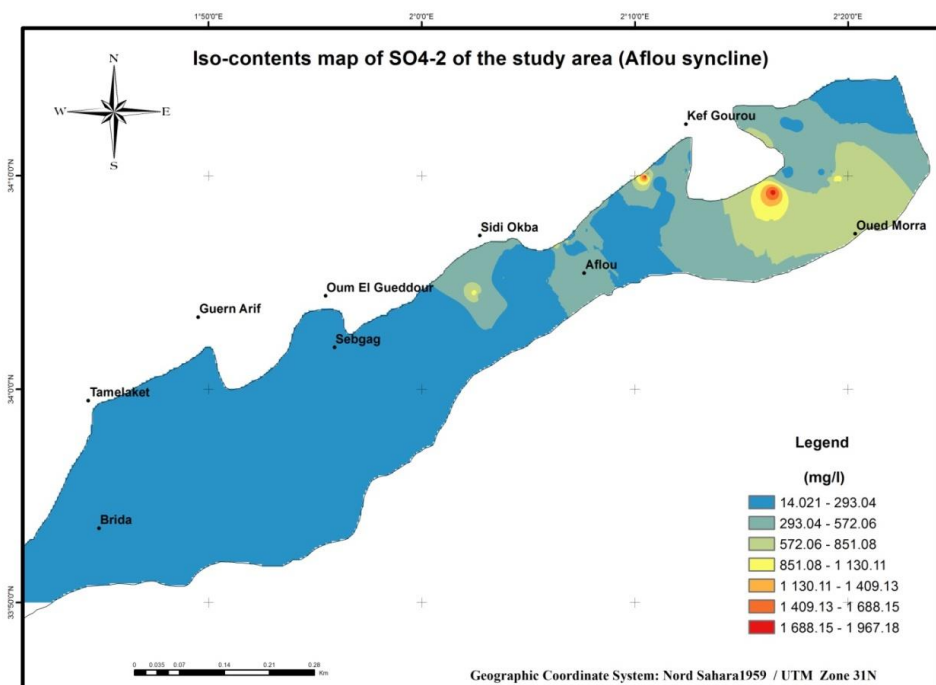


Fig.V.5: Carte d'isoteneurs en SO₄⁻² du synclinal d'Aflou

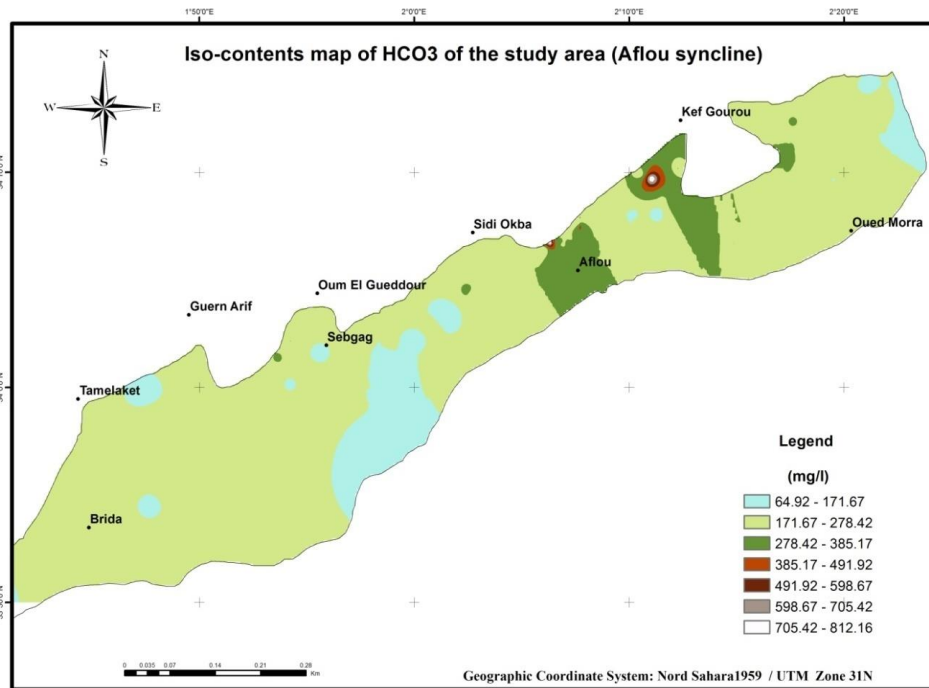


Fig.V.6 : Carte d'isoteneurs en HCO_3^- du synclinal d'Aflou

V.5. Classification des eaux

V.5.1. Familles d'eau et formules caractéristiques :

V.5.1.1. Faciès chimiques d'après " Schoeller – Berkaloff " :

Le report des valeurs sur des diagrammes de SchoellerBerkaloff nous permet de caractériser un certain nombre de faciès chimiques.

Type I Sulfaté, calcique : 68 échantillons 39,76 % subdivisé en trois sous - types :

- Sulfaté, Chloruré, Bicarbonaté avec : $\text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{Na}^+$.

40 échantillons : 23,4 %

- Sulfaté, Bicarbonaté, Chloruré avec : $\text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{Na}^+$.

24 échantillons : 14 %

- Sulfaté, Chloruré, Bicarbonaté avec : $\text{Ca}^{++} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{++}$.

4 échantillons : 2,34 %

Type II Bicarbonaté, calcique : 66 échantillons 38,60 % subdivisé en trois sous - types :

- Bicarbonaté, Sulfaté, Chloruré avec : $Ca^{++} > Mg^{++} > Na^{+}$.

56 échantillons : 32,74 %

- Bicarbonaté, Chloruré, Sulfaté avec : $Ca^{++} > Mg^{++} > Na^{+}$.

6 échantillons : 3,51 %

- Bicarbonaté, Sulfaté, Chloruré avec : $Ca^{++} > Na^{+} > Mg^{++}$.

4 échantillons : 2,35 %

Type III Sulfaté, Magnésien : 19 échantillons 11,11 % subdivisé en trois sous - types :

- Sulfaté, Chloruré, Bicarbonaté avec : $Mg^{++} > Ca^{++} > Na^{+}$.

11 échantillons : 6,43 %

- Sulfaté, Bicarbonaté, Chloruré avec : $Mg^{++} > Ca^{++} > Na^{+}$.

7 échantillons : 4,09 %

- Sulfaté, Chloruré, Bicarbonaté avec : $Mg^{++} > Na^{+} > Ca^{++}$.

1 échantillon : 0,60 %

V.5.2. Répartition des types d'eau et importance hydrogéologique

Les eaux analysées les plus représentatives sont de deux types:

- Bicarbonate, sulfate, chlorure avec $Ca > Mg > Na$ (II).
- Sulfaté, chloruré, bicarbonaté avec $Ca > Mg > Na$ (I).

- A l'Ouest d'Aflou:

Les eaux sont généralement de type II. Le caractère bicarbonaté est dû à la mise en solution de la matrice calcaire des grès du Barrémien, Aptien, Albien. Les affleurements du Mio — Plio — Quaternaire sont relativement réduits, de ce fait ils interviennent assez peu sur le chimisme des eaux. Les sulfates proviennent de la mise en solution des gypses des formations du Trias et ceux contenus dans les marnes intercalées dans les bancs de grès.

- A l'Est d'Aflou :

Les eaux sont caractérisées par le faciès de type I. L'origine des sulfates est dû à la présence des formations évaporitiques de l'Aptien et du Trias.

- A Aflou :

On retrouve les deux types (I et II) mais avec prédominance du faciès type II qui caractérise généralement les grès du Barrémien Aptien, Albien.

Les sulfates et le calcium proviennent de la dissolution des niveaux gypsifères du Moi-Plio-Quaternaire d'une part et d'une réalimentation par les eaux de ruissellement chargées en gypse provenant des niveaux évaporitiques des formations marneuses du Portlandien inférieur.

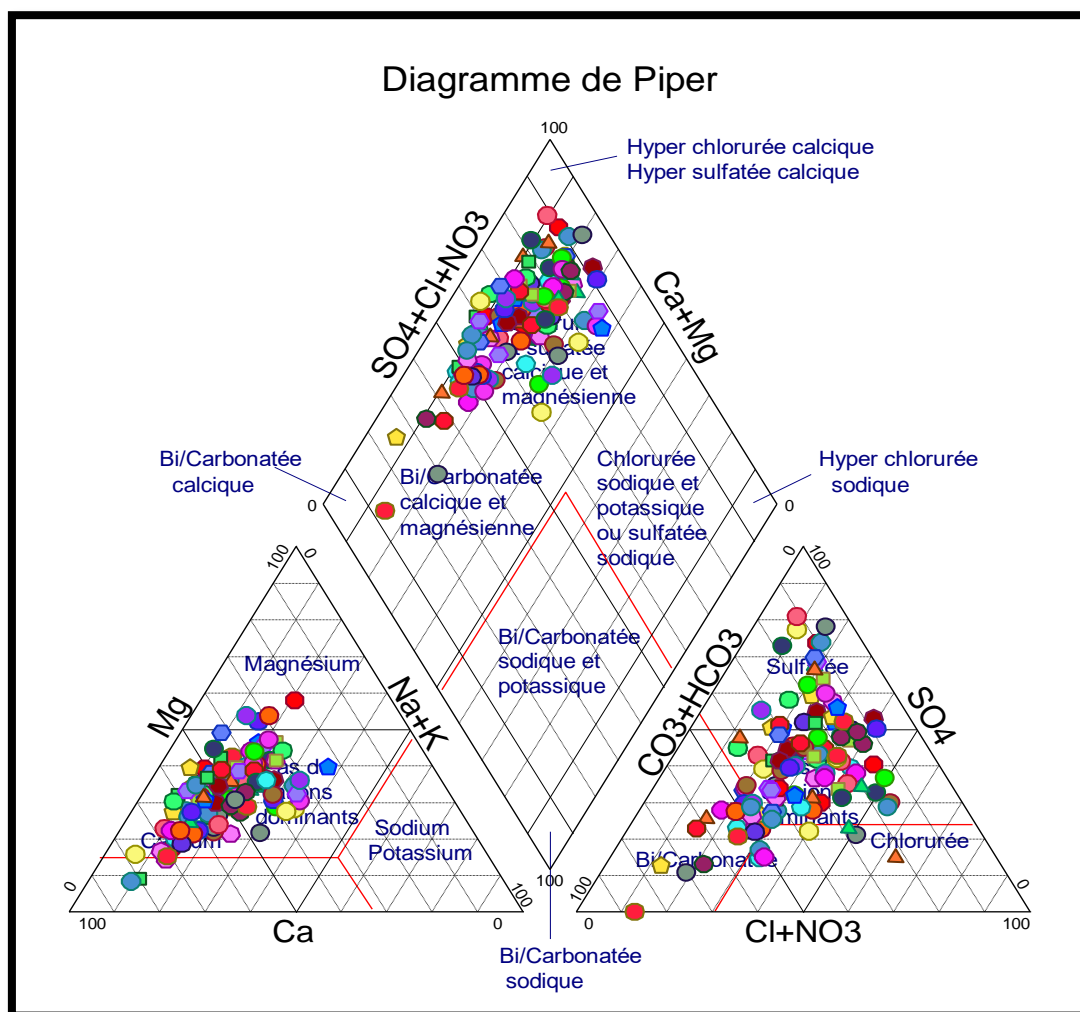
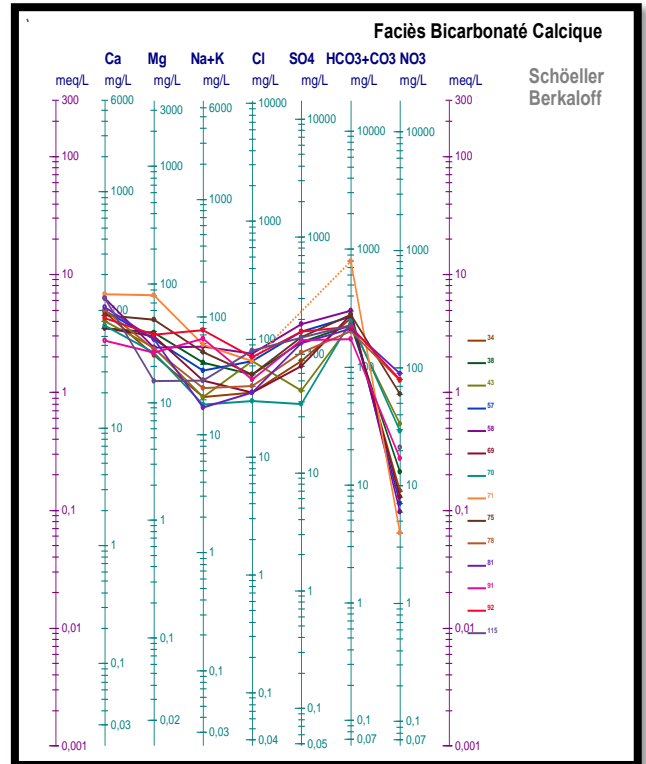
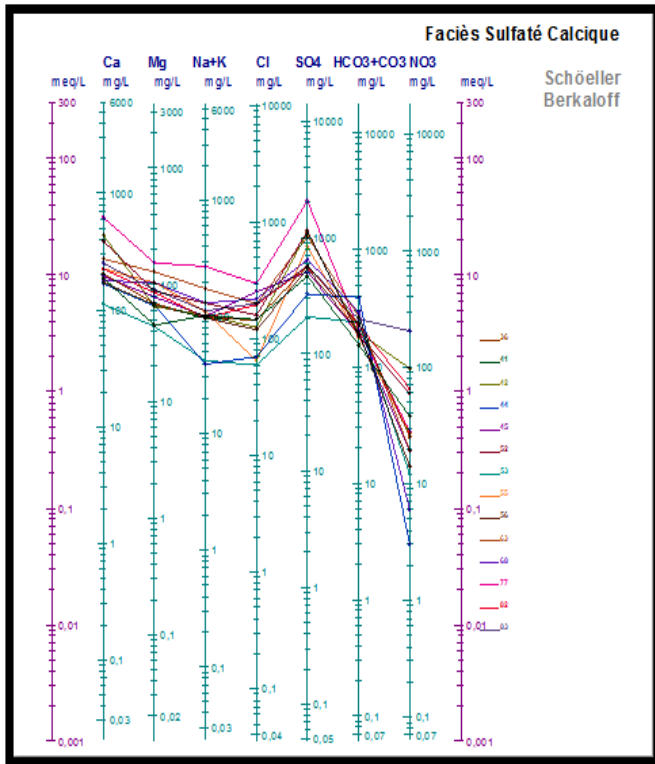
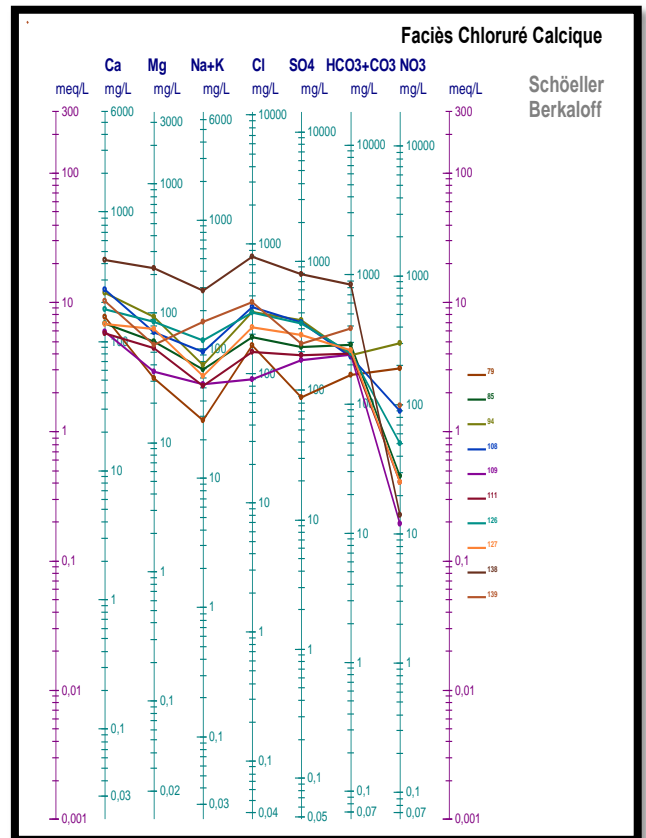
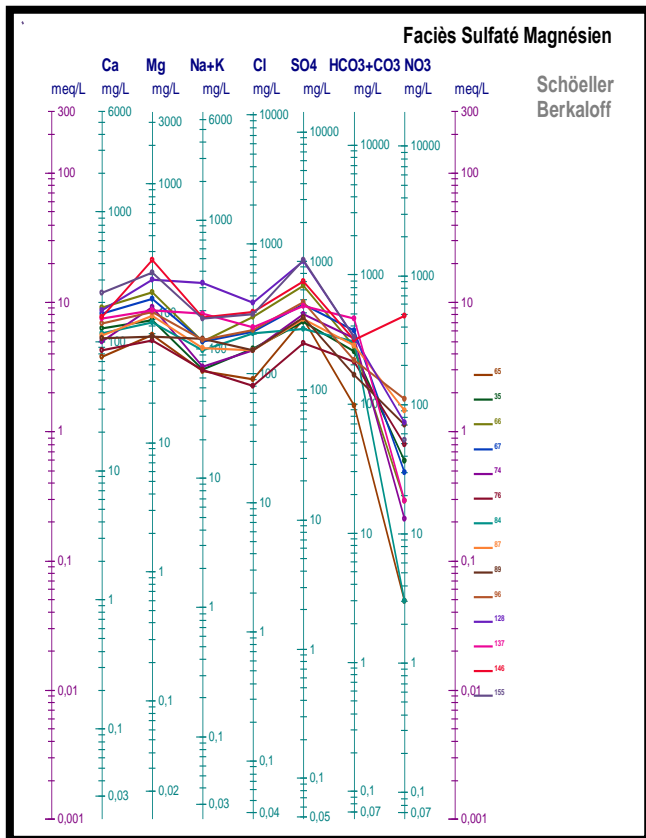


Fig.V.7 : Représentation graphique des analyses d'eau du synclinal d'Aflou à l'aide du diagramme de Piper

La présentation des analyses chimiques sur ce type de diagramme (Fig.V.7) permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux souterraines. Les anions les plus



dominants sont les sulfates et les



bicarbonates ainsi les cations sont le calcium et le magnésium ce qui donne des types sulfatés calcique et magnésium aux eaux du synclinal d'Aflou.

Fig.V.8 : Représentation graphique des analyses d'eau du synclinal d'Aflou à l'aide du diagramme de Schoeller -Berkaloff

À partir de la représentation graphique des faciès chimiques par les diagrammes de Piper et celui de Schoeller-Berkaloff, on a constaté la dominance d'un faciès : sulfaté calcique avec :



Tab.V.1 : Moyenne des ions majeurs en méq/l.

Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^{+1}	K^{+1}	HCO_3^{-1}	Cl^{-1}	SO_4^{-2}
7,20	5,01	2,89	0,14	3,96	3,71	6,80

La prédominance des anions SO_4^{-2} vis-à-vis de HCO_3^{-} et Cl^{-} , ainsi que l'abondance des cations Ca^{+2} et Mg^{+2} , nous permettent d'établir des diagrammes binaires par les rapports caractéristiques : Mg/Ca versus Cl/SO_4 puis Mg/Ca versus HCO_3/Cl et Mg/Ca versus HCO_3/SO_4 pour expliquer l'évolution des faciès géochimiques rencontrés dans les diagrammes de Piper et celui de Schoeller-Berkaloff.

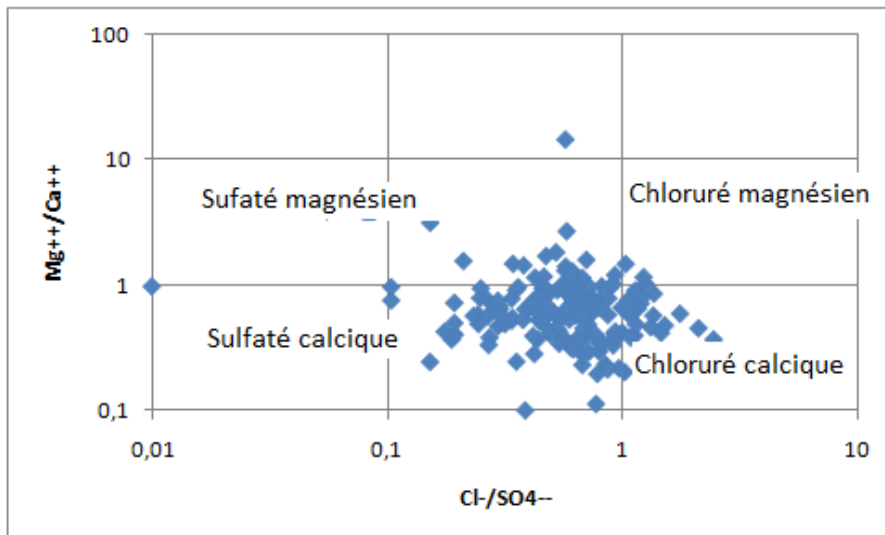


Fig.V.9 : Diagramme binaires par les rapports caractéristiques (Mg/Ca versus Cl/SO_4)

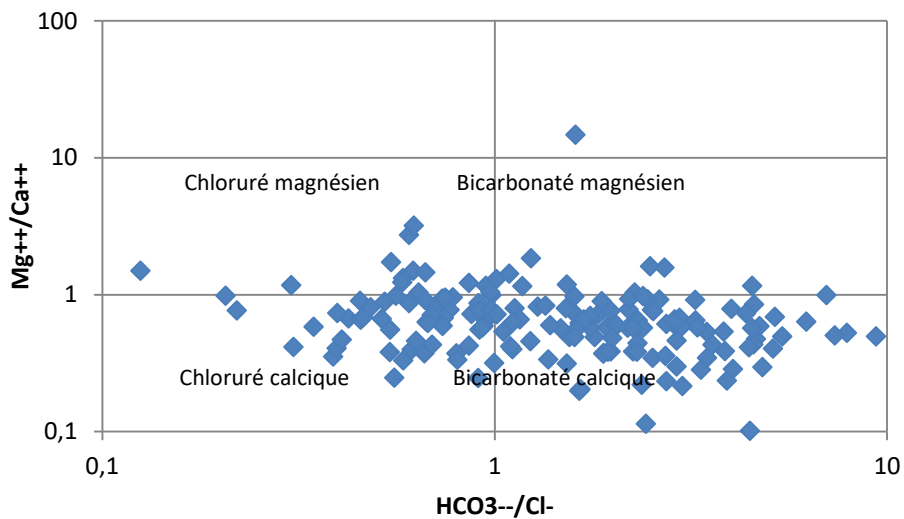


Fig.V.10 : Diagramme binaires par les rapports caractéristiques

(Mg/Ca versus HCO_3/Cl)

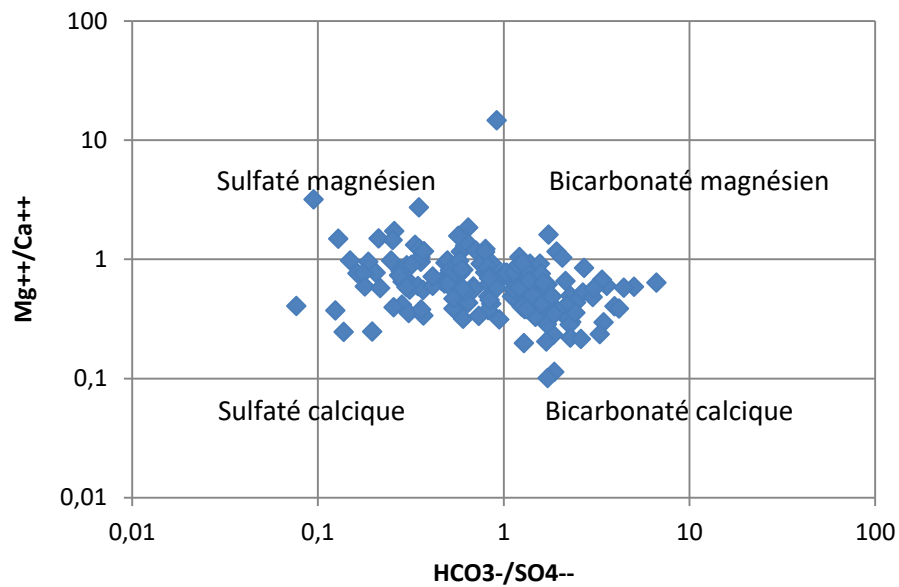


Fig.V.11 : Diagramme binaires par les rapports caractéristiques

(Mg/Ca versus HCO_3/SO_4)

Ces diagrammes nous ont permis de bien voir que la majorité des eaux souterraines présentent deux faciès : dont le plus important est celui de sulfaté calcique avec 38.1 % suivie bicarbonaté calcique avec 38.1 % des points d'eau.

Etant donné que le chlore est un élément conservé, ne participe pas aux interactions eau-roche, caractérise l'origine de la salinité et constitue un traceur de mélange (Tellam 1995 et Fidelibus et al. 1996), nous avons représenté les points analysés sur le graphe (Fig.V.12) où la majorité des points se localisent dans la partie d'eau douce, Quatre points d'eau sont salés sont dans la partie d'eau salée se localisent au niveau de Daiet El Malha due à la présence d'un diapire.

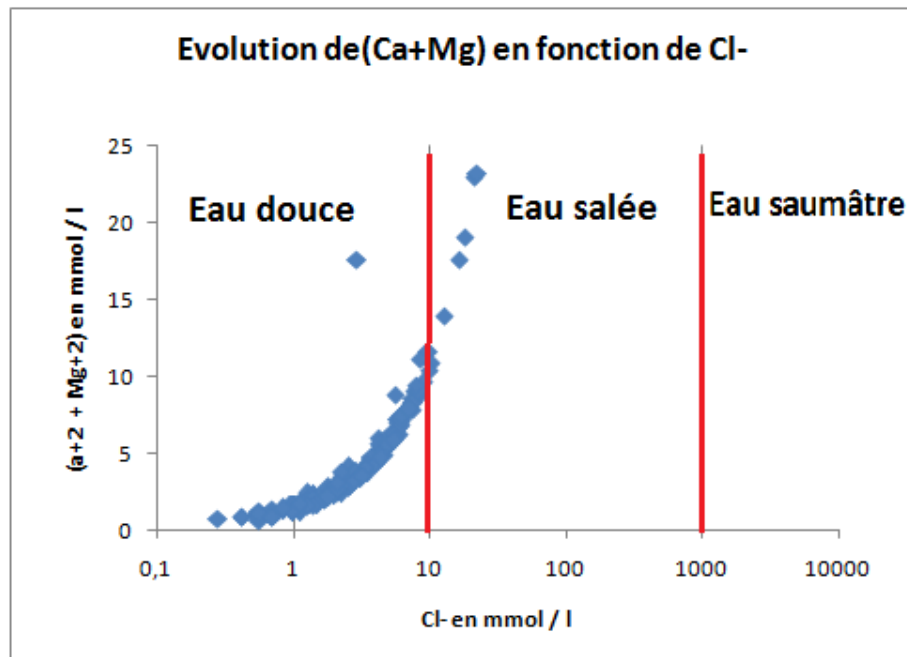


Fig.V.12 : Evolution de (Ca+Mg) en fonction de Cl-

Nous avons représenté l'évolution des cation et des anions en fonction de la conductivité. Ces graphes montre que la conductivité évolue avec Ca^{+2} , Mg^{+2} , HCO_3^- et Cl^- moyen avec SO_4^{-2} et le Na^+ et très faible avec K^+ , ceci nous permet de conclure que les carbonates et le gypse influent directement sur le chimisme des eaux souterraine du synclinale d'aflou.

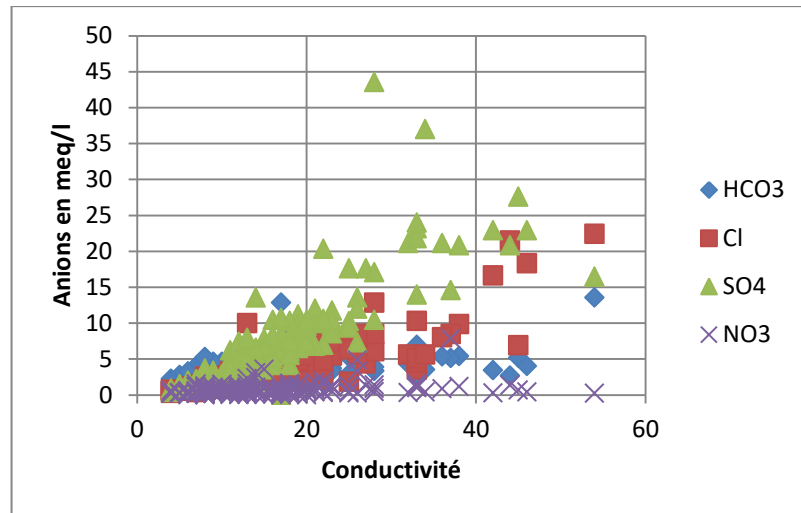


Fig.V.13 : Evolution de la conductivité en fonction des anions

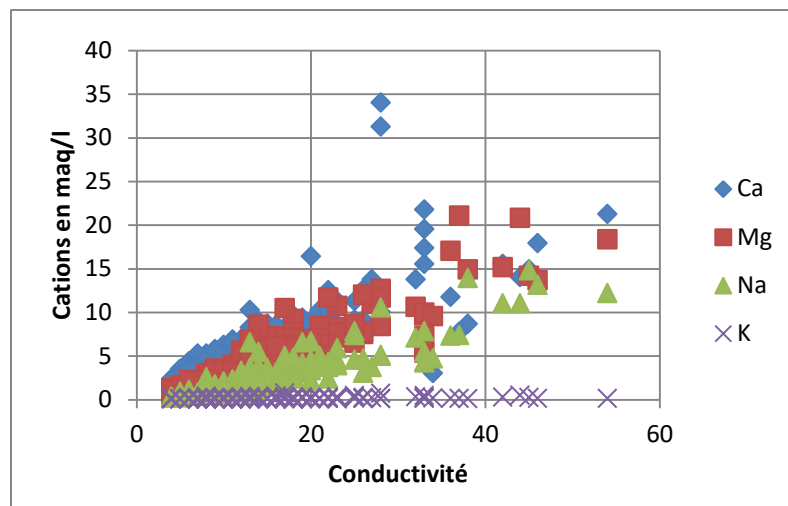


Fig.V.14 : Evolution de la conductivité en fonction des cations

La disposition des différents points d'eaux analysés par rapport à la ligne de mélange eau douce-eau salée (eau de pluie-eau de mer) peut être de grande utilité pour identifier d'autres phénomènes qui sont annexés au processus de mélange. Les eaux souterraines des différents points d'eau montrent en général un enrichissement en Ca^{+2} , Mg^{+2} , SO_4^{-2} , Cl^- . Les réactions majeures reconnues comme responsables d'enrichissement ou d'appauvrissement des éléments

dans les eaux souterraines (Fidelibus et al. 1996) sont l'échange $\text{Ca}^{+2} - \text{Mg}^{+2}$ dû à l'interaction eau-roches carbonatées, l'échange de base $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{+2}$ ou $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{+2}$, la réduction ou la dissolution des sulfates.

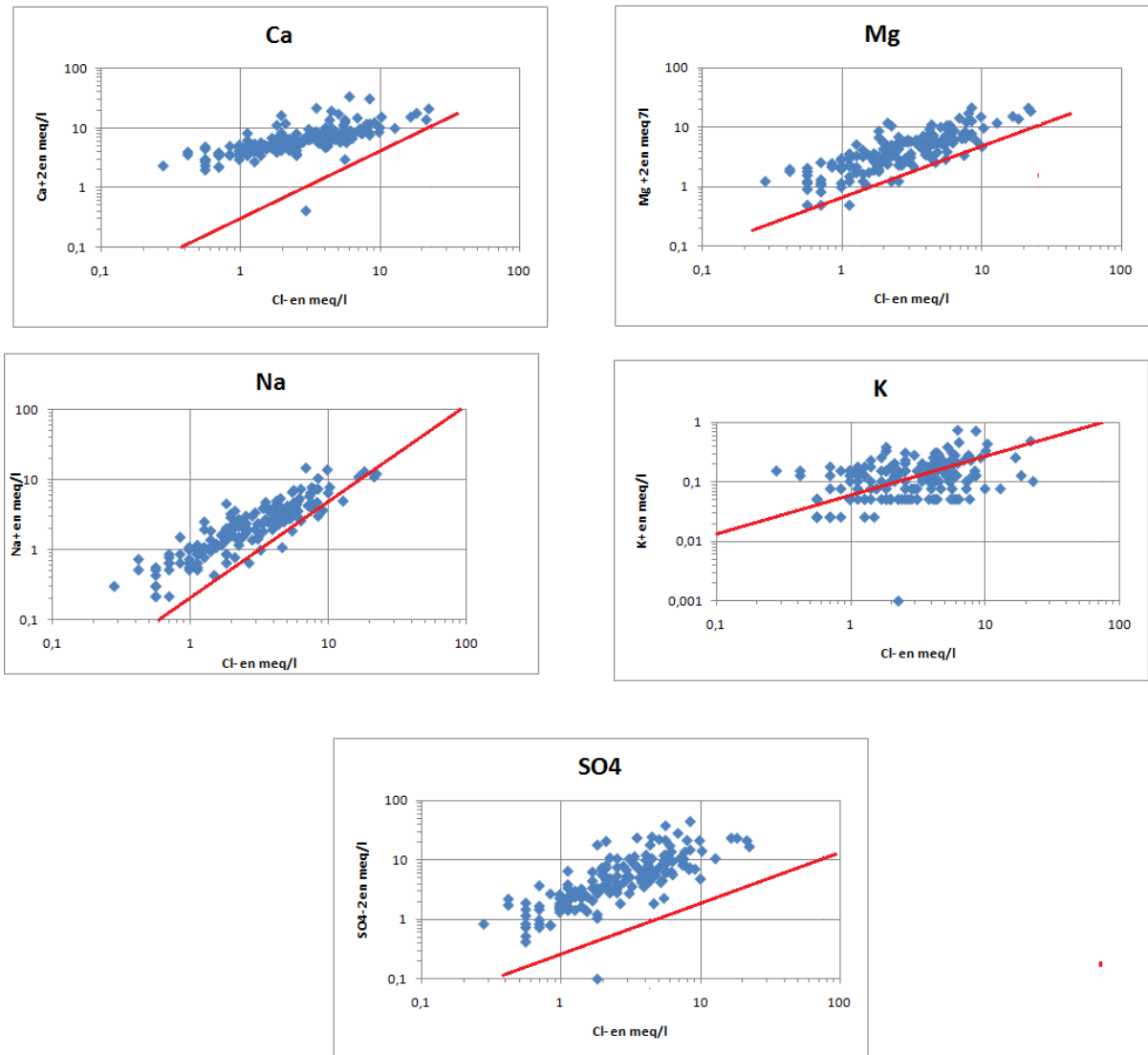


Fig.V.15 : Disposition des différents points d'eaux analysés par rapport à la ligne de mélange eau douce-eau salée

L'enrichissement en Ca^{+2} est dû à la dissolution de la calcite matrice essentielle des grés du Barrémien et de l'Albien, Mg^{+2} des calcaires dolomitiques du Turonien.

Le graphe (Fig.V.15) Na^+ en fonction de Cl^- montre que tous les points se trouvent en dessus de la droite de mélange montre que la teneur en Na^+ est en équilibre avec la teneur en Cl^- et qu'il

n'existe pas un déficit en Na^+ et que le phénomène d'échange de base ionique entre l'eau et l'aquifère est nul.

La relation entre le K^+ et le Cl^- indique que les points se trouvent de part et d'autre de la droite de mélange traduisant un enrichissement par dissolution des évaporites surtout la Sylvine très fréquente dans les formations triasiques ou utilisé dans les engrais.

La relation entre SO_4^{2-} et Cl^- montre que la quasi-totalité des points se trouvent au-dessus de la droite de mélange eau douce-eau salée. L'enrichissement en sulfates est lié à la présence des évaporites liées à la présence des gypses diffus dans les marnes et/ou à une contamination d'origine agricole.

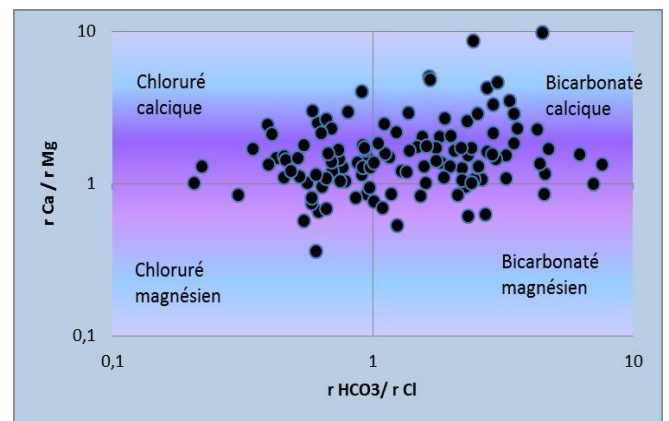
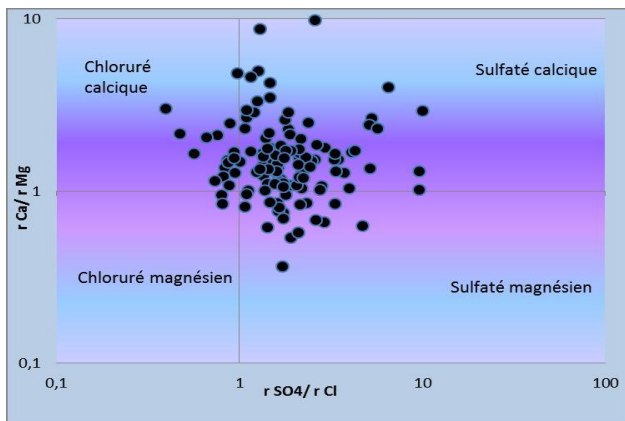


Fig.V.16 : Relation Ca/ Mg vs SO4/Cl Fig.V.17: Relation Ca/Mg vs HCO3/Cl

La prédominance des anions SO_4 vis-à-vis de HCO_3 et Cl , ainsi que l'abondance des cations Ca et Mg , nous permettent d'établir des diagrammes binaires par les rapports caractéristiques : Ca/Mg versus SO_4/Cl puis Ca/Mg versus SO_4/HCO_3 et Ca/Mg versus HCO_3/Cl pour expliquer l'évolution des faciès géochimiques rencontrés dans les diagrammes de Piper et celui de Schoeller-Berkaloff.

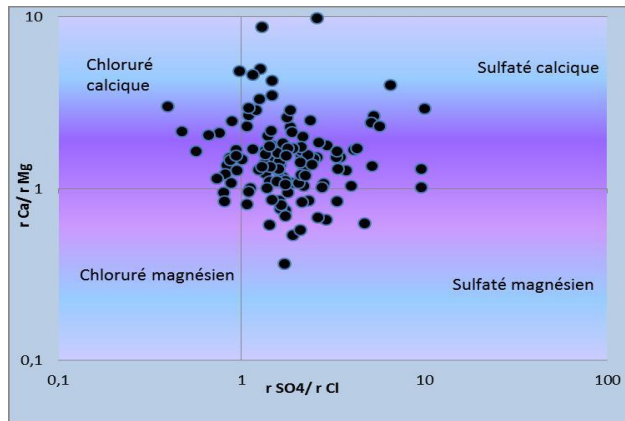


Fig.V.18 : Relation Ca/Mg vs SO4/Cl

Les figures 16,17 et 18 reflètent que Le rapport Ca/Mg est supérieur à l'unité pour 83% des échantillons, indiquant un enrichissement en calcium et 17 % des échantillons présentant des valeurs inférieures à 1 ce qui indique un enrichissement en magnésium.

Pour le rapport SO_4/Cl : 85% des échantillons présentent des valeurs supérieures à l'unité ce qui indique un enrichissement en ion Sulfate. Par contre les 15% de ces échantillons sont inférieurs à l'unité et riches en ion chlore.

Pour le rapport HCO_3/Cl : 43% des échantillons sont inférieurs à l'unité indiquant un enrichissement en chlore par contre les 57 % sont plus riches en bicarbonate.

En ce qui concerne le rapport SO_4/HCO_3 environ 62 % présentent des valeurs supérieures à l'unité qui sont riches en sulfate.

L'interprétation de ces trois diagrammes a montré la concentration des rapports d'ions en 04 pôles indiquant les faciès déterminés précédemment qui caractérisent le synclinal d'Aflou (Fig.V.19).

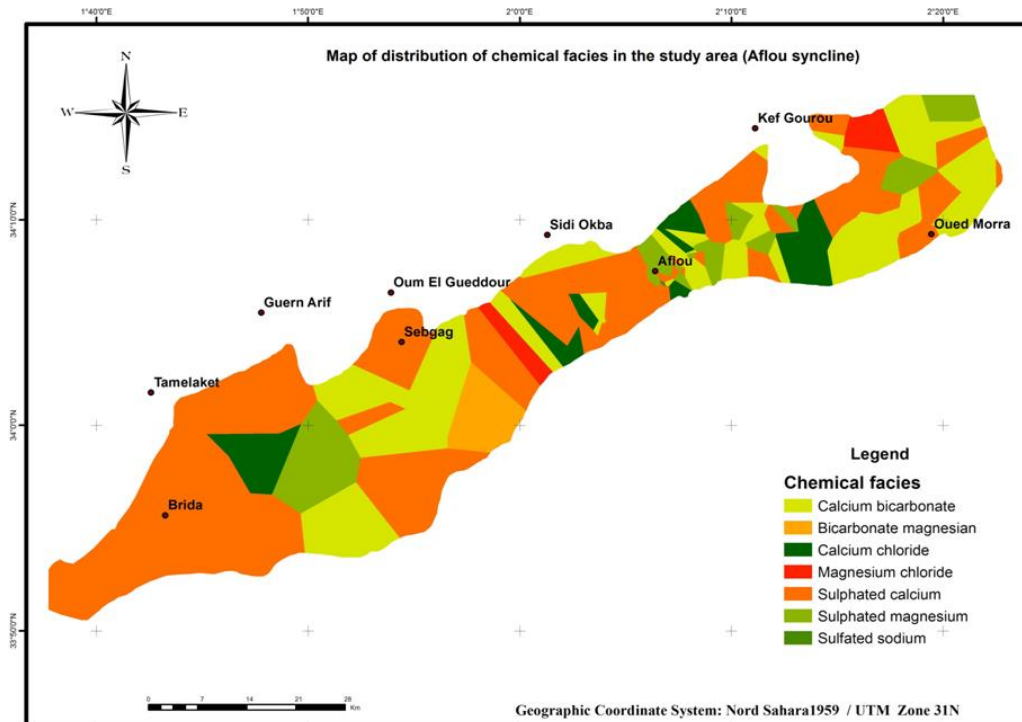


Fig.V.19 : Carte de répartition des faciès chimiques dans le synclinal d'Aflou

Conclusion:

D'une manière générale la nature lithologique de l'encaissant influe directement sur le chimisme des eaux:

- Ca^{++} , Na^+ , Cl^- et SO_4^{--} : Caractérisent essentiellement la minéralisation de l'encaissant, excepté parfois Ca et SO_4 qui peuvent provenir des formations du Portlandien ou du Trias.
- HCO_3^{--} : provient du lessivage des grès du Barrémien, Aptien, Albien après mise en solution de la matrice calcaire.

Au niveau de l'axe de l'aquifère qui coïncide avec celui de la cuvette les eaux présentent un faciès sulfaté calcique et bicarbonaté calcique à l'exception des points situés au niveau des zones de rejet d'eau résiduaire.

Nous retiendrons aussi l'influence des minéraux évaporitiques largement disséminés à différents niveaux mais aussi et surtout celle des remontées de matériaux triasiques que nous avons pu observer en plusieurs points du Djebel Amour.

En se rapprochant des formations du Crétacé Inférieur (Portlandien) et du Jurassique Supérieur (calcaires) le faciès sulfaté calcique, présente des teneurs très élevées en : SO_4^- , Cl^- , Ca^{++} et Na^+ . L'examen des cartes en iso-teneurs nous a apporté la preuve que la composition des eaux était très étroitement liée à la nature lithologique des différentes formations.

V.6. Classification Dureté des eaux du synclinal d'Aflou

La dureté d'une eau est due essentiellement à la présence des sels de calcium et de magnésium qui sont des éléments très solubles à l'état naturel.

Pour exprimer la dureté, on a utilisé la formule suivante:

$$\text{TH} = (\text{Ca} + \text{Mg}) * 5$$

Avec : TH titre hydrotimétrique en $1^\circ\text{F} = 10\text{mg/l}$ de CaCO_3 .

Tab.V.2 : Plage de valeurs du titre hydrotimétrique

TH en °F	0 à 7	7 à 22	22 à 32	32 à 54	+ 54
Eau	douce	Modérément	Assez douce	Dure	Très Dure

Le calcul de la dureté des eaux échantillonnées (Annexe VI) a donné les résultats suivants :

- 5 % des échantillons ce sont des eaux modérément douces.
- 17 % des échantillons ce sont des eaux assez douces.
- 33% des échantillons ce sont des eaux dures.
- 45 % sont des eaux très dures.

Ces résultats ne sont pas étonnants, si on sait qu'il y a des formations géologiques de nature calcaire dans la zone d'étude. En particulier les calcaires du Jurassique et du Néocomien supérieur et la matrice calcaire des grés du Barrémien-Aptien-Albien.

V.6.1. Qualité des eaux pour l'irrigation

Dans les zones arides et semi-arides, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitue l'un des facteurs déterminants dans la production agricole, aussi bien dans l'intensification des cultures, que dans l'extension des surfaces irriguées. Pour les régions tempérées, les eaux superficielles constituent la principale source d'eau d'irrigation ; alors que dans les zones semi-arides, ou cette ressource est rare ou inexistante, on fait appel aux eaux souterraines. Le développement de

l'agriculture dans ces zones rencontre actuellement, en dehors de la rareté des ressources hydriques, de nouveaux problèmes tels que le risque de salinisation des sols qui peut être apprécié par la conductivité électrique et celui de l'alcalinisation des sols. Cette dernière est due aux échanges ioniques (du sodium, du calcium et du magnésium) entre l'eau et le sol irrigué.

Comme la région d'Aflou-El Haoudh est à vocation agricole et les risques de salinisation des sols se font sentir, une étude d'aptitude des eaux à l'irrigation s'avère nécessaire car cette région se caractérise par une faible pluviométrie, une forte évaporation et une eau souterraine trop chargée en sulfates.

Pour définir la qualité des eaux de la nappe du point de vue irrigation, on a utilisé deux classifications :

V.6.2 Taux d'absorption du sodium :

Il est donné par la formule suivante :

$$\text{SAR} = \text{Na} / \text{SQR} [(\text{Ca} + \text{Mg})/2]$$

D'après les résultats concernant le SAR on constate que la proportion du sodium adsorbée est comprise entre 0.14 et 4.05 ce qui affirme un très faible apport du sodium à la solution du sol selon la classification du SAR (Fig.V.20).

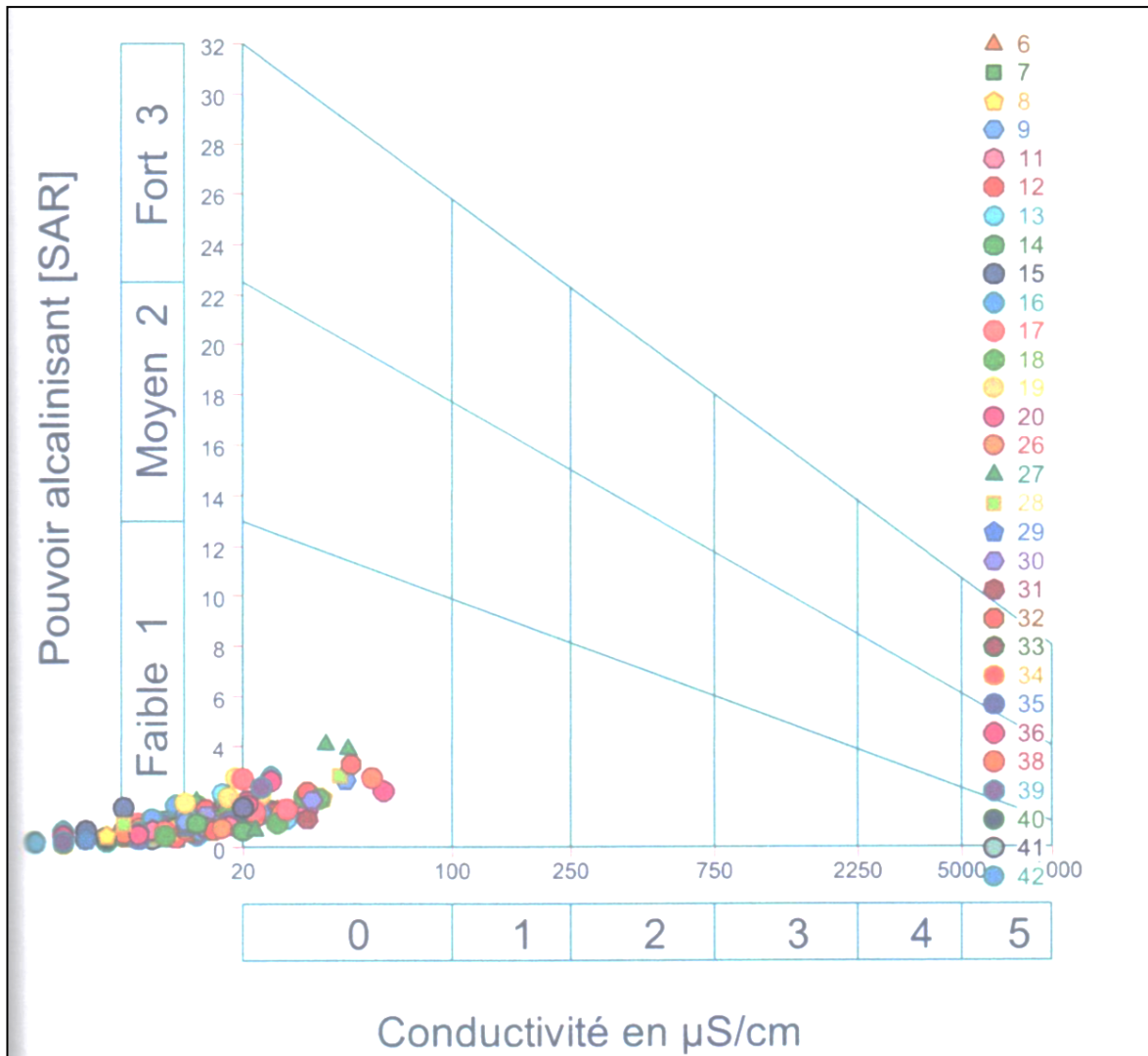


Fig.V.20 : Diagramme de classification des eaux d'irrigation en fonction du S.A.R

V.6.3 Classification de Wilcox

La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur du sodium dans l'eau, est définie par la formule suivante :

$$\% \text{Na}^+ = [\text{Na}^+ + \text{K}^+] / [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+] * 100$$

Où tous les éléments sont exprimés en meq / l.

Cette classification définit cinq classes d'eau qui sont : Excellente, Bonne, Admissible, Médiocre et Mauvaise. D'après la figure 20 les eaux sont d'une excellente qualité.

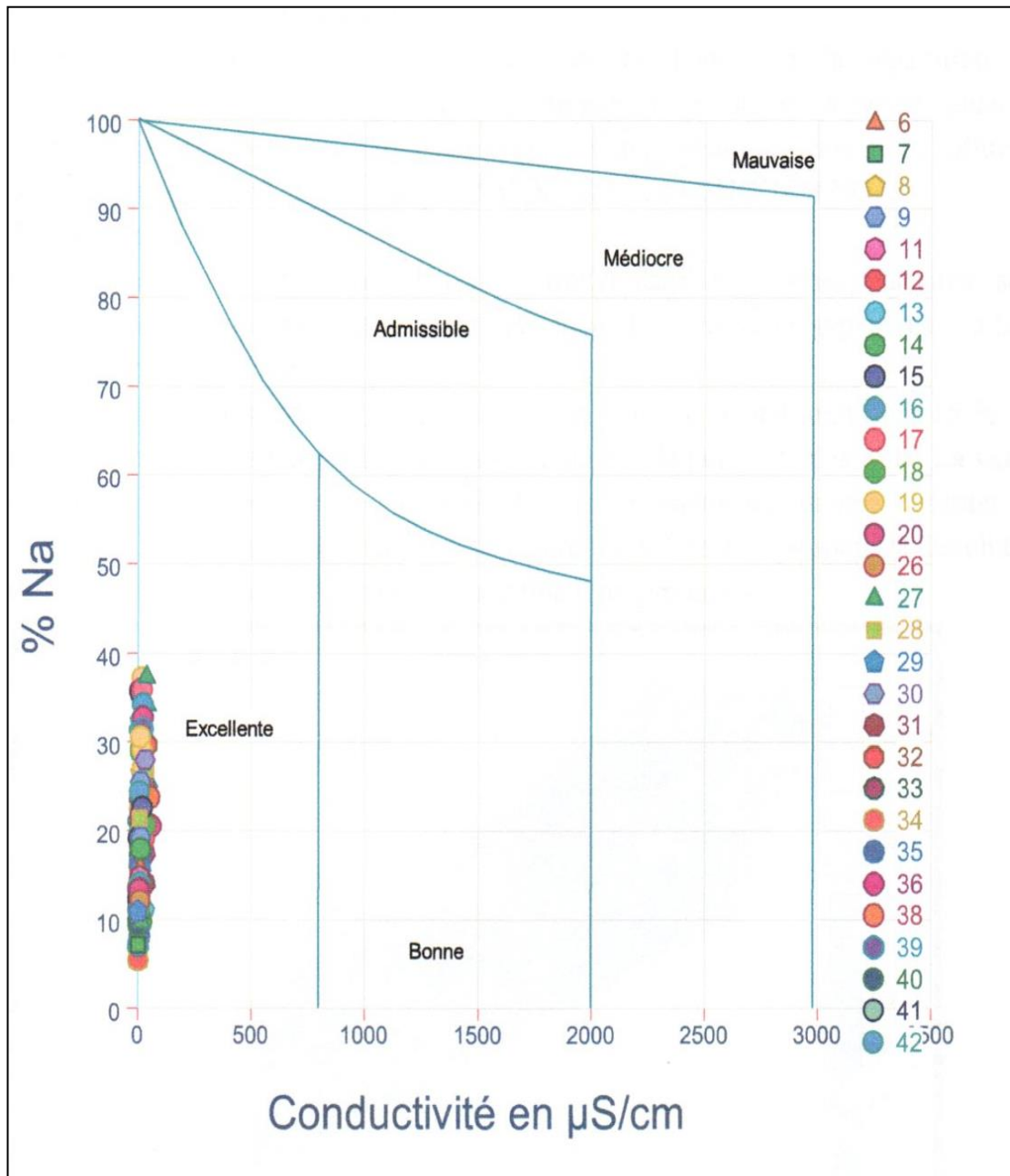


Fig.V.21 : Diagramme de classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de WILCOX

V.7. Evolution des indices de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux prépondérants (évaporites et carbonates)

La formule de calcul de l'indice de saturation de différents minéraux dans l'eau est la suivante :

$$IS = \log (IAP/K)$$

Ou : IAP est le produit de l'activité ionique ;

K : constante d'équilibre.

Une simulation a été faite sur le logiciel Phreeq à partir de Diagramme, pour le calcul des indices de saturation.

Pour les évaporites, on a choisi le gypse ($\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydrite (Ca SO_4) pour illustrer cette évolution, la Figure 23 indique que les eaux échantillonnées sont sous-saturées vis-à-vis le gypse et l'anhydrite. De ce fait les eaux sont enrichies par les sulfates et le calcium (pour le gypse et l'anhydrite).

Tab.V.3 : Paramètres statistiques des indices de saturation

Indices de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne
Is Calcite	-0.54	1.37	0.62
Is Aragonite	-0.68	1.23	0.48
Is Dolomite	-1.29	2.58	1.17
Is Gypse	-2.32	0.48	-0.95
Is Anhydrite	-2.55	0.26	-1.17

Pour les évaporites, on a choisi le gypse ($\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydrite (Ca SO_4) pour illustrer cette évolution, la Figure 21 indique que les eaux échantillonnées sont sous-saturées vis-à-vis le gypse et l'anhydrite. De ce fait les eaux sont enrichies par les sulfates et le calcium (pour le gypse et l'anhydrite).

Pour les carbonates, on a choisi la calcite, la dolomite et l'aragonite. La figure 21 indique la sursaturation des eaux échantillonnées vis-à-vis de la dolomite et la calcite et par un degré plus vis-à-vis de l'aragonite.

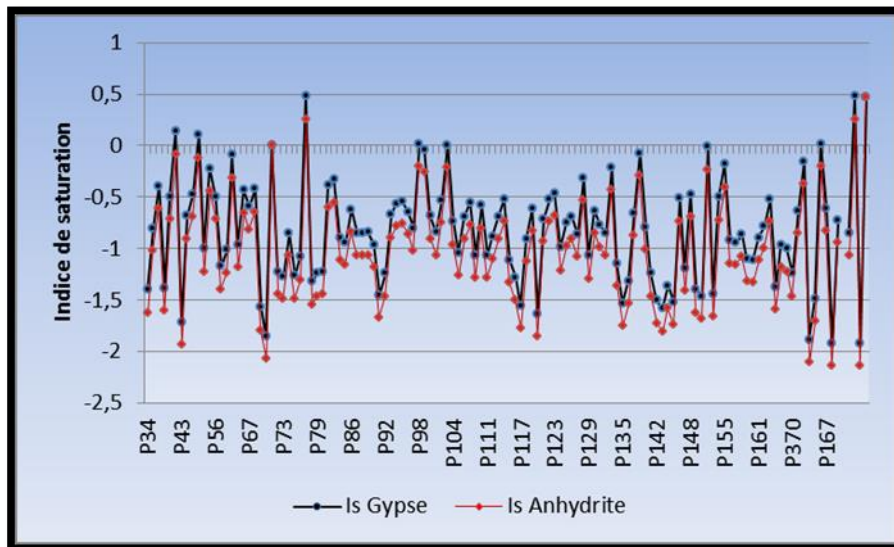


Fig.V.22 : Evolution des indices de saturation (gypse et anhydrite)

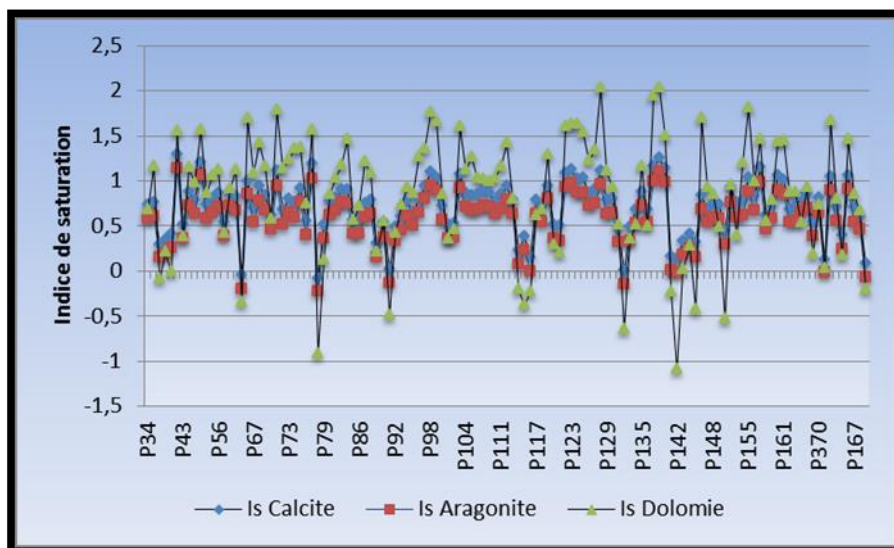


Fig.V.23 : Evolution des indices de saturation (calcite, dolomite et l'aragonite)

Tandis que les figures 22 et 23 illustrent des corrélations très significatives entre l'indice de saturation (IS) du gypse et de l'anhydrite avec $(Ca+S0_4)$, Ce qui renforce l'hypothèse de la dissolution de ces évaporites. Cependant, les indices de saturations de la calcite et de l'aragonite

avec $(Ca+HCO_3)$, et de la dolomite avec $(Ca+Mg+HCO_3)$ montrent de moindres corrélations que les autres, ce qui infirme la précipitation de ces minéraux carbonatés.

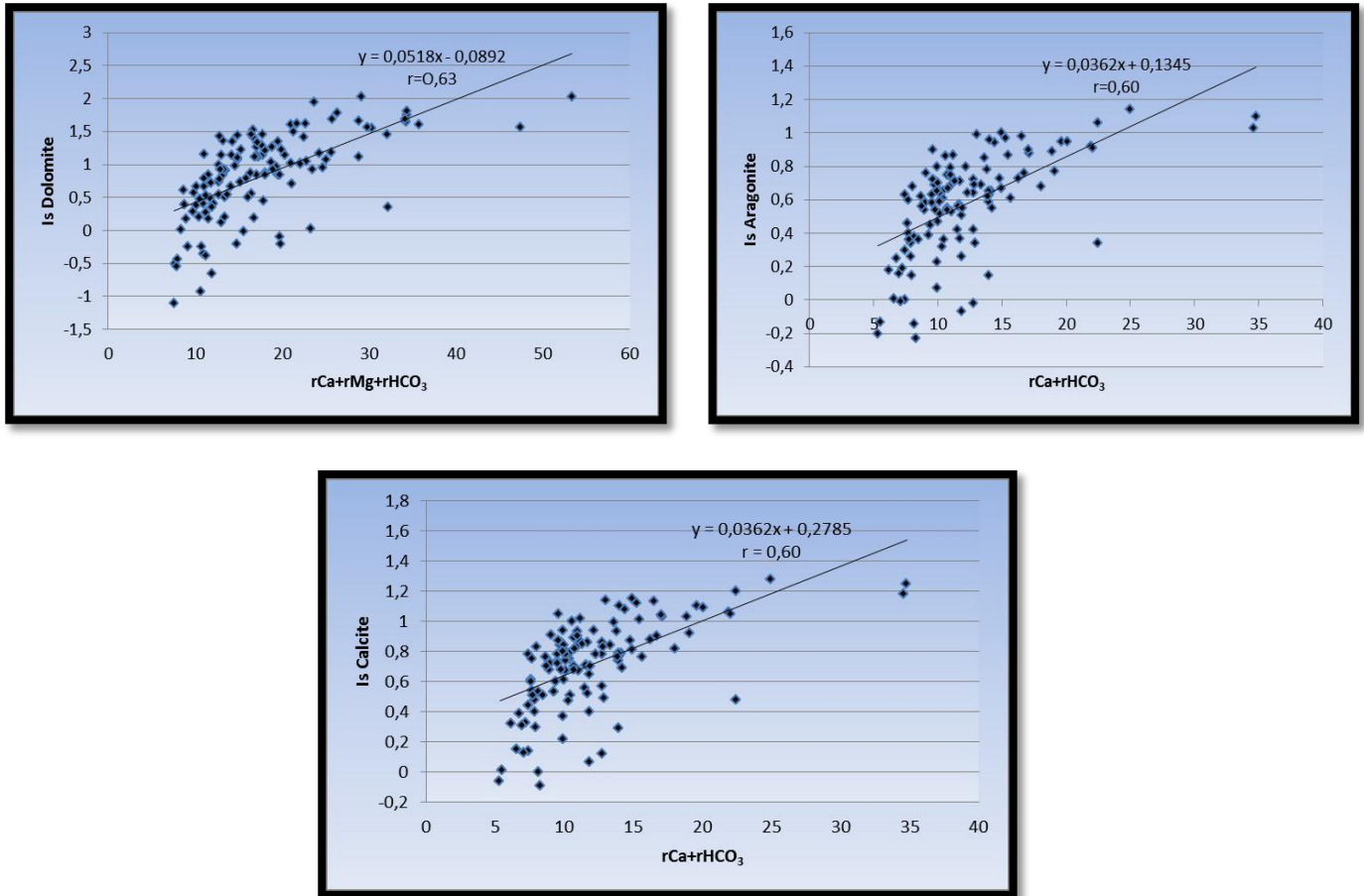


Fig.V.24 : Corrélations entre minéraux et indices de saturation

En résumé, l'interprétation des figures a permis de montrer l'influence des minéraux évaporitiques sur le chimisme de l'eau. La sous-saturation en gypse et anhydrite provoque une continuité dans la dissolution et un enrichissement des eaux par ces éléments. Par ailleurs, les minéraux carbonatés se trouvent parfois proches de l'équilibre souvent en sursaturation et tendent vers la précipitation sous forme de calcite et dolomite.

V.7.1. Mise en évidence des échanges de base

Les eaux souterraines au cours de leurs trajets souterrains, se chargent de plus en plus matières dissoutes, elles rentrent en contact avec des substances ayant la propriété d'échanger leurs ions contre ceux de l'eau.

L'indice d'échange de base (IEB) défini par H. Schoeller en 1934, est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existant dans l'eau. Il est donné par l'expression suivante :

$$\text{I.E.B} = \frac{rCl - (rNa + rK)}{rCl}$$

Cet indice définit le sens d'échanges ioniques entre l'eau et les terrains encaissants, Si :

- IEB = 0 → Pas d'échanges ;
- IEB < 0 → Ca²⁺ et Mg²⁺ sont échangés par Na⁺ et K⁺ ;
- IEB > 0 → Na⁺ et K⁺ sont échangés par Ca²⁺ et Mg²⁺.

Le calcul du pourcentage des valeurs de l'indice d'échange de base montre que 30.76% des échantillons ont un I.E.B négatif, le reste des échantillons sont positifs mais toujours proches du zéro.

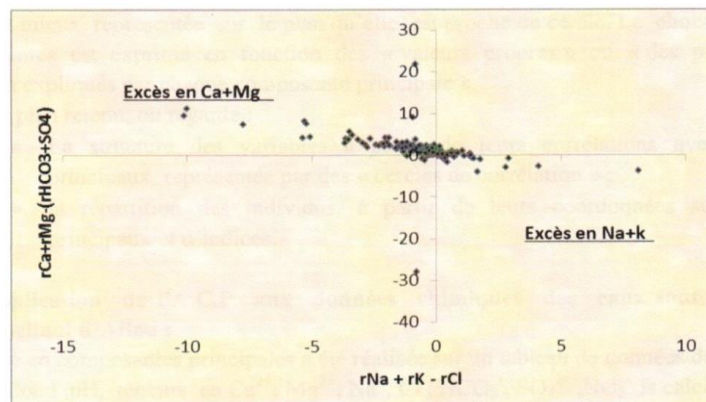


Fig.V.25 : La relation entre (Ca+Mg-HCO3-SO4) et (Na-K-Cl) dans les eaux du Barrémien-Aptien-Albien

Le graphique ci-dessus (Fig.V.25) montre deux cas de figure :

- ❖ Les échantillons où il y a un excès en (Ca+Mg) par rapport aux (HCO₃+SO₄) et un déficit en (Na+K) par rapport aux chlorures (Cl), c'est la lithologie caractérisée par la dominance des formations évaporitiques qui contrôle l'enrichissement des eaux en ces éléments (Ca et Mg) et cela caractérise la majorité des échantillons.
- ❖ Les échantillons qui présentent un déficit en (Ca+Mg) et un excès en (Na+K), ce phénomène est toujours contrôlé par la lithologie, mais cette fois-ci celle caractérisée par l'abondance des argiles par rapport aux autres formations lithologiques dans la région, ce qui favorise l'échange de bases entre les eaux et les formations argileuses.

V.8. Analyse en composantes principales ACP

V.8. 1. Principe

L'analyse statistique par composantes principales permet de déterminer les différentes liaisons entre plusieurs variables et de mettre en évidence les associations possibles. Elle est descriptive et l'objectif est de présenter sous forme graphique, le maximum d'information contenu dans un tableau de données. Ce tableau est constitué, en lignes par des « individus » sur lesquels sont mesurées des « variables quantiques » disposées en colonnes. Le but recherché est déterminé la structure des variables (familles) ainsi que la répartition de ces dernières.

Après l'élaboration des matrices de corrélations, il s'ensuit une diagonalisation basée sur :

- Une matrice de « vecteurs propres » qui contient des combinaisons linéaires des (P) variables initiales actives.
- Une matrice de « valeurs propres » qui représente les variances des individus sur les axes principaux correspondants.

V.8.1.1. Interprétation

Pour un axe donné, les variables qui ont les plus forts coefficients (en valeurs absolues) sont celles qui contribuent le plus à la formation de cet axe. Une variable est d'autant mieux représentée sur le plan qu'elle du cercle. Le choix du nombre de composantes est exprimé en fonction des « valeurs propres » ou « des pourcentage des variation expliqués par chaque composante principale ».

- La structure des variables à partir de leurs corrélations avec les axes principaux représentée par des « cercles de corrélation » ;
- La répartition des individus, à partir de leurs coordonnées sur les axes principaux et d'indices.

V.8.2. Analyses multidimensionnelles:

Les éléments suivants ont été utilisés dans ce traitement: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , Conductivité et pH. Le traitement des données a été limité à deux axes ; dont 51,58% pour le premier et de 11,67 % pour le second à ce stade 63,25% de la variance ont été pris en compte.

Dans l'espace des variables l'axe I est défini par (Conductivité, Mg^{++} , Cl^- , Na^+ , Ca^{++} et SO_4^{--}) ce qui caractérise la minéralisation de l'encaissant (roche réservoir).

Tandis que NO_3^- apparaît nettement opposé au K, On a une opposition des pollutions anthropiques (NO_3) et pollution naturelle liée à la géologie des formations surtout les salifères riches en potassium tel que la Sylvine (KCl) et traduit des processus de salinisation et des phénomènes de fixation par des minéraux argileux c'est le cas de potassium K^+ . Donc le F2 est déterminé par les facteurs de la pollution.

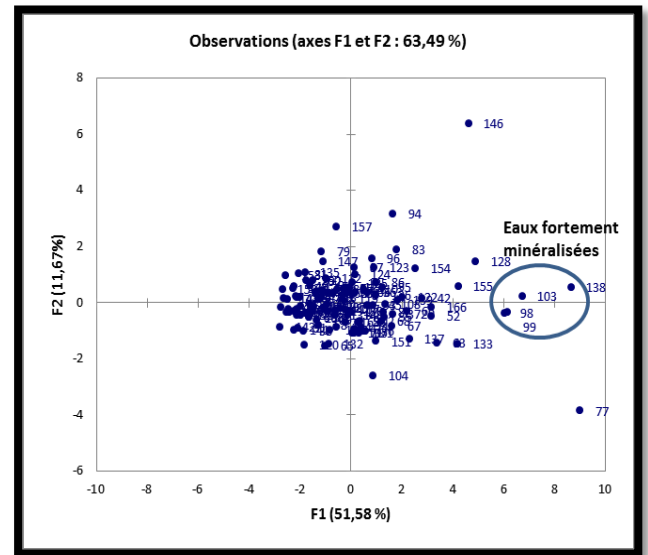
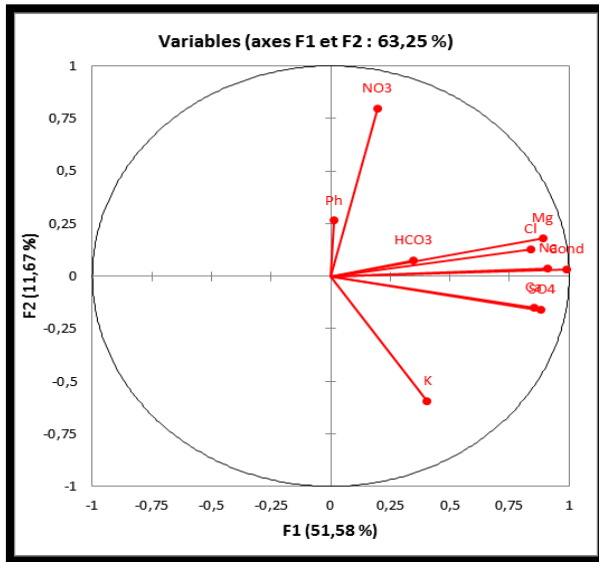


Fig.V.26 : Projection des variables

Fig.V.27 : Projection des individus selon le plan F1-F2

Sur le diagramme des individus, les échantillons à forte teneur se positionnent du côté négatif de l'axe principal, ils représentent les eaux fortement influencées par les évaporites. Les eaux caractérisés par une minéralisation moyenne se positionnent vers le côté positif elles représentent les eaux du Continental Intercalaire.

On peut distinguer un certain nombre de points : à savoir les eaux de surfaces (30 et 37) qui présentent une minéralisation moyenne. Ce sont des sources à débit faible émergeant au niveau de l'oued et qui sont influencées par les formations marno-gypsifères du Portlandien situé à proximité, elles ont des teneurs élevées en SO_4 et Na et moyennes pour les points 121, 123 et d'une façon moindre le point 77 se caractérisent par une teneur élevée en nitrates supérieure ou égale à 50 mg/l, mais pouvant atteindre 120 mg/l (123). Ces teneurs sont dues à la situation de ces points dans des zones d'épandage ou dans des secteurs où l'irrigation est principalement réalisée à partir de rejets d'eaux résiduaire (au nord-est d'Aflou).

Au niveau des points 4, 47, 60, 80 à 86 l'influence des calcaires et des marnes gypsifères est importante:

Points captant les calcaires du Jurassique: 4, 47 et 60. Points captant les marno-calcaires du Cénomano-Turonien: 80 à 86.

Conclusion de l'ACP :

Pour ce qui concerne la chimie des eaux, l'ACP et l'examen des cartes en isoteneurs nous ont apporté la preuve que la composition des eaux était très étroitement liée à la nature lithologique des différentes formations.

Nous retiendrons en particulier l'influence des minéraux évaporitiques largement disséminés à différents niveaux mais aussi et surtout celle des remontées de matériaux Triasiques que nous avons pu observer en de nombreux points du Djebel Amour.

**CARTOGRAPHIE DE LA
VULNERABILITE A LA
POLLUTION DES EAUX DU
SYNCLINAL D'AFLOU**

VI.1. Introduction :

L'eau souterraine est une ressource naturelle importante dans le monde entier. L'importance des eaux souterraines est reconnue depuis longtemps, mais le risque que la nappe phréatique soit contaminée suite aux activités humaines à proximité de la surface terrestre a seulement été reconnu ces dernières années. Avant 1980 environ, les chercheurs ne pensaient pas que les sols servis comme des filtres, empêchant les substances nocives déposées à la surface du sol de se migrer vers le bas et rejoindre les eaux souterraines. Aujourd'hui nous savons que les sols et les autres couches intermédiaires ont une capacité finie de filtrer et de retarder, et ainsi de protéger l'eau souterraine. (Mardhel, 2001)

La pollution de l'eau souterraine est une modification qui la rend impropre à l'une de ses usages ou perturbe l'écosystème aquatique, elle peut être provoquée par différentes activités humaines comme l'utilisation de produits phytosanitaires en agriculture (insecticide, herbicide, fongicide), les engrais (azotés, etc.), les accidents industriels (fuite de cuve, incendie, etc.), les fuites des réseaux d'égouts, les décharges sauvages de déchets domestiques ou industriels, etc.....

La prévention des eaux souterraine contre la pollution, action d'autant plus nécessaire que la dépollution des nappes d'eaux souterraines contaminées, est une opération longue et coûteuse.

La protection et la conservation de ces ressources sont essentielles, en particulier dans les zones arides où les eaux souterraines constituent la principale source hydrique.

La notion de vulnérabilité des nappes souterraines à la pollution intègre les différents facteurs physiques et stables déterminant la mesure dans laquelle ces nappes se trouvent, dans les conditions naturelles, plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol. Ces facteurs, d'ordre hydrogéologique pour l'essentiel, sont en général appréciable a priori en se basant sur les connaissances géologiques et hydrogéologiques générales; aussi la vulnérabilité à la pollution peut faire l'objet d'une cartographie de classification qui constitue en même temps la méthode d'expression et de diffusion des informations la plus commode vis-à-vis de diverses catégories d'utilisateurs soucieux ou responsables de la prévention de la pollution, mais non spécialistes en hydrogéologie. (N. Bonvoisin, 2001)

VI.2. Pollution des eaux souterraines :

L'eau est sans doute le meilleur solvant liquide. La pollution de l'eau souterraine est le risque permanent de limitation de la ressource en eau dans un proche avenir.

Elle devient alors impropre à répondre à la demande d'utilisation et peut présenter un danger pour l'environnement.

Les eaux souterraines se caractérisent par leur teneur en substances minérales dissoutes d'origine naturelle (géologique) ; c'est le "bruit de fond".

Leur degré de pollution est apprécié par la mesure de l'écart entre le "bruit de fond" et leurs caractéristiques physico-chimiques.

La connaissance du comportement des polluants, joue un rôle essentiel dans le cadre de vulnérabilité des eaux souterraine, à la pollution. L'atteinte d'une cible (nappe d'eau) dépend étroitement du comportement des polluants dans les milieux naturels traversés lors de leur migration. Les propriétés intrinsèques des polluants, les propriétés intrinsèques des milieux traversés, les interactions entre les polluants et le milieu, ainsi que les conditions locales (pluviométrie par exemple) sont autant de facteurs pavoisant la migration des polluants.

La connaissance du comportement des polluants a donc une incidence majeure en termes d'évaluation des risques : vitesse de propagation, extension de la pollution, nombre de cibles atteintes.

VI.2.1. Principales sources et foyers de pollution :

La pollution de l'eau souterraine est provoquée par les rejets des activités domestiques et urbaines, agricoles ou industrielles dont l'eau est le véhicule de transport et de dissémination idéal. D'où trois grandes sources de pollutions : domestique et urbaine, agricole et industrielle.

VI.2.2. pollution d'origine domestique et urbaine :

Ce sont les rejets d'eaux usées domestiques et municipales (lavage des rues, arrosages), Les eaux pluviales et les eaux utilisées pour la climatisation des immeubles. Les dépôts d'ordures ménagères apportent leur lot de charge polluante.

VI.2.3. Pollution d'origine agricole :

Les pollutions agricoles sont causées principalement par l'utilisation irrationnelle des engrais chimiques et des pesticides. Mais ce sont surtout les pratiques d'agriculture modernes qui en

sont la cause : labourages profonds et violents favorisant l'infiltration directe dans le sous-sol sans autoépuration, alternance des cultures sur une même parcelle dénudant le sol ; excès des fertilisants à des périodes mal choisies. (R. Letolle, 1978, in G. Castany, 1982).

VI.2.4. Pollution d'origine industrielle :

Elle est provoquée par les rejets industriels, thermiques et chimiques. Il faut ajouter les effets des grands aménagements urbains, le développement des autoroutes. (S. Ramon et al. 1978, in G. Castany, 1982).

VI.3. mécanismes et facteurs de pollution de l'eau souterraine :

Le transport des polluants et leur évolution dans le sol et le sous-sol, sont contrôlés presque entièrement par la Topographie et la Géologie. La connaissance des hétérogénéités géologiques, notamment celles relevant de la porosité et de la perméabilité est essentielle.

Les conditions physico-chimiques du milieu ainsi que les caractéristiques propres aux polluants sont également des paramètres pouvant influencer sur l'étendue d'une éventuelle pollution des eaux souterraines. La protection de l'eau souterraine contre la pollution repose sur des études et essais, en laboratoire et sur le terrain, des mécanismes et des facteurs de contamination. (G. Castany, 1982)

La propagation et l'évolution des polluants, de la surface du sol aux lieux d'utilisation, s'effectuent en quatre étapes :

- Introduction du polluant dans le sol : impacts et création de foyers de pollution.
- Migration et évolution du polluant en zone non saturée. Mécanismes de l'autoépuration.
- Propagation et évolution du polluant, dans l'aquifère. Mécanismes de la dilution.
- Persistance de la pollution. Rémanence et techniques de décontamination.

VI.3.1. Introduction du polluant dans le sol :

La surface du sol est une zone d'échanges atmosphère/sol. L'introduction de polluants crée des foyers de pollution par épandages à la surface du sol, ou enfouissement à des profondeurs plus ou moins grandes dans le sous-sol (fosses, puisards et rejets en nappes profondes). Un cas particulièrement grave est celui des rejets sur ou dans le karst (Les formations carbonatées sont caractérisées par une fissuration intense). Les polluants sont mis en solution et constituent un soluté.

Ce dernier traverse un puissant moyen d'épuration et de recyclage des eaux. (Margat J. 1993)
Le complexe argilo humique confère des propriétés d'adsorption et d'échange :

Le sol constitue un système accumulateur de substances très diverses. L'adsorption moléculaire et la rétention des micropolluants organiques dans les sols sont plus ou moins fortes et plus ou moins réversibles. La nature de la molécule détermine son pouvoir de rétention, par son poids moléculaire, par sa charge, par la conformation de la molécule et son affinité à établir des liaisons covalentes, par sa solubilité dans l'eau. La capacité d'adsorption ionique et la rétention des cations (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+) du sol varient essentiellement, en fonction de son épaisseur, de sa teneur en argile et en matières organiques. Les anions tels que (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{--}) ne sont pas retenus et migrent par convection ou par diffusion alors que certaines molécules sont fortement retenues dans le sol, comme par exemple les phosphates.

La microfaune et la microflore du sol lui confèrent une importante capacité d'épuration biologique. Le sol peut être un réservoir pour les germes pathogènes introduits accidentellement.

Les bactéries circulent relativement peu dans les sols et sont retenues dans les premiers centimètres, à la différence des virus qui sont facilement entraînés et peuvent contaminer la nappe sous-jacente. Donc, l'intensité de la pollution dépend du type de sol, de la dose de polluant et des conditions climatiques (précipitations en particulier) qui apportent un volume d'eau variable.

VI.3.2. Migration et évolution du polluant en zone non saturée :

Le soluté, ayant franchi la surface du sol, se déplace selon une direction sub-verticale jusqu'à la surface piézométrique. Il traverse la zone non saturée, caractérisée par la présence d'air (donc d'oxygène), de minéraux argileux, de matières organiques (humus), d'acides humiques, etc. la zone non saturée joue un rôle primordial par son pouvoir d'autoépuration naturel (analogue à celui du filtre lent des usines de traitement).

Cette barrière est franchie donc la propagation du polluant ne rencontre pratiquement plus d'obstacles. (G. Castany, 1982) :

L'eau souterraine y acquiert ses caractéristiques physico-chimiques et biologiques.

La prévision repose sur l'étude de l'autoépuration naturelle du sol.

L'autoépuration naturelle, est provoquée par cinq ensembles de mécanismes principaux.

VI.3.3. Mécanismes physiques de l'autoépuration :

La miscibilité avec l'eau et sa densité sont importantes. Une substance miscible devra vaincre les forces de la capillarité du sol. Par contre, elle s'intégrera facilement au soluté ; les différences de densité accélèrent le phénomène naturel de stratification de l'eau souterraine ; les mélanges entre soluté et eau souterraine deviennent plus difficiles. Les chlorures et les hydrocarbures sont très miscibles à l'eau.

La dilution du soluté avec l'eau souterraine diminue la concentration du polluant, donc sa nocivité. L'importance de ce phénomène est prédominante dans l'aquifère. La dilution est fonction des apports d'eau ou renouvellement, donc des infiltrations d'eau de surface : précipitations efficaces, rivières, etc. L'apport d'eau à température plus élevée ou plus basse que celle de la zone non saturée, entrave les mélanges et modifie le régime de l'eau souterraine.

VI.3.4. Mécanismes hydrodynamiques de l'autoépuration :

L'entraînement par l'eau en écoulement, vecteur de la migration des substances, est le mécanisme fondamental de la propagation de la pollution dans le milieu souterrain. Il faut tenir compte de la vitesse de déplacement ou à défaut, de la vitesse effective. Il existe une interdépendance entre les substances entraînées et les molécules d'eau, plus ou moins grande. Souvent, la vitesse de déplacement du soluté est différente de celle de l'écoulement de l'eau souterraine, le polluant ayant une vitesse spécifique. (R. Calvet et J. Chaussidon, 1978, in G. Castany, 1982).

VI.3.5. Mécanismes hydro chimiques de l'autoépuration :

La stabilité chimique, liée à la vitesse de dégradation est peu connue. Les échanges d'ions ou échanges de base, essentiellement avec les argiles, jouent sur les cations. Les anions, comme le chlore, sont rapidement et totalement transférés par l'eau souterraine. En ce qui concerne les pesticides, la fréquence de cations organiques ou susceptibles d'être ionisés, favorise les échanges.

Les interactions polaires, apparaissent surtout avec la formation des complexes des substances, métaux lourds en particulier, par les complexes argilo-humiques. Pour les pesticides, avec ou sans apparition de liaisons hydrogène, ces phénomènes sont importants.

VI.4. Mécanismes hydro biologiques de l'autoépuration:

Les mécanismes hydro biologiques de l'autoépuration résident surtout en biodégradations. Le milieu, riche en matières organiques nutritives, favorise le développement des microorganismes. Une lutte pour la vie s'engage dont sont victimes les bactéries pathogènes. Celles-ci étant les plus fragiles sont éliminées. Les bactériophages se développent. C'est le «filtre biologique».

Après un temps de séjour, d'une trentaine de jours, les bactéries pathogènes ont totalement disparu.

VI.4.1. Mécanismes de l'adsorption et de la désorption :

Échanges d'ions et interactions polaires, phénomènes d'attraction moléculaire et diélectriques, sont caractérisés par l'adsorption prédominante sur la désorption.

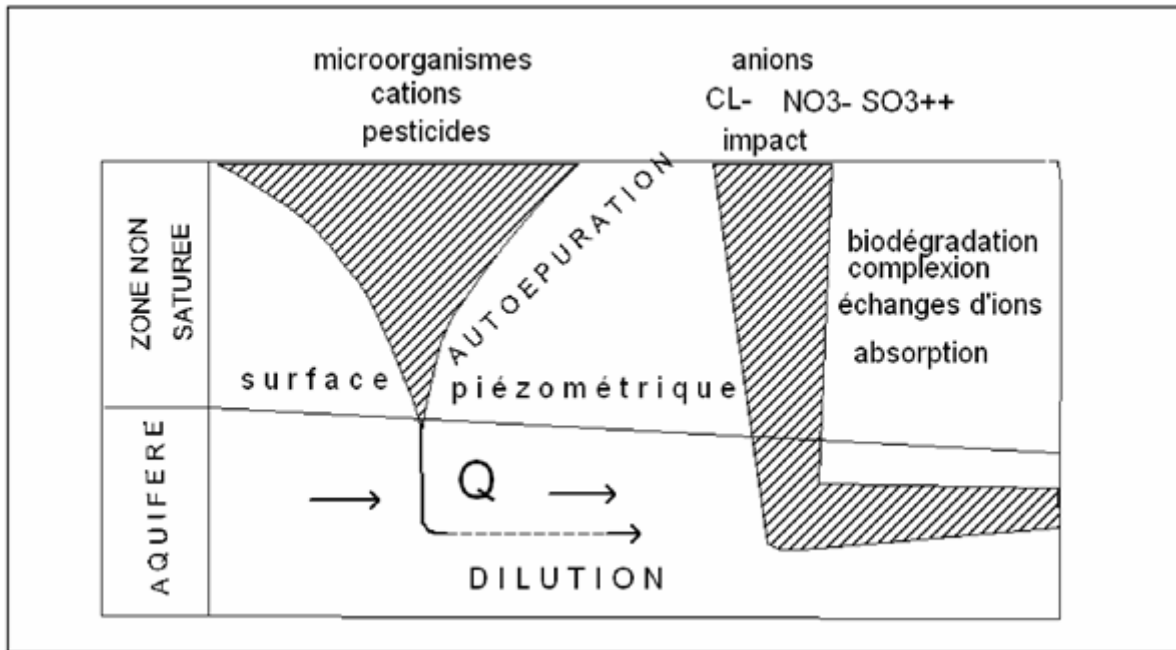
Ces deux phénomènes sont favorisés par la présence d'argiles, d'oxydes ou d'hydroxydes, et par les constituants organiques.

VI.4.2. Propagation et évolution du polluant dans l'aquifère (mécanisme de la dilution) :

Les mécanismes de transport du soluté dans l'aquifère sont complexes, conséquence de l'hétérogénéité du réservoir. La direction a une composante latérale prédominante (**Fig.VI.1**).

Des études sur modèles physiques et sur le terrain, ont mis en évidence une dispersion à la verticale du foyer de contamination, puis un étalement latéral dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine. Dans l'aquifère, en raison de l'absence d'oxygène, de matières organiques et de microorganismes, le rôle épurateur est très réduit ; pratiquement seule la dilution agit.

Celle-ci est d'autant plus importante que le débit de la nappe (ou la vitesse ou la transmissivité) est élevé ; d'où l'importance du renouvellement. Un fort renouvellement est favorable à l'élimination de la pollution.



**Fig.VI.1: Propagation et évolution du polluant dans l'aquifère
(Mécanisme de la dilution). (G.Castany, 1982)**

VI.4.3. Persistance de la pollution :

I.4.4. Cas de pollution par un produit plus léger que l'eau et qui atteint la nappe (hydrocarbures) :

Pour circuler dans le sol et rejoindre la nappe, les hydrocarbures doivent être en quantité suffisante pour former une phase continue. Celle-ci va migrer vers la nappe sous l'influence de la gravité et des forces capillaires, ces dernières induisant de plus un étalement latéral. S'ils sont présents sous forme discontinue (gouttelettes piégées dans les pores), la pollution sera plus lente ; la phase « huile » en déplacement peut être enveloppée d'une phase gazeuse formée par la vaporisation des composants les plus volatils. (N. Bonvoisin, 2001)

Cette fraction du polluant au-dessus de la nappe, (le corps d'imprégnation) représente une source de pollution durable pour la nappe. (Fig.VI.2).

VI.4.5. Cas des polluants plus lourds que l'eau :

Leur migration jusqu'à la nappe peut être très rapide. Une fois dans la nappe, ils continuent à migrer vers le bas jusqu'à ce qu'ils aient atteint soit le substratum soit une intercalation peu perméable.

Ils peuvent, alors, rester piégés dans les irrégularités du substratum ou bien migrer dans le sens du pendage de celui-ci.

Peu ou pas biodégradables, ils peuvent subsister pendant des mois, voire des années. Ces faits expliquent les difficultés des opérations de décontamination, (N. Bonvoisin, 2001)(**Fig.VI.3**).

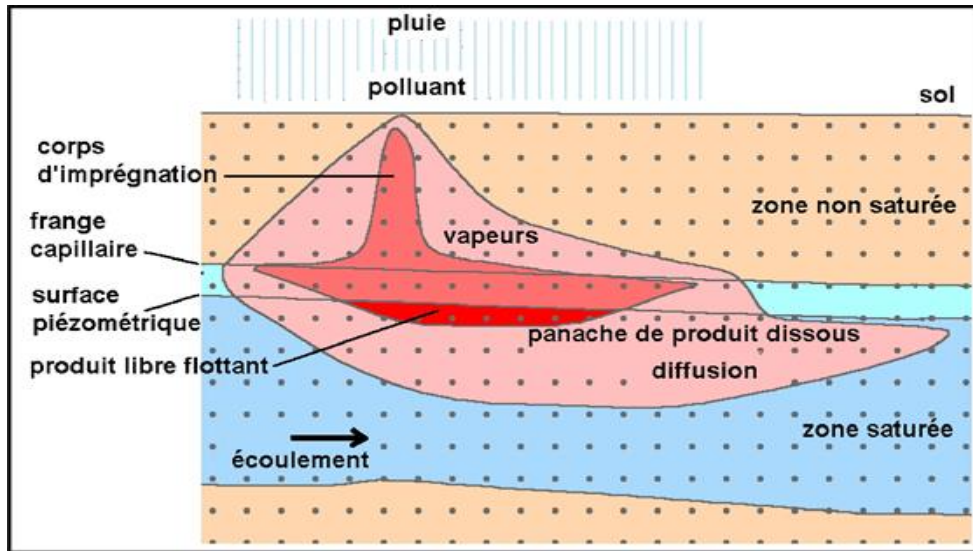


Fig.VI.2: Pollution par un produit plus léger que l'eau et qui atteint la nappe.
(N. Bonvoisin, 2001)

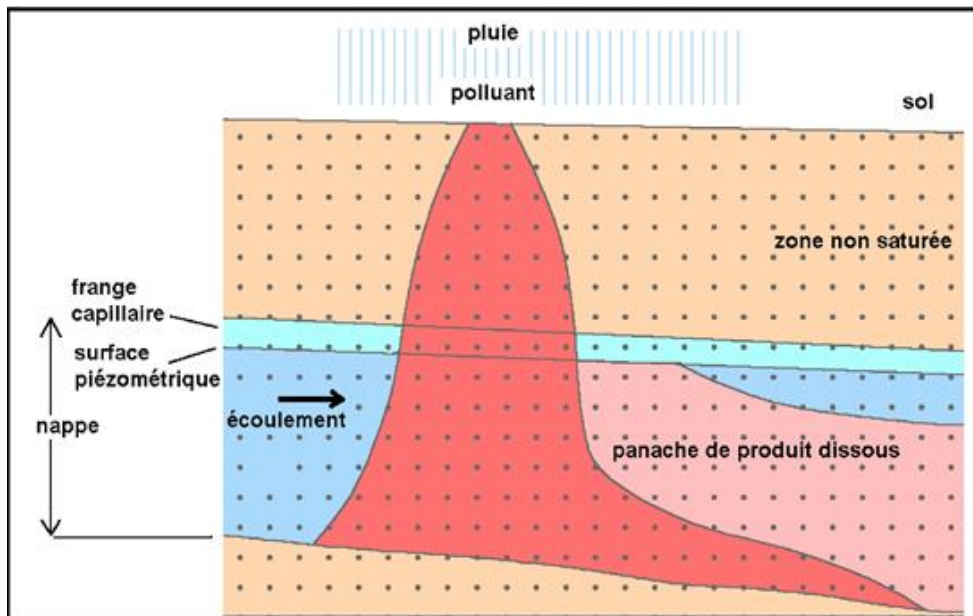


Fig.VI.3 : Pollution de la nappe par un produit plus lourd que l'eau. (N. Bonvoisin, 2001)

VI.5. Concept de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

Dans l'hydrogéologie le terme de la vulnérabilité a été utilisé dans les années 1960 par l'hydrogéologue Français J. Margat et depuis lors il a été utilisé plus largement dans les années 1980 (Haertle, 1983; Aller et al, 1987; Foster et Hirata, 1988).

Actuellement, le terme est communément utilisé partout dans le monde. Une définition commune de la vulnérabilité des eaux souterraines n'a pas été acceptée et les diverses définitions de la vulnérabilité ont été proposées. La plupart d'entre elles sont assez similaires.

VI.5.1. Historique du concept et définitions

La notion de vulnérabilité ne possède pas de définition unique mais diffère selon la sensibilité des approches et des auteurs. Certains la considèrent comme une caractéristique intrinsèque des sols et d'autres parties de l'environnement naturel. D'autres trouvent que la vulnérabilité dépend de propriétés d'un contaminant particulier ou d'un groupe de contaminants. Et d'autres ont tenté d'éviter le complètement le terme vulnérabilité et l'ont substitué par des termes tels que la sensibilité.

Une des premières définitions trouvées dans la littérature est celle d'Albinet et Margat (1970) qui proposent que "la vulnérabilité d'un aquifère soit la possibilité de percolation et de diffusion de polluants depuis la surface du sol jusqu'à la nappe, dans des conditions naturelles".

Villumsen en 1983 proposent que la vulnérabilité des eaux souterraines soit "le risque qu'a une substance chimique, utilisée ou entreposée sur ou près de la surface du sol, d'influencer la qualité des eaux souterraines".

Selon ces auteurs, la vulnérabilité des eaux souterraines dépend d'une série de paramètres, aussi bien dynamiques que statiques. Ils insistent sur le fait que la composition chimique des eaux souterraines peut être utilisée comme indicateur de la vulnérabilité et ils recommandent que les analyses chimiques des eaux soient utilisées comme vérification préliminaire des cartes de vulnérabilité (Foster, 1987).

La vulnérabilité des aquifères à la pollution sensible de différentes parties d'un aquifère peuvent être soumises à une contamination.

La sensibilité des aquifères est liée à la possibilité de contamination. Autrement dit, les aquifères qui ont un degré élevé de vulnérabilité et sont dans des zones de forte densité de population, sont considérés comme les plus sensibles ...".

En 1998, le Comité National Français des Sciences Hydrologiques (CNFSH), note que le concept de vulnérabilité « en général », indépendamment des types de polluant et des processus de pollution, est trop simple ; il doit non seulement faire l'objet d'une classification en différents degrés, mais aussi d'une différenciation en fonction des principaux processus de pollution : suivant l'origine (surface du sol, source de pollution ponctuelle ou diffuse, sous-sol, stockage souterrain, forage, eau de surface polluée) et suivant la durée (pollution accidentelle ou chronique).

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité :

- ❖ la vulnérabilité intrinsèque
 - ❖ la vulnérabilité spécifique.
- la vulnérabilité intrinsèque est le terme utilisé pour représenter.
Les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines (Foster, 1987).
 - la vulnérabilité spécifique est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants.

Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

Zaporozec et Vrba (1994) distinguent également la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique. (UNESCO, 2002).

La vulnérabilité intrinsèque (ou naturelle) est définie uniquement en fonction des facteurs hydrogéologique, des caractéristiques de l'aquifère, des matériaux géologiques et du sol sus-jacent. En plus des propriétés intrinsèques du système aquifère, certains utilisateurs des cartes de vulnérabilité souhaitent également inclure les impacts potentiels liés à l'activité humaine, qui peut conduire à une dégradation dans le temps et dans l'espace. Pour ce concept, Zaporozec et Vrba utilisent le terme de vulnérabilité spécifique (ou intégrée).

VI.6. Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines

Les premiers concepts et la méthodologie des cartes de vulnérabilité des eaux souterraines ont été développés en Europe dans le milieu des années 1960 (Zaporozec and Vrba, 1994b).

Il s'agissait de montrer que la protection naturelle des nappes est variable suivant la localisation et d'identifier les aires pour lesquelles des mesures de protection devaient être envisagées.

A la fin des années 1960 et dans les années 1970, des cartes de vulnérabilité ont été initiées dans plusieurs pays européens (premièrement en France, Tchécoslovaquie et Allemagne) et aux USA.

VI.6.1. Objectifs des cartes de vulnérabilité et échelles de représentation

Les documents cartographiques produits depuis près de trois décennies montrent que les objectifs des cartes de vulnérabilité peuvent être généraux ou, au contraire, beaucoup plus précis et que l'expression cartographique de ces objectifs s'exprime sous des échelles différentes. (Landreau, 1996).

Il peut s'agir:

- D'une sensibilisation ou d'une "éducation" à la protection des ressources en eau souterraine. Les documents cartographiques correspondant sont généralement à petite échelle et la communication est privilégiée par rapport au contenu technique de la carte.
- D'une orientation de politique générale pour la gestion de la qualité des ressources ou pour la police des eaux s'agissant d'apporter des éléments d'orientation, le contenu de la carte peut être plus riche que pour l'objectif précédent mais avec une échelle de représentation du même ordre. D'une aide à la décision en matière d'aménagement. Par aide à la décision, il faut entendre "document permettant d'orienter la décision" lorsqu'on est au stade de l'élaboration de scénarios possibles d'aménagement. Des démarches de planification peuvent être adjointes à l'aide à la décision. Cela peut être, par exemple, le choix de zones à priori favorables ou défavorables à l'implantation de stockage de déchets. Le choix de l'implantation définitive ne se fait bien évidemment pas sur la base de ce document mais suite à des études complémentaires plus détaillées. La carte de vulnérabilité, en association le plus souvent avec d'autres documents, sert à préciser les secteurs dans lesquels doivent porter des études complémentaires pour implanter l'aménagement prévu au mieux et en toute connaissance de cause.
- D'un outil pour l'aménagement ou pour la protection des ressources en eau et des captages. Ce document, associé également à d'autres, doit permettre de prendre une décision

"définitive". Cela nécessite que le document ait une précision suffisante, adaptée aux enjeux des décisions à prendre.

VI.7. Critères de vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenant soit sur la nature ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert. Elle est évaluée en prenant en compte les caractéristiques du sol, de la zone non saturée et de la zone saturée qui contrôlent le comportement des polluants. L'ensemble des critères de vulnérabilité rencontrés dans la littérature sont exposés ci-dessous.

VI.7.1. Critères relatifs aux conditions de surface ou sub surface:

La quantité d'eau qui ruisselle et donc ne s'infiltrer pas dépend entre autres de la pente. Les critères de pédologie comme la nature des sols, leur texture, la perméabilité verticale des sols, vont réguler la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la zone non saturée (ZNS).

VI.7.2. Critères relatifs à la zone non saturée:

La profondeur de la nappe libre (l'épaisseur de la Zone Non Saturée) conditionne de temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physico-chimiques avec l'encaissant) et donc son éventuelle dégradation en cours de transfert. L'amplitude de battement de la nappe, dans la mesure où elle est significative, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe (sol + ZNS). De ce fait elle peut devenir un critère de vulnérabilité.

La perméabilité verticale de la ZNS dicte le temps de transfert ou même peut empêcher le transfert vertical d'un polluant vers la nappe. La structure de la ZNS (variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matières organiques et argile) conditionne la migration de fluides vers la nappe.

VI.7.3. Critères relatifs à la zone saturée:

Ces critères ne sont pas toujours pris en compte dans la détermination de la vulnérabilité. Certains auteurs considèrent uniquement la facilité et la rapidité suivant lesquelles des matières polluantes d'origine superficielle peuvent atteindre l'eau souterraine et ne prennent pas en compte

les conditions hydrodynamiques de la zone saturée. La nappe est alors considérée comme vulnérable, dès l'instant où le polluant l'a atteint.

Les critères relatifs à la zone saturée sont les suivants:

- ❖ Le type de nappe (libre ou captive) joue un rôle important: l'absence d'horizon imperméable entre la surface et le toit d'une nappe libre lui confère un caractère plus vulnérable qu'une nappe captive protégée par des formations imperméables.
- ❖ La transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emmagasinement et le gradient hydraulique déterminent la vitesse de migration des polluants dans la nappe.
- ❖ La piézométrie et le type de relation entre les eaux superficielles et les eaux souterraines (drainage ou alimentation) conditionnent la possibilité de contamination des eaux souterraines.
- ❖ Entre les hautes eaux et les basses eaux, les relations eaux superficielles/eaux souterraines peuvent s'inverser.
- ❖ Les directions et sens d'écoulement de la nappe déterminent les espaces susceptibles d'être atteints par un polluant une fois que celui-ci a atteint la nappe.
- ❖ Le type de système hydrogéologique (transmissif ou inertiel) joue sur les temps de transfert et temps de séjour dans la nappe.

La recharge, c'est-à-dire la quantité d'eau atteignant la Zone Saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette) constitue aussi un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

- ❖ La quantité d'eau en réserve détermine les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe.

VI.7.4. Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone Saturée

Le système de fracturation, les discontinuités verticales telles que les failles peuvent augmenter très sensiblement les vitesses d'infiltration depuis la surface vers la nappe. Le bilan hydrique détermine l'infiltration efficace et donc la potentialité d'un polluant à pénétrer

le sous-sol. Les principaux facteurs le déterminant sont le climat, l'ETP (Evapotranspiration) et la quantité de précipitations. (Landreau, 1996).

VI.8 description des différents méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (N. Schnebelen et al, 2002).

Elles peuvent être classées en trois grandes catégories:

Les méthodes de cartographies à index : basés sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (SIG, par exemple) ;

Les modèles de simulation : ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants (Schnebelen, 2002).

Ils donnent une image de vulnérabilité spécifique de la nappe;

Les méthodes statistiques : elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude. Elles donnent une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe.

Les méthodes de cartographie à index comportent deux types d'approche: les systèmes hiérarchisés et les systèmes paramétrés (N. Schnebelen et al, 2002).

La méthode des systèmes hiérarchisés est basée sur la comparaison d'une zone donnée avec les critères représentant les conditions de vulnérabilité d'autres zones (autres bassins ou autres systèmes aquifères).

Elle est généralement utilisée pour évaluer la vulnérabilité de contextes hydrogéologiques variés à moyenne ou grande échelle (régionale ou nationale);

La méthode des systèmes paramétrés repose sur la sélection de paramètres (ou critères) considérés comme représentatifs pour estimer la vulnérabilité d'une eau souterraine. Chaque critère a une gamme de variation naturelle définie qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Un index est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré de sensibilité relative à une contamination.

Les systèmes paramétrés peuvent être classés en trois principaux groupes:

Systèmes matriciels, systèmes indexés et méthodes de pondération et d'indexation des paramètres. Chacun est adapté à un objectif différent, respectivement: petite échelle d'étude, échelle moyenne d'étude, mais non prise en compte de l'importance relative des critères de vulnérabilité, échelle moyenne d'étude et prise en compte de l'importance relative des critères de vulnérabilité.

VI.8.1 Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères

(Point Count Systems Models, PCSM) sont les plus pertinentes vis à vis des réalités de terrain du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe.

Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle. (Zaporozec et Vrba, 1994).

VI.8.1.1 La méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller et al. en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (Schnebelen et al., 2002).

Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères:

- ❖ D: Depth to groundwater (distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée) ;
- ❖ R: Recharge (recharge) ;
- ❖ A: Aquifer media (nature de la zone saturée) ;
- ❖ S: Soil media (nature du sol) ;
- ❖ T: Topography (topographie, pente en %) ;
- ❖ I: Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée) ;
- ❖ C: Conductivity (perméabilité de l'aquifère).

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité.

L'index de vulnérabilité final (D_i) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante:

$$D_i = D_n D_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p$$

Où : D, R, A, S, T, I, C, sont les paramètres cités plus haut n : notation accordée à chaque paramètre;

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

VI.8.1.1.2 La méthode SINTACS

Elle est dérivée de la méthode DRASTIC, développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Petelet et al. 2000).

Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien:

- ❖ S: Soggiacenza (profondeur de la nappe);
- ❖ I: Infiltrazione (infiltration);
- ❖ N: Azionedel Non Saturo (zone non saturée);
- ❖ T: TipologiadellaCopertura (sol);
- ❖ A: CarratteriIdrogeologici dell' Acquifero (caractéristiques de l'aquifère) ;
- ❖ C: ConducibilitaIdraulica (conductivité hydraulique);
- ❖ S: Acclivitàdella Superficie Topographica (Topographie).

VI.8.1.1.3 La méthode AVI

Développée par l'institut de recherche national d'hydrologie (National Hydrology Research Institute - NHRI) à Saskatoon, Saskatchewan (Canada), la méthode de l'index de vulnérabilité

des couches aquifères (Aquifer Vulnerability Index -AVI) détermine un critère de protection des eaux souterraines.

La méthode AVI mesure la vulnérabilité selon la résistance hydraulique (c) à l'écoulement vertical de l'eau opposée par les formations géologiques situées au-dessus de la couche aquifère.

La résistance hydraulique est calculée à partir de l'épaisseur (d) de chaque couche sédimentaire et de la conductivité hydraulique (k) de chacune de ces couches.

VI.8.1.1.4 La méthode SI (Susceptibility Index)

La méthode SI (Susceptibility Index ou méthode d'Indice de Susceptibilité), qui estime la vulnérabilité verticale spécifique à la pollution agricole (essentiellement par les nitrates et également par les pesticides), a été développée au Portugal par Ribero (2000).

Cette méthode prend en considération cinq paramètres. Les quatre premiers paramètres sont identiques à quatre paramètres déjà utilisés dans la méthode DRASTIC (D : la profondeur de la nappe, R : la recharge efficace de l'aquifère, A : la lithologie de l'aquifère, et T : la pente topographique du terrain). (Batista, 2004; Frances et al., 2002; Oliveira et Lobo Ferreira, 2005; Stigter et al., 2006).

VI.8.1.1.5 La méthode GOD

Ce système a été développé par Foster en 1987, il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée (Foster, 1987).

Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères : Type de nappe (Groundwater occurrence) ; Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ; Profondeur de la nappe (Depth to ground water table).

VI.8.1.1.6 La méthode EPIK

C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques sensu stricto. Elle a été développée dans le but de délimiter.

Les périmètres de protection des captages, conformément à la législation suisse, à partir d'une base cohérente et rigoureuse. Un des avantages de cette méthode est de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis à vis de tout type de contaminant. La méthode est

systématique puisqu'elle propose une analyse détaillée du bassin d'alimentation de la source karstique découpé en un maillage régulier (Doerfliger, 1996 ; Doerfliger et Zwahlen, 1997).

VI.9 Aspects théoriques et pratiques de la méthode DRASTIC

VI.9.1 Introduction

La méthode "Drastic" a été développée par l'association NWWA (National Water Well Association) pour le compte de l'USEPA (U.S. Environnementaux Protection Agency). Conçue entre 1983 et 1987, dans le but d'offrir une base pour l'évolution du potentiel des eaux souterraines, cette méthode a été testée et appliquée à douze régions hydrogéologiques des Etats-Unis d'Amérique (N. Schnebelen et al, 2002).

Elle est basée sur un système de cotation numérique et permet l'établissement des cartes de vulnérabilité qui sont la synthèse des connaissances lithologiques, pédologiques et hydrogéologiques d'une région. Son application nécessite néanmoins la vérification de certaines conditions d'application :

- ❖ La source de pollution potentielle est localisée à la surface du sol ;
- ❖ Les polluants sont entraînés depuis la surface du sol jusqu'à la nappe par l'infiltration efficace ;
- ❖ Dans le cas où la source de pollution serait située en profondeur dans le sol, la méthode demeure valable en modifiant les paramètres affectés par la position de la source de pollution.).

VI.9.2 Les paramètres de la méthode "Drastic"

La particularité de cette méthode réside dans l'attention particulière qui est accordée par les concepteurs, aux 7 paramètres physiographiques et hydrogéologiques qui sont :

- ❖ ▪ La profondeur du plan d'eau dans l'aquifère (D)
- ❖ ▪ La Recharge nette (R)
- ❖ ▪ Le type d'Aquifère (A)
- ❖ ▪ Le type de Sol (S)
- ❖ ▪ La Topographie (T)

- ❖ ▪ L'impact de la zone vadose (I)
- ❖ ▪ La Conductivité hydraulique (C)

Les initiales de ces paramètres forment le terme "DRASTIC").

VI.9.3 Système de cotation

L'indice Drastic est basé sur l'évolution des 7 paramètres suscités. Chaque paramètre est assigné d'un poids relatif fixe dont la valeur, compris entre 1 et 5, correspond à son importance dans le processus d'atténuation des substances contaminants (Gabriel E. et al., 2009).

Un paramètre prépondérant se voit assigner un poids de 5 alors qu'un paramètre ayant moins d'impact sur le devenir d'un contaminant est assigné d'un poids de (Tab.VI. 1)

Tab.VI. 1: Les 7 paramètres "Drastic" et leur poids

Symbole	Paramètres	Poids
D	Profondeur de l'eau	5
R	Recharge efficace	4
A	Milieu aquifère	3
S	Type de sol	2
T	Topographie	1
I	Impact de la zone vadose	5
C	Conductivité hydraulique	3

Une cote 1 correspond aux conditions de moindre vulnérabilité alors qu'une cote de 10 reflète les conditions les plus propices à la contamination.

Un indice Drastic partiel propre à chaque paramètre est alors déduit en multipliant sa cote par son poids relatif.

Indice partiel = poids X cote

L'indice Drastic global résulte de la somme pondérée des indices partiels correspondant à chaque paramètre.

Indice Drastic général = (Dc.Dp) + (Rc.Rp) + (Ac.Ap) + (Sc.Sp) + (Tc.Tp) + (Ic.Ip) + (Cc.Cp)

D'où : D, R, A, S, T, I, C, des paramètres,

c : cote du paramètre considéré,

Dc : est la cote du paramètre D et Dp est son poids.).

VI.9.4 Interprétation de l'indice Drastic

L'indice de vulnérabilité Drastic représente une évolution du niveau de risque de contamination d'une formation aquifère.

Ce risque augmente avec la valeur de l'indice. Celui-ci peut prendre une valeur maximale de 226 et une valeur minimale de 23. Le principal de cette représentation consiste à diviser la valeur indicielle de chaque zone par le score maximum pouvant être atteint (226) en le multipliant par 100 afin d'exprimer la vulnérabilité en pourcentage.).

VI.10 Concept d'unité hydrogéologique

L'application de la méthode Drastic permet d'identifier plusieurs unités hydrogéologiques pour une région donnée. Ces unités sont obtenues après superposition des différentes zones caractérisées chacune par un indice partiel propre à chacun des paramètres Drastic. Les unités hydrogéologiques se distinguent alors par leurs valeurs du degré de vulnérabilité défini par l'échelle d'évaluation de la vulnérabilité.

De plus, sur les cartes de vulnérabilité, une unité hydrogéologique correspondant à une zone géographique bien délimitée pouvant être subdivisée en plusieurs sous-unités qui diffèrent entre elles par un ou plusieurs indices Drastic partiels de un ou plusieurs paramètres.

Les unités hydrogéologiques sont identifiées par une transcription qui englobe une lettre représentant le numéro de code du bassin versant (À, B, C, etc.), un chiffre qui identifie l'unité hydrogéologique proprement dite et un autre chiffre, porté en indice, identifiant la sous-unité (Exemple : unité 2A1, 2A2, 2A3, etc.) (Boufekane .A ,2005).

VI.11 Description des paramètres Drastic

VI.11.1 Profondeur de l'eau

C'est un paramètre déterminant dans le contrôle du transfert de l'atténuation du polluant dans la zone non saturée. Dans le cas d'une nappe libre, la profondeur de l'eau représente la portion du sol entre la limite de la couche végétale et la surface piézométrique libre de la nappe.

Dans le cas d'une nappe captive, la profondeur de l'eau représente la tranche de sol entre la couche végétale et le toit de l'aquifère. Ce paramètre, difficile à évaluer, nécessite souvent des mesures de terrain. Dans le cas d'une nappe semi-captive, c'est à l'utilisateur de décider de travailler avec les conditions d'une nappe libre ou captive, en se basant sur des arguments valables et précis (N. Schnebelen et al, 2002).

VI.11.2 Recharge nette

La recharge nette, correspondant à l'infiltration efficace, est le seul paramètre responsable de la réalimentation des nappes. Elle représente ainsi le moyen de transfert du polluant de la surface du sol vers le milieu aquifère. La vulnérabilité des nappes augmente alors avec l'accroissement des infiltrations. Cependant, cette conclusion prête à confusion dans la mesure où une recharge importante saturerait le sol et la zone vadose, provoquant ainsi une dilution des polluants. Par ailleurs, la recharge reste liée à plusieurs facteurs climatologiques, géologiques, topographiques et hydrologiques. Elle peut être estimée à partir des équations du bilan hydrologique ou déduite de la différence de charge des nappes entre les périodes de hautes et basses eaux. Pour un aquifère donné, la recharge nette ne correspond pas seulement à la part de l'infiltration des précipitations, il faut inclure aussi l'infiltration des eaux d'irrigation, des eaux de ruissellement (relation oued-nappe), des eaux provenant d'autres horizons aquifères situés en profondeurs ou latéralement par rapport à la nappe concernée et éventuellement de l'alimentation artificielles des nappes (Schnebelenn.et al., 2002).

VI.11.3 Nature du matériel aquifère

Le milieu aquifère, ou zone saturée est le lieu approprié où peuvent être stockées des quantités d'eaux importantes. Son rôle dans l'atténuation du polluant dépend de la nature lithologique et texturale des formations qui constituent le milieu aquifère. Le potentiel de pollution est proportionnel au degré de porosité des terrains qui constituent l'aquifère, en particulier la perméabilité d'interstices et des fissures.

Les concepteurs de la méthodologie Drastic ont arrêté une liste de formations aquifères de nature lithologique différente :

a) Argiles massives (argiles schisteuses ou massives) : ce sont des roches sédimentaires à grains très fins (lutites) contenant au moins 50 % de minéraux argileux. En effet, la structure

très fine des grains réduit considérablement leur perméabilité. Le potentiel de pollution y est généralement très faible.

b) Roches métamorphiques et ignées : ce sont également des roches à faible porosité. Cependant, des aquifères peuvent se former dans les niveaux superficiels de ce type de roches qui sont généralement altérées, mais également dans les horizons fracturés. De ce fait, le degré de vulnérabilité de ces roches est sensiblement lié à leur degré de fracturation ou d'altération.

c) Till : c'est une roche formée par la stratification de particules d'argile, sable et gravier, généralement de faible perméabilité. Le potentiel de pollution est fonction du taux de fissuration.

d) Grès massifs : ce sont des roches sédimentaires formées essentiellement de grains de quartz. Le potentiel de pollution est contrôlé par la présence de fissures et le degré de porosité du grès.

e) Calcaires massifs : ce sont des roches sédimentaires carbonatées formées essentiellement de calcites. Leur perméabilité, qui détermine leur sensibilité aux polluants, est strictement liée à leur densité de fissuration.

f) Sables et graviers : ils forment généralement les remplissages de vallées et constituent, généralement, d'excellents réservoirs d'eau souterraine. Leur degré de vulnérabilité dépend en fait de la répartition des pourcentages de gravier et de sable ainsi que de la présence ou non d'argiles qui sont souvent associés à ces dépôts.

g) Calcaires karstiques: ce sont des calcaires à fissures élargies par l'action corrosive des eaux. Ces fissures larges (ou karst) sont le siège de circulations importantes d'eaux à très grande vitesse, ce qui augmente considérablement leur vulnérabilité à la pollution.

h) Basaltes : ils possèdent une forte porosité résultant d'un important taux de fissuration à l'origine d'un potentiel de pollution souvent élevé.

VI.11.4 Type de sol

On s'intéresse à la couche végétale du sol de 1 à 2.5m d'épaisseur, siège d'une activité biologique et chimique intense. Le sol au sens pédologique résulte de l'altération des roches mères. Le SCS « Soil Conservation Service » a établi en 1984 une classification des sols sur la base du potentiel de pollution décroissant :

-
- Peu épais ou absent.
 - Graviers.
 - Sables.
 - Tourbes, matières organiques non décomposés.
 - Couches très minces et/ou en association de couches d'argiles.
 - Terres grasses limono-sableuses.
 - Terres grasses équilibrées en argiles, limons et sables.
 - Terres argileuses, limono-argileuses.
 - Matières organiques décomposées.
 - Argiles non épaisses et non en association.

VI.11.5 Topographie

La variation de la pente des terrains contrôle la possibilité d'infiltration des polluants. On considère que les terrains dont la pente est supérieure à 18% sont caractérisés par une prédominance des ruissellements permettant une évacuation des substances polluantes vers l'aval.

Tandis que les secteurs de pente comprise entre 0 et 6% favorisent l'infiltration d'eau éventuellement polluée.

VI.11.6 Impact de la zone vadose

La zone non saturée de l'aquifère constitue souvent le siège des processus de biodégradation, de filtration, de précipitation, de volatilisation, de dispersion et d'atténuation du polluant. Ces processus sont d'autant plus importants que la perméabilité des terrains de la zone non saturée est faible. Cette perméabilité est étroitement liée à la nature lithologique, à la granulométrie et au degré de fissuration des terrains.

VI.11.7 Conductivité hydraulique

C'est l'aptitude d'un aquifère à permettre le mouvement de l'eau, sous l'effet d'un gradient hydraulique donné dont la direction diffère généralement de celle de l'écoulement. Ce paramètre est étroitement lié à la granulométrie des formations aquifères, il peut ainsi être calculé directement à partir de mesures de terrain ou encore être estimé à partir de la lithologie des formations aquifères.

VI.12 Construction de la carte de vulnérabilité

L'établissement d'une carte de vulnérabilité selon la méthode Drastic se fait selon les étapes suivantes :

- ❖ Constitution d'une banque de données, de la région d'étude sur la base d'un inventaire du patrimoine documentaire (une bonne recherche bibliographique permettant d'évaluer les paramètres, d'investigations éventuelles des terrains pour compléter ou actualiser certaines données (telle que la profondeur de l'eau qui varie en fonction des saisons).
- ❖ Attribution d'une cote à chaque paramètre, qu'est multiplié par un poids relatif.
- ❖ Elaboration d'une carte thématique pour chacun des paramètres considérés.
- ❖ Délimitation sur la carte des zones en fonction des intervalles établis par le système de cotation Drastic.
- ❖ Affectation d'une couleur pour chaque carte thématique du paramètre considéré.
- ❖ Réalisation d'une série de superpositions de sept couches afin de visualiser les intersections des grandes unités hydrogéologiques ainsi que les sous-unités correspondantes.
- ❖ Calcul de l'indice de vulnérabilité général pour chaque unité hydrogéologique obtenue et chaque sous unité déduite.
- ❖ Représentation des limites des différentes unités hydrogéologiques sur un fond topographique et report à l'intérieur de ces unités de leurs numéros d'identification ainsi que la valeur de l'indice général de la vulnérabilité correspondant ;
- ❖ Identification des unités qui se fait par une lettre et des chiffres.

L'attribution des couleurs conventionnelles aux différentes unités hydrogéologiques, permettra de lire la carte synthétique de vulnérabilité ainsi qu'une visualisation graduelle du degré de vulnérabilité : les couleurs rouge, orange, et jaune indiquent les sites à fort potentiel de vulnérabilité et les couleurs bleu, indigo et violet caractérisent les zones moins sensibles.

Tab.VI. 2: Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Très faible	< 80
Faible	80 – 120
Moyen	121 – 160
Élevé	161 – 200
Très élevé	> 200

Tab.VI. 3: Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 101
Moyen	101 – 140
Élevé	141 – 200
Très élevé	> 200

Tab.VI. 4: Paramètres de la méthode DRASTIC

D : Distance à la nappe (m)		R : Recharge (mm)	
Valeurs (m)	Notation	Valeurs (mm)	Notation
0 - 1,5	10	25,5	9
1.5 - 4,5	9	17.5 - 25,5	8
4,5 – 9	7	10 - 17,5	6
9 – 15	5	5 - 10	3
15 – 22	3	0 - 5	1
22,5- 30	2		
> 30	1		
A : Nature de la zone saturée		S : Nature du sol	
Calcaire karstique	10	Mince ou absent	10
Sable et gravier	8	Sables	9
Grès massif	6	Limons sableux	6
Métamorphique altéré	4	Limons	4
Métamorphique	3	Limons silteux	3
Massive shale	2	Argiles	1
T : Topographie (pente)		I : lithologie de la couche vadoze	
Valeurs (%)	Notation	Calcaire Karstique	10
0 à 2	10	Sable et gravier	9
2 à 6	9	Sable et gravier avec silt et	8
6 à 12	5	Grès	6
12 à 18	3	Calcaire	6
> 18	1	Silt et argile	1
0 à 2	10		
C : Perméabilité			
Valeur (m/s)	Notation		
$> 9,4.10^{-4}$	10		
$4,7.10^{-4}$ à $9,4.10^{-4}$	8		
$32,9.10^{-5}$ à $9,4.10^{-4}$	6		
$14,7.10^{-5}$ à $32,9.10^{-5}$	4		
$4,7.10^{-5}$ à $14,7.10^{-5}$	2		
$4,7.10^{-7}$ à $4,7.10^{-5}$	1		

VI.13 Établissement de la carte de vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou

Des cartes indicielles sont réalisées pour chacun des sept paramètres considérés par la méthode DRASTIC, et sur les quelles sont délimitées des zones en fonction des intervalles établis par le système de cotation DRASTIC.

Cette opération s'est accomplie selon la procédure suivante:

- ❖ Création de fond de discrétisation pour les paramètres dont on ne dispose que de données brutes (profondeur de la nappe, Impact de la zone non saturé, Aquifère, conductivité hydraulique), en utilisant un logiciel tel que SIG (ArcGIS). qui permet grâce à des méthodes d'interpolation de cartographier les iso-contour et donc de produire une carte d'isobathe et une carte des perméabilités.
- ❖ Cartographie du contour de la région étudiée par un SIG (ArcGIS).
- ❖ Géo-référencement et ensuite digitalisation des cartes préalablement produites, et celles scannées à partir des cartes originales.

Le logiciel (ArcGIS), donne à l'utilisateur la possibilité de thématiser de façon spatiale.

Les classes issues de l'application du système de cotation DRASTIC.

- ❖ La carte des pentes est réalisée en utilisant le MNT de la région.
- ❖ Pour chaque paramètre, affecter les valeurs indiciaires (poids X cote) aux intervalles de variation établie précédemment.

L'utilisation du SIG a permis d'obtenir des cartes exprimant la variabilité spatiale de chacun des paramètres, et par conséquent celle de l'indice de vulnérabilité qui leur est associé.

VI.13.1 Profondeur de la nappe

La profondeur de la nappe est un paramètre important, qui constitue un facteur déterminant de la vulnérabilité. Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met de temps à atteindre la surface.

Pour la nappe du synclinal d'Aflou, ce paramètre a été déterminé pendant les relevés piézométriques.

Le calcul des indices pour ce paramètre a été fait selon le tableau suivant:

Tab.VI. 5: Notation et pondération du paramètre de la profondeur

Intervalle	Dn	Dp	Dn.Dp
0 ± 1.5	10	5	50
1.5 ± 4.5	9	5	45
4.5 ± 9	7	5	35
9 – 15	4	5	25
15 – 22	3	5	15
22.5- 30	2	5	10

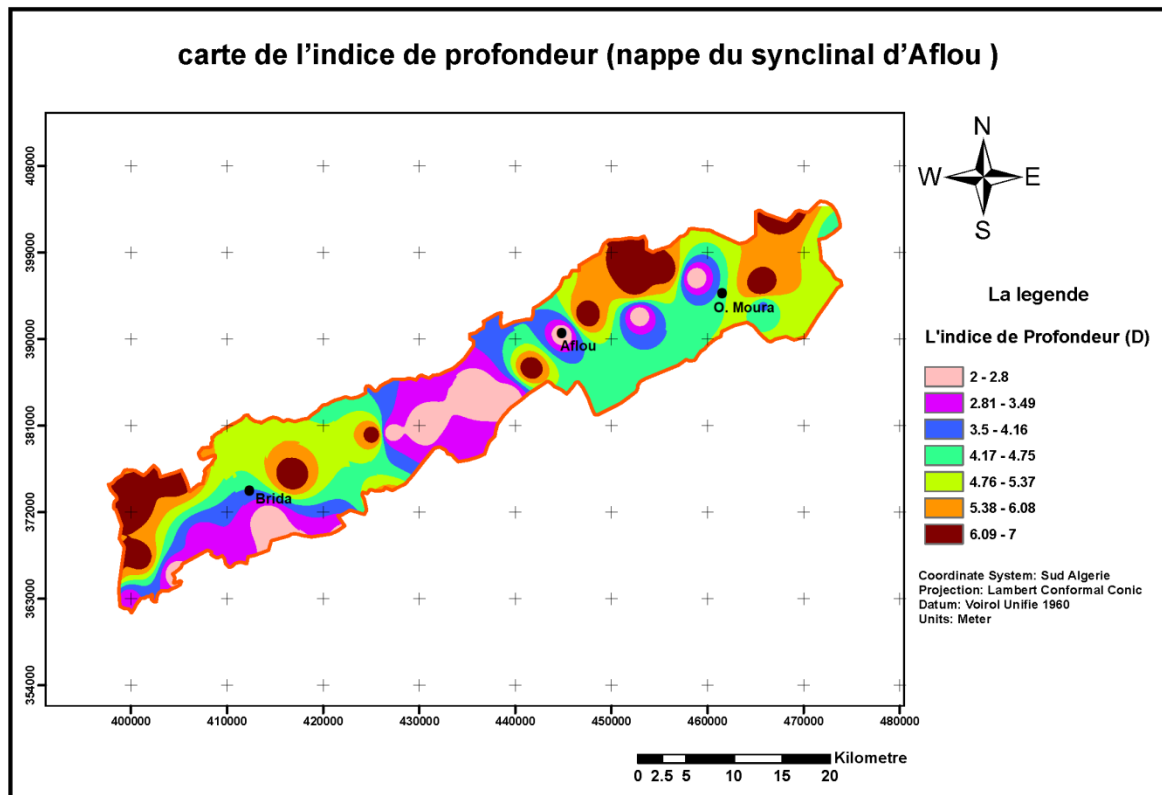


Fig.VI.4:Indice de profondeur

VI.13.2 La recharge efficace

Elle concerne la quantité d'eau qui franchit la surface du sol pour renouveler les réserves d'eau souterraine et entretenir le débit de l'écoulement souterrain, après circulation dans l'aquifère.

Tab.VI. 6: Notation et pondération du paramètre de la recharge

Intervalle	Rn	Rp	Rn,Rp
0 à 5	1	4	4

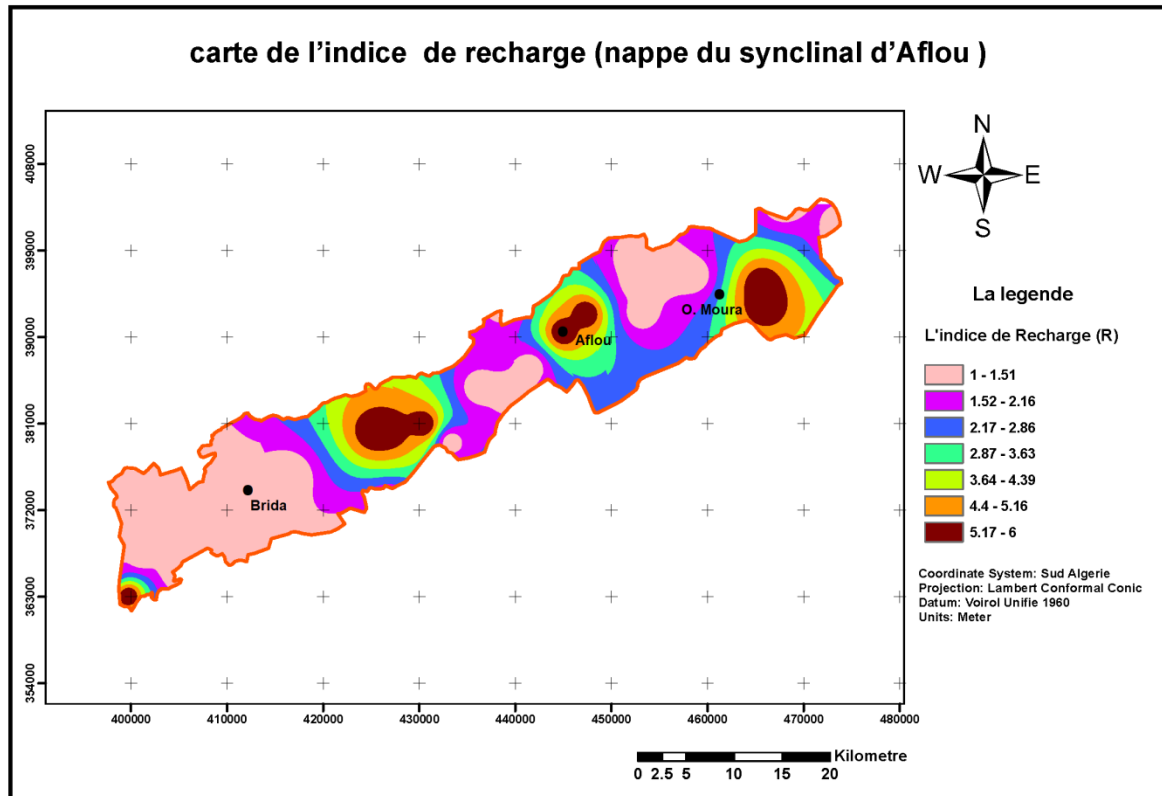


Fig.VI.5: Indice de recharge

VI.13.3 Nature de la zone saturée

Ce paramètre désigne la lithologie de l'aquifère. Son identification a été basée sur les logs des forages et des puits creusés pour le captage de la nappe.

Ces documents ont montré que le matériau aquifère de la nappe du synclinal d'Aflou est constitué essentiellement de sables et graviers et sables argileux.

Les indices correspondant à ce paramètre ont été estimés selon la notation illustrée dans le tableau suivant :

Tab.VI. 7: Notation et pondération du paramètre de la zone saturée

Classes	An	Ap	An.Ap
Gravier et conglomérat	10	3	30
Sables et graviers	9	3	27
Sables argileux	4	3	12

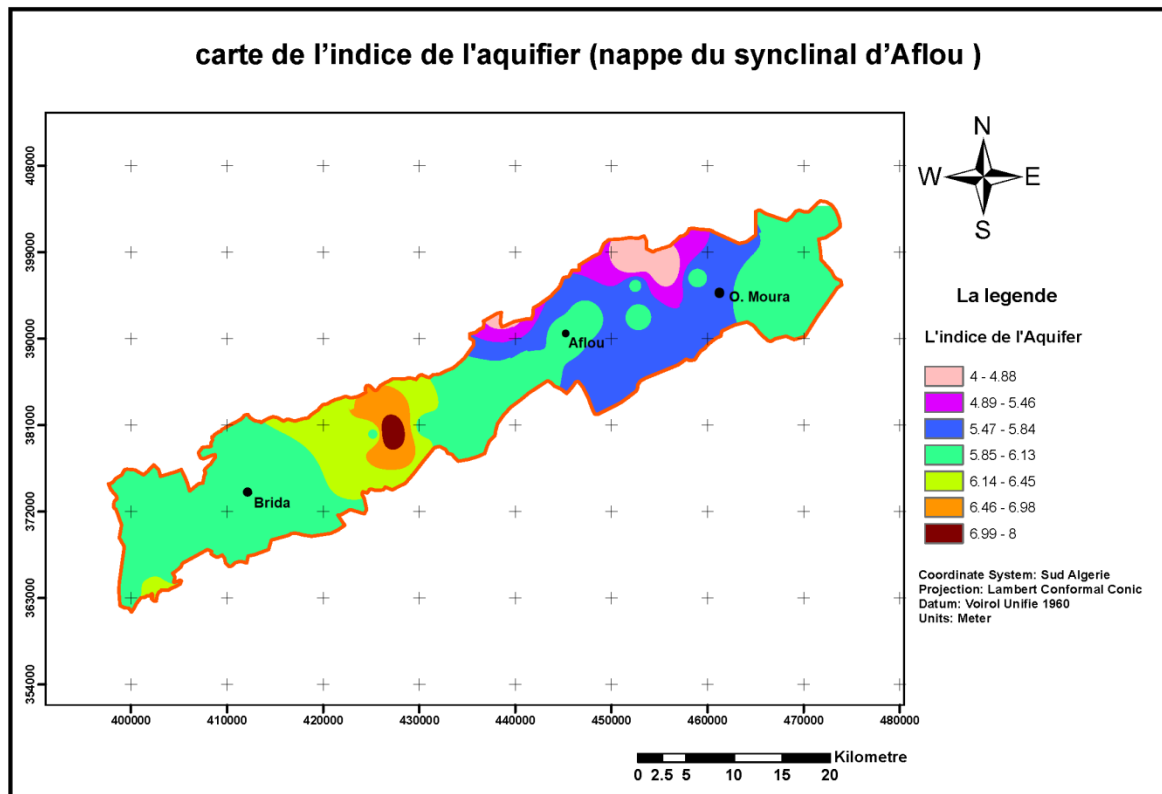


Fig.VI.6: Indice de la zone saturée (milieu aquifère)

VI.13.4 La nature du sol

La nature de la surface du sol influe sur la pénétration des polluants vers l'aquifère. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, Et plus la protection des eaux souterraines est grande.

Ce paramètre joue un rôle important dans la détermination des zones polluées.

Les informations recueillies à partir des cartes pédologiques et des logs de forages ont permis de dégager la nature du sol.

Tab.VI. 8: Notation et pondération de la nature du sol.

Classes	Sn	Sp	Sn,Sp
Conglomérats	10	2	20
Sables et gravier	8	2	16
Argiles et gravier	7	2	14
Argiles	1	2	2

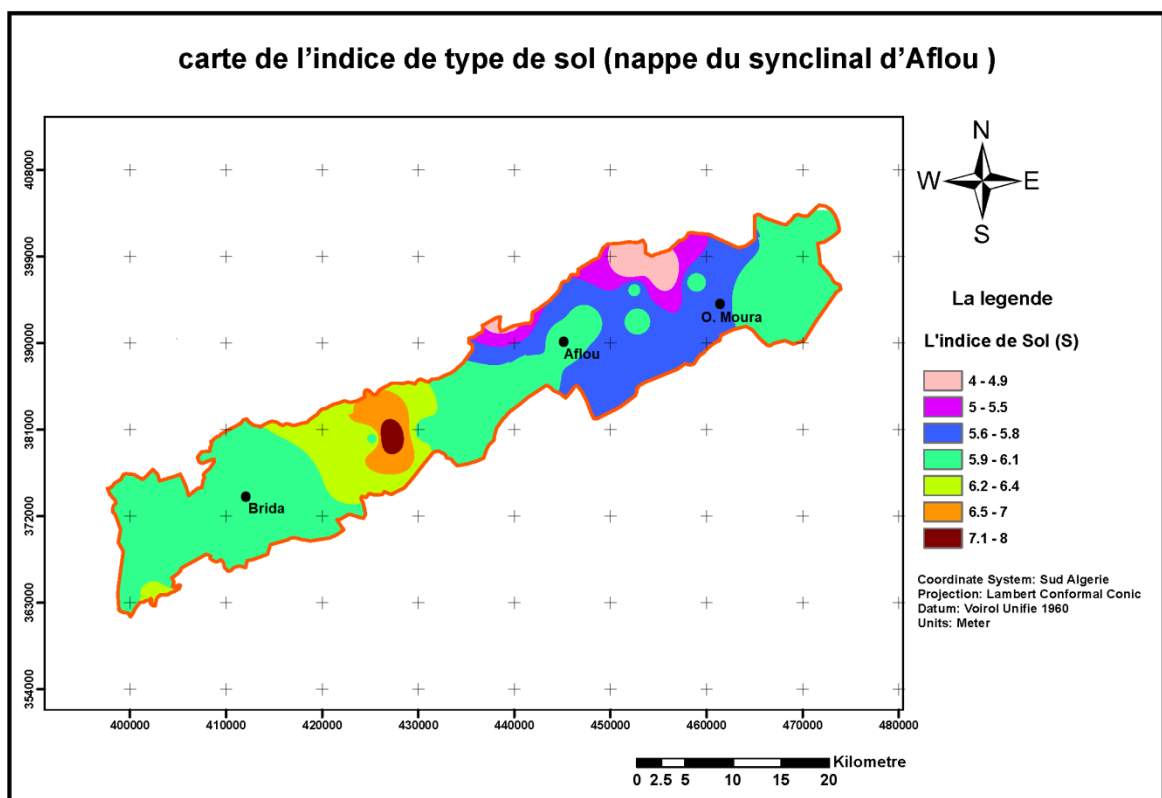


Fig.VI.7: Indice de type sol

VI.13.5 La topographie (pente)

Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible. Les valeurs de pentes ont été estimées en se référant aux cartes topographiques au 1/50000 du synclinal d'Aflou.

L'examen de la carte de vulnérabilité relative à la pente (carte 6) montre deux classes de vulnérabilités : classe forte à très forte. Ainsi, la région d'étude est caractérisée par des pentes faibles ce qui favorise l'infiltration plutôt que le ruissellement et donc une éventuelle pollution qui se produit à la surface serait ainsi entraînée vers la nappe

Tab.VI. 9: Notation et pondération du facteur de la pente

Classes	Tn	Tp	Tn,Tp
0 à 2 %	10	1	10
2 à 6 %	9	1	9

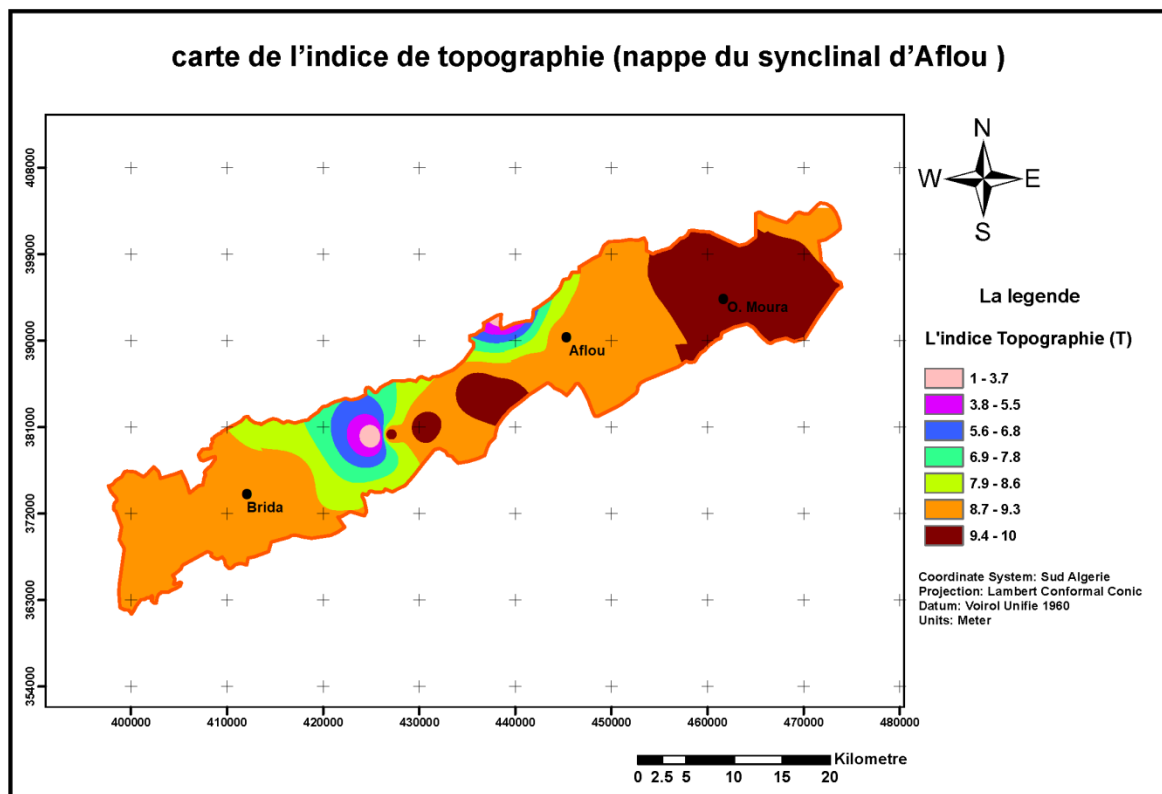


Fig.VI.8: Indice de topographie (pente)

VI.13.6 Nature de la zone non saturée (vadose)

La nature de la zone non saturée constitue un paramètre important dans l'estimation de la vulnérabilité, car elle influe sur la vitesse de propagation des polluants.

Son impact est déterminé à partir de la lithologie des terrains qui la constituent.

Tab.VI. 10 : Notation et pondération de la couche vadose

Classes	In	Ip	In,Ip
Conglomérat	10	5	50
Sable et gravier	8	5	40
Argile et gravier	7	5	35
Argile	2	5	10

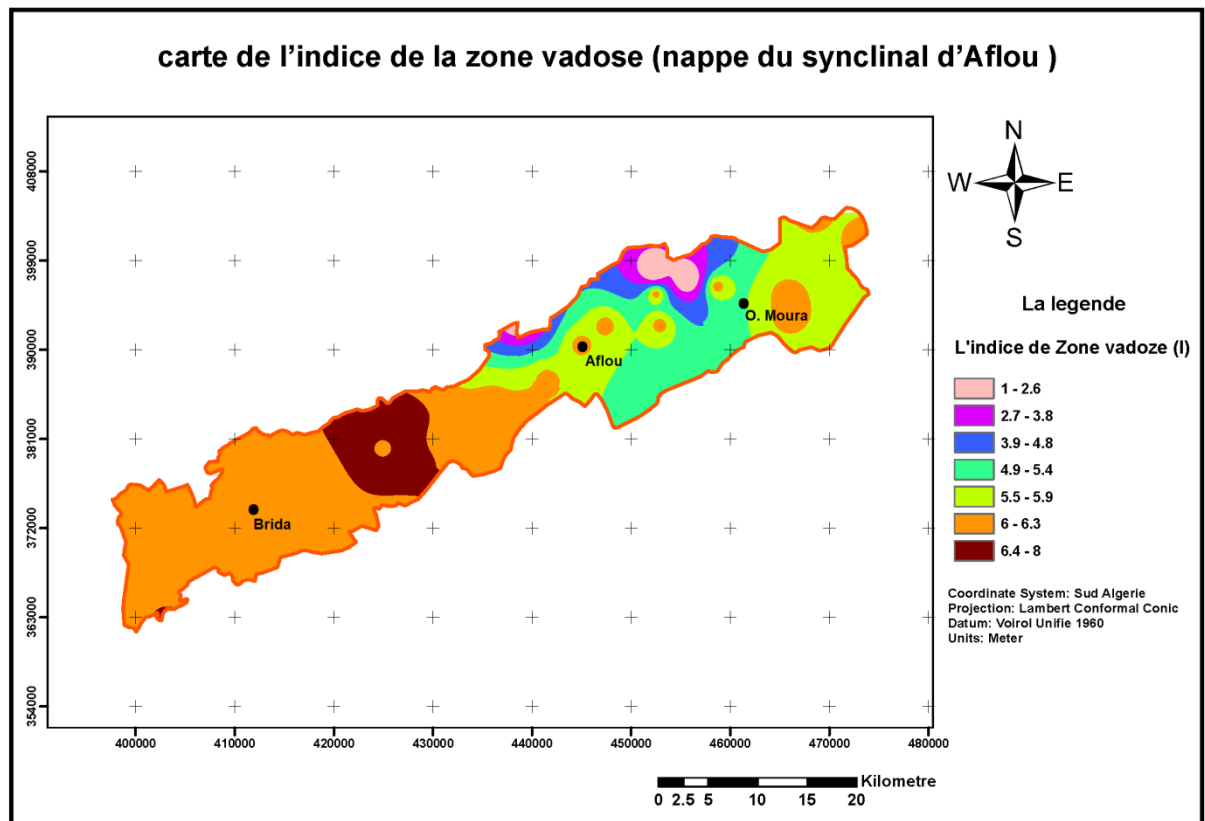


Fig.VI.9: Indice de la zone vadose

VI.13.7 La perméabilité

La perméabilité de la couche aquifère nous renseigne sur la vitesse de propagation des polluants dans la nappe. Plus ce paramètre est important, plus le transfert des polluants est rapide. L'estimation des indices de ce paramètre a été faite selon les classes présentées dans le tableau suivant :

Tab.VI. 11 : Classes et notations retenues pour la perméabilité.

Perméabilité en (10^{-4} m/s)	Cn	Cp	Cn.Cp
0.65 à 0.75	8	3	24
0.35 à 0.65	5	3	15
0.05 à 0.35	3	3	9
> 0.05	1	3	3

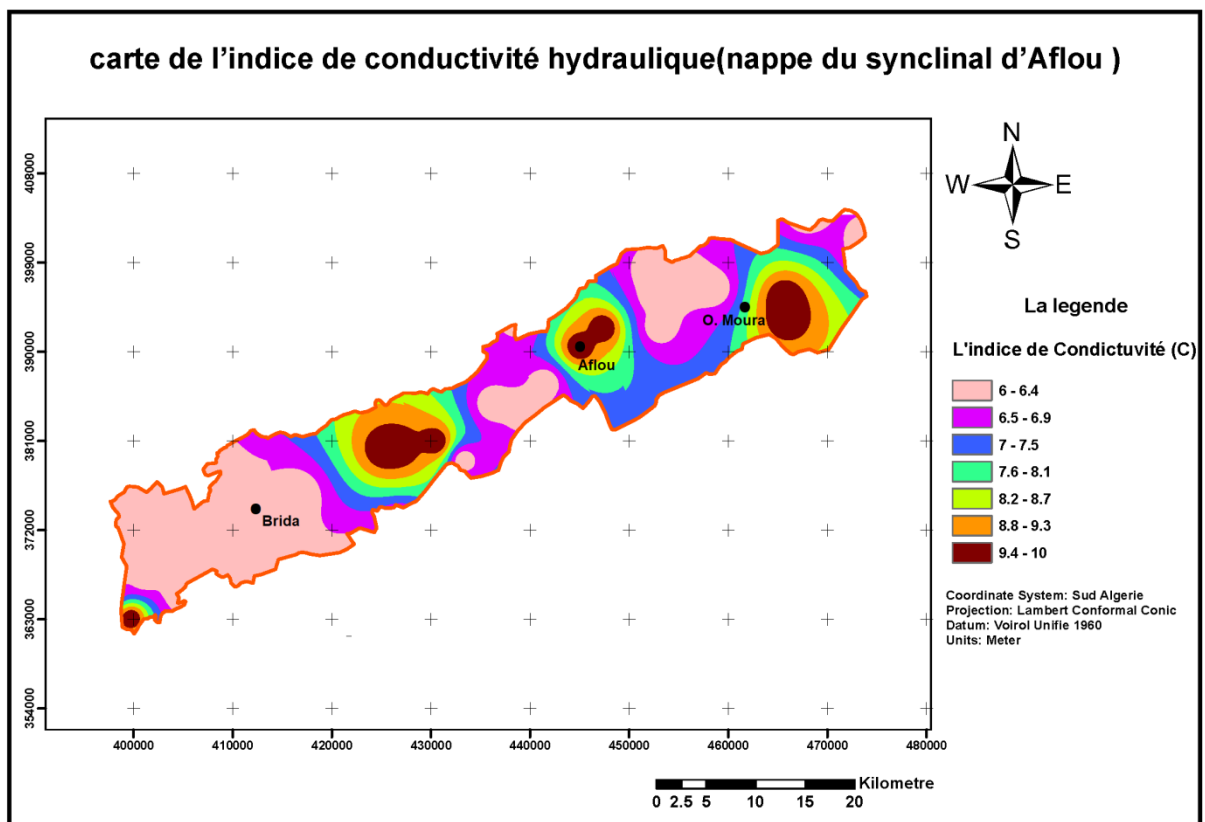


Fig.VI.10: Indices de conductivité hydraulique

VI.14 Carte de carte de vulnérabilité

Cette carte est le résultat de la superposition des sept cartes thématiques relatives aux paramètres DRASTIC. L'indice de vulnérabilité est obtenu par la sommation des différentes composantes en utilisant le logiciel {ArcGIS}. La carte ainsi obtenue, différencie les zones vulnérables de celles qui le sont moins par des nuances de couleurs distinctes.

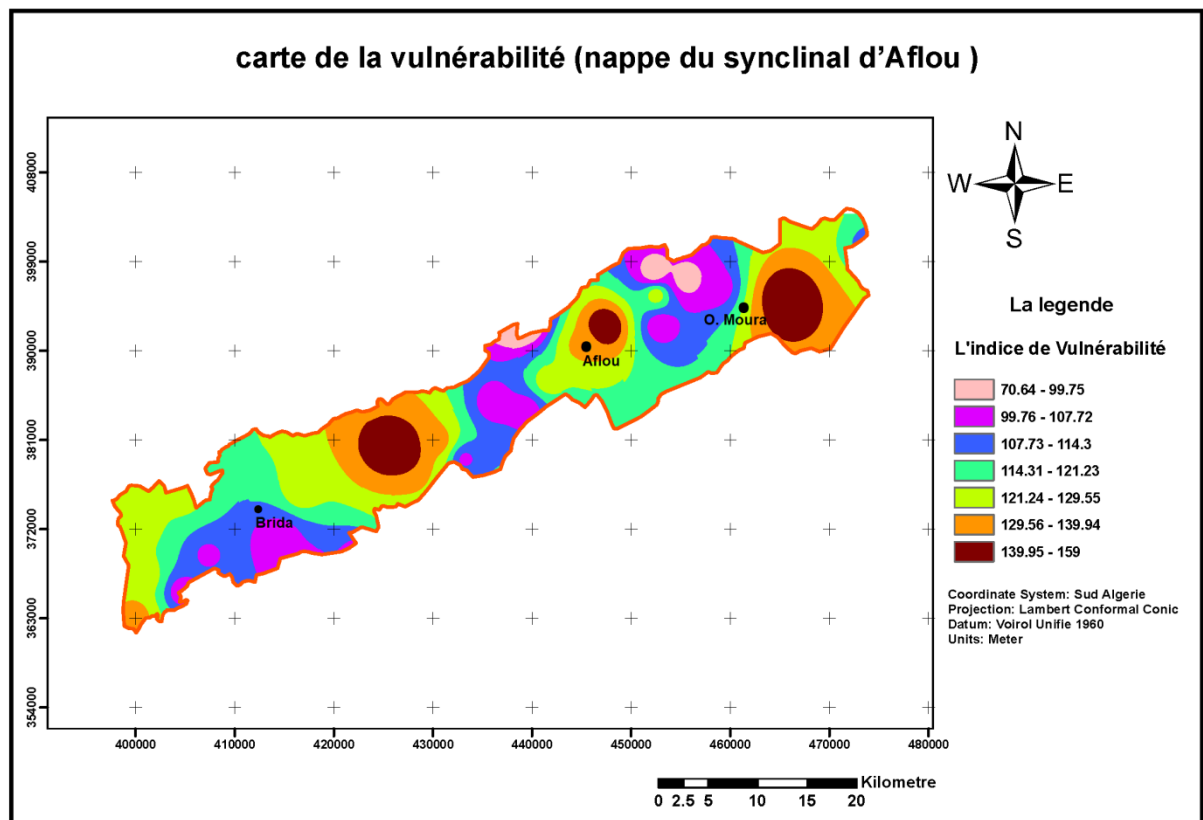


Fig.VI.11: La carte de vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou

VI.14.1. Interprétation de la carte de vulnérabilité

La carte de vulnérabilité qui découle de l'application de la méthode DRASTIC à la région de la nappe du synclinal d'Aflou, permet de délimiter les zones les plus exposées aux pollutions. L'indice de vulnérabilité varie de 70 à 160. Les plages de vulnérabilité utilisées par le MENVIQ (Ministère de l'Environnement du Québec) sont comme suit.

- ❖ $I < 100$ vulnérabilité faible.
- ❖ $100 < I < 150$: vulnérabilité moyenne.

❖ $I > 150$: vulnérabilité forte.

Cette classification, permet de constater la modération de la vulnérabilité de la région étudiée. Les valeurs les plus significatives de l'indice DRASTIC, l'observation de la carte de vulnérabilité figure(IV.9) met en évidence les principales zones qui sont :

1) La première est caractériser par des valeurs de l'indice de vulnérabilité qui atteint 159 (vulnérabilités fortes) la plus importante dans toute la région, ceci est principalement est dû à la présence des sables et graviers qui composent l'aquifère, ajoutés à une nappe plus proche à la surface du sol (1.5m) plus un relief qui favorise une infiltration plus importante vers la nappe, peut en partie expliquée l'accroissement de la vulnérabilité à ce niveau.

Par ailleurs, il est nécessaire de noter, que la dilution pouvant provenir des apports d'alimentation est nul, et en sachant encore que la région est le siège d'une activité agricole importante induisant une utilisation intensive d'engrais, de pesticide et de matières phytosanitaires. Tous ces facteurs, combinés avec une vulnérabilité élevée laisse apparaître un risque grandissant de pollution.

2) La deuxième est caractérisé par des valeurs de l'indice de vulnérabilité comprises entre (139.95 et 150) (vulnérabilité moyenne) due essentiellement à la profondeur de la nappe qui est plus importante qu'au West de la région, ainsi que de la nature lithologique de la zone non saturée (dominance argileuse).

3) La troisième est caractérisé par des valeurs de L'indice DRASTIC variant de 70.76 à 99.97 (vulnérabilité faible). Due principalement à la nature lithologique d'aquifère qui est à dominances argileuse dans cette zone.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'hydrochimie et la cartographie de la pollution des eaux souterraines du synclinal d'Aflou.

Le présent travail a abouti aux conclusions suivantes :

Sur le plan géographique et au Sud des hauts plateaux, l'Atlas Saharien Central (Dj. Amour) constitue une bande de terrains plissés, formant une succession d'anticlinaux et de synclinaux orientés suivant une direction majeure Nord Est – Sud-Ouest. Les monts du Djebel Amour représentent la partie centrale de l'Atlas Saharien limitée au Nord par l'accident Nord-atlasique et au Sud par la flexure Sud-atlasique. La structure tectonique de la région étudiée est marquée par un vaste synclinal à fond sub- horizontal de direction NE-SW, étroit au Nord-Est et devenant de plus en plus large vers le Sud-Ouest. Le synclinal d'Aflou est limité au Nord et au Sud, respectivement, par Djebel Chebka et Djebel Zlagh qui sont des anticlinaux de style coffré aux failles très fracturées.

De point de vue géologique, et au niveau du synclinal d'Aflou affleurent les grès continentaux du Barrémien-Albien, recoupé par sondages sur plusieurs centaines de mètres. La roche est généralement friable avec un ciment calcique. Ces grès sont largement fissurés suivant deux directions majeures d'orientation N 67°E et N 140° E. Plus de 600 puits, dont la profondeur varie de 3 à 850 mètres, sollicitent ces formations. Le centre de ce synclinal est occupé par les formations du Mio-Plio-Quaternaire, formées essentiellement d'argiles rouges, de sables et des conglomérats; l'épaisseur varie de quelques mètres à plus de cinquante mètres au niveau de l'axe de la cuvette

Au plan climatique les trois facteurs principaux qui interviennent dans la définition du régime qui règne sur le Djebel Amour sont :

- La situation géographique: Distant de 270 km de la mer, la région se trouve à la limite méridionale du secteur balayé par le Front polaire et le Front polaire dérivé. De ce fait, les influences Atlantico — Méditerranéennes seront très dégradées, tandis que s'affirme l'emprise Saharienne au fur et à mesure que l'on se déplace vers le Sud.

-
- L'altitude, dont les effets compensent partiellement ceux de la latitude. Au plan des précipitations, nous avons pu noter un accroissement de ces dernières avec l'altitude.
 - L'orientation des versants qui, lorsqu'ils sont exposés aux vents pluvieux se montrent plus humides que leurs revers. Cette orientation des versants conforte l'effet de l'altitude vis-à-vis des précipitations.

La moyenne des précipitations sur l'ensemble du Djebel Amour est de 250 mm, le maximum pourrait atteindre 400 mm sur les sommets les plus élevés. Pour Aflou les précipitations moyennes annuelles sont de 325 mm suivies de Sebgag avec 260 mm, Oued Morra 235 mm et enfin Brida 215 mm.

La température moyenne serait de 18,5 °C avec un minimum moyen de 3,50 °C et un maximum moyen de 23,8 °C. La température la plus basse est enregistrée pendant le mois de janvier avec -2,3 °C, le maximum de 32,2 °C se présente en juillet.

En ce qui concerne les indices climatiques que nous avons été amenés à calculer, ils conduisent à attribuer à la cuvette d'Aflou un climat semi-aride.

L'étude hydrochimique des eaux nous a permis d'apprécier la qualité physico-chimique des eaux notons que quatre faciès dominants sont : le Sulfaté calcique, le Bicarbonaté calcique, le Sulfaté magnésien et le chloruré calcique. Ceci est vérifié par les moyennes des teneurs dominantes des ions suivants : Ca⁺² (7,81 meq/l) ; Mg⁺² (5,77 meq/l) ; SO₄⁻² (7,70 meq/l) ; HCO₃⁻ (4,20 meq/l) et Cl⁻ (4,14 meq/l).

L'examen des cartes en isoteneurs montrent que la composition des eaux est influencée par la nature Lithologique des différentes formations en particulier l'influence des minéraux évaporitiques. D'une manière générale la nature lithologique de l'encaissant influe directement sur le chimisme des eaux:

- Ca⁺⁺, Na⁺, Cl⁻ et SO₄⁻⁻ : Caractérisent essentiellement la minéralisation de l'encaissant, excepté parfois Ca et SO₄ qui peuvent provenir des formations du Portlandien ou du Trias.
- HCO₃⁻⁻ : provient du lessivage des grès du Barrémien, Aptien, Albien après mise en solution de la matrice calcaire.

Au niveau de l'axe de l'aquifère qui coïncide avec celui de la cuvette les eaux présentent un faciès sulfaté calcique et bicarbonaté calcique à l'exception des points situés au niveau des zones de rejet d'eau résiduaire.

Nous retiendrons aussi l'influence des minéraux évaporitiques largement disséminés à différents niveaux mais aussi et surtout celle des remontées de matériaux triasiques que nous avons pu observer en plusieurs points du Djebel Amour.

En se rapprochant des formations du Crétacé Inférieur (Portlandien) et du Jurassique Supérieur (calcaires) le faciès sulfaté calcique, présente des teneurs très élevées en: SO_4^{--} , Cl^- , Ca^{++} et Na^+ .

L'examen des cartes en isoteneurs et l'ACP nous ont apporté la preuve que la composition des eaux était très étroitement liée à la nature lithologique des différentes formations. Elle a mis en évidence l'influence des minéraux évaporitiques sur la minéralisation des eaux souterraines de Barrémien-Aptien-Albien est une pollution anthropique.

Il est à signaler que le problème de pollution se pose dans la région et plus précisément au niveau de l'oued Medsous. Un projet, en cours, de la réalisation d'une d'épuration est programmé dans le but de la protection de la qualité des eaux de l'Oued Medsous contre l'apport des eaux usées provenant de la ville d'Aflou et la protection de la population contre les maladies à transmission hydrique.

Cette future station a pour une Capacité de 92000 EH soit un débit de 10365m³/j à l'horizon 2020. Les eaux épurées de cette future station seront réutilisées à des fins agricoles.

Sur le plan cartographie de la pollution, l'étude réalisée est une cartographie régionale de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution du synclinal d'Aflou. Les résultats de cette cartographie sont des outils d'aide à la décision pour la gestion et l'aménagement du territoire. Toutefois, les valeurs de vulnérabilité sont relatives et spécifiques au territoire évalué. Un secteur ne présente pas une vulnérabilité absolue, mais sa vulnérabilité sera plus faible ou plus forte que celle du secteur voisin. Si l'évaluation de la vulnérabilité donne globalement des résultats utilisables à des fins de gestion, localement il peut y avoir des biais engendrés par le manque d'information ou la mauvaise qualité des données. Il faut donc souligner que les cartes de

vulnérabilité réalisées ici sont statiques, c'est-à-dire spécifiques à la période pour laquelle les données sont valides.

Les résultats obtenus par la méthode DRASTIC appliquée ici, montrent que le territoire présent dans son ensemble trois types de vulnérabilité : forte, moyenne et faible.

La maîtrise des paramètres de vulnérabilité à la pollution de la nappe du synclinal d'Aflou est facilitée par l'établissement de cartes de vulnérabilité qui permettent l'identification des zones bénéficiant d'une bonne protection et des zones sensibles (à surveiller / protéger). Celles-ci nécessitent un inventaire des différentes sources de pollutions, un réseau de mesure de surveillance et d'alerte, une délimitation des périmètres de protection de la ressource et enfin de généraliser les cartes de vulnérabilité aux différentes pollutions, les pollutions accidentelles et les nitrates issus des activités agricoles et industrielles couplées aux rejets urbains et aux décharges sauvages.

L'étude hydrogéologique nous a permis de mettre en évidence les aquifères exploités au niveau de la région d'Aflou. L'étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du synclinal d'Aflou a montré le champ de vision à l'ensemble de la nappe. Elle permet ainsi la prise de mesures et de décision pour la protection, notamment dans la partie couvrant le champ de captage et les eaux destinées à l'irrigation.

En pratique, les cartes de vulnérabilité sont des outils d'aide à la prise de décision pour la mise en place de nouveaux captages, de périmètres de protection, de réseaux de surveillance de la qualité des eaux souterraines. Les différents points abordés ont fait état de la pollution de la nappe souterraine d'Aflou, mais il était difficile d'évaluer l'importance de cette pollution.

Notre approche a permis de préciser l'importance de ce problème et de préciser son origine. Ainsi, la nappe du synclinal d'Aflou semble être fortement contaminée par des nutriments d'origine agricole, suite à l'utilisation de fertilisants plus que nécessaire pour les plantes.

Les résultats de ce travail peuvent ouvrir de nouveaux horizons de recherche scientifique dans des zones semi-arides et arides.

Au futur proche nous comptons terminer l'étude en cours de réalisation sur la cartographie de la qualité des eaux souterraines de la cuvette d'Aflou par l'utilisation de l'indice IQE. Cette

étude vas mettre en évidence le problème de la pollution des eaux souterraine de la cuvette d'Aflou surtout celle d'origine agricole. Elle se base sur la comparaison des indices de qualité des eaux souterraine de l'année 1986 et des années (2011-2018).

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

ANRH : Données climatologiques des stations du Djebel Amour.

Albinet M., Margat J., (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine, Bull. BRGM.

Al-Zabet T, (2008). Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method *Environmental Geology* (2002) 43:203–208

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Aflou 1999-2011 : données des forages (coordonnées, piézométrie, analyse physico-chimique, donnée climatologies).

Aller L., Bennett T., Lehr j.H., Petty R., Hackett G. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution in potential using hydrogeological settings: U.S. Environmental Protection Agency Report 600 2-87 035, 622 p.

Aurousseau P., Gascuel-Oudou C., Squividant H., (1998). Méthode d'évaluation d'un risque parcellaire pour la contamination des eaux superficielles par les pesticides. INRA/ENSAR. (<http://viviane.roazhon.inra.fr/spanum/publica/risque/pest-2.htm#1>) (08/09/04).

Askri H. et al, (2001). Géologie de l'Algérie, Contribution de SONATRACH Division Exploration, Centre de Recherche et Développement et Division Petroleum Engineering et Développement.

Batista S. (2004) : Exposição da água subterrânea a pesticidas e nitratos em ecossistemas agrícolas do Ribatejo e Oeste e da Beira Litoral. Tese de doutoramento em engenharia agronomica, Instituto superior de agronomia, Lisboa, Portugal, 19 p.

Benmouffok B., (2003). La prise en charge de l'irrigation en Algérie. 4ème forum de la gestion de l'eau. Le Caire (Egypte), 2-4 février 2003.

Bettahar A., (2009). Les accidents majeurs de l'Atlas saharien central et les structures associées. Thèse de Doctorat d'Etat, USTHB, Alger, 210 pp.

Bonvoisin N. (2001). Transfert des polluants à la nappe: cas de la Picardie. D.E.S.S. « Qualité et gestion de l'eau », Fac. Sci., Amiens, 60 p.

Bakreti, A. Braud, I., Leblois, E & A. Benali (2013). Analyse conjointe des régimes pluviométriques et hydrologiques dans le bassin de la Tafna (Algérie Occidentale). *Hydrological Sciences Journal*, 58 (1), 133–151.

Bezalgues S. Mardhel V. dörfliker N. (2002). Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe). Phase 1 : méthodologie de détermination de la vulnérabilité, BRGM/RP-51783-FR,44 p.

Bouchnan R. (2015) Vulnérabilité des aquifères fracturés : méthode F-DRASTIC et aspect dynamique Applications aux aquifères d'Angad et de Bou-Areg (Maroc). Thèse de doctorat, univ Université Abdelmalek Essaadi.

Boufekane .A (2005) .Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine de l'Oued Djendjen (W.de Jijel) et modélisation de la nappe.thèse de magister, univ USTBH. Alger.

Boulahouat N. (1993). Etude méthodologique sur la Télédétection des sols en milieu aride, région de Djelfa, Algérie. I.N.R.A, laboratoire de Télédétection, Montpellier, France, 24 p.

B.N.E.H : Alger, barrage de Seklafa dans la wilaya de Laghouat, Etude de faisabilité. C – Hydrogéologie2, Annexes du rapport. Secrétariat d'Etat à l'Hydraulique, Alger.

Castany. G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Dunod université Bordas Paris. France.

Castany G. (1998). Hydrogéologie, principe et méthode. Dunod université Bordas Paris. France.

Coutagne A. et De Martonne. (1958). Evaporation et déficit d'écoulement. Ass. Int. Hydrologie.

Chenafi A. (2013). Cartographie et protection qualitative des eaux souterraines en zone aride, Cartographie et protection qualitative des eaux souterraines en zone aride, cas de milok - metlili, Atlas Saharien central, thèse de magister ;Univ. D'Oran.

Chalouan et al. (2008). The Rif Belt, In : A. Michard et al (Ed). Continental Evolution: the Geology of Morocco. Lecture in Earth Sciences.

Dregne, H., Kassas, M. & Razanov, B. (1991). A new assessment of the world status of desertification. Desertification Control Bulletin (United Nations Environment Program) 20, 6-18.

Doerfliger N. et al (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). Environ Geol, 39(2), pp.165-176.

Dörfliger N., Schombrugk S., Bouzit M., Petit V., Caballero Y., Durst P., Douez O. (2010) - Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole. Rapport intermédiaire, BRGM/RP-59456-FR, 152 p., 82 ill., 2 ann.

-
- El Naqa A (2004). Aquifer vulnerability assessment using the DRASTIC model at Russeifa landfill, northeast Jordan. *Environ Geol* 47:51–62
- Edet AE (2003). Vulnerability evaluation of a coastal plain sand aquifer with a case example from Calabar, southeastern Nigeria. *Environ Geol* 45(8):1062–1070
- E.N.A.G.E.O (1986). Etude géophysique du synclinal d'Aflou.
- E.N.A.G.E.O (1988). Etude géophysique du synclinal d'Aflou.
- Foster S.S.D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy - Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, RIVM, TNO Committee on Hydrogeological Research, pp. 69-86.
- Goudie, A.S., (1987). Change and instability in the desert environment. In: Clark, M.J., Gregory, K.J., Gurnell, A.M. (Eds.), *Horizons in Physical Geography*. Macmillan Education, London, pp. 250–267.
- Haddouche I., (2009). La télédétection et la dynamique des paysages en milieu aride et semi-aride en Algérie: Cas de la région de Nâama. Thèse Doctorat, Univ. Tlemcen, 234 p.
- Hamza, M. H., Added, A., Francès, A., Rodriguez, R., Ajmi, M. & Abdeljaoued, S.(2008). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltine-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est tunisien) selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 21(1), 75–86. <https://doi.org/10.7202/017932ar>
- Hirche A., Boughani A. et Salamani M., (2007). Evolution de la pluviosité annuelle dans quelques stations arides algériennes. *Revue Sécheresse* 2007 ; Vol. 18 N°4 : PP. 314 – 320.
- Halitim A., 1988: Sols des régions arides d'Algérie. OPU, Alger, 384 p
- Jain, M.K., Kothyari, U.C., and Ranga Raju, K.G. (2004). A GIS based distributed rainfall runoff model. *J. Hydrol.*, 299 (1–2), 107–135.
- Kazi-Tani N. (1986). Evolution géodynamique de la bordure Nord-Africaine : le domaine intra-plaque Nord-Algérie. Thèse Doctorat des Sciences, Univ. De Pau.
- Kachi S., Kherici., Kachi N (2007)., Vulnerability and Pollution Risks in the Alluvial Aquifer of Tebessa-Morsott *American Journal of Environmental Sciences* 3 (4): 219-224, 2007.
- Lambs, L. et Labiod, M., (2009). Climate change and water availability in north-west Algeria. Investigation by stable water isotopes and dendochronology. *Water International*, 34 (2), 280–286.

Landreau A. (1996). Contribution à une normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions des eaux souterraines, Rapport BRGM R38846, 28 p.

Lange, J. & Leinbundgut, C. (2003). Surface runoff and sediment dynamics in arid and semi-arid regions. In: *Understanding Water in a Dry Environment: Hydrological Processes in Arid and Semi-arid Zones* (ed. by I. Simmers), 238, 114–150. International Contributions to hydrogeology, Rotterdam: Balkema.

Love D.; Uhlenbrook S., Corzo-Perez G.; Twomlow S.; Van Der Zaag P (2010). Rainfall-interception-evaporation-runoff relationships in a semi-arid catchment, northern Limpopo basin, Zimbabwe. *Hydrological sciences journal*, , vol. 55, no5, pp. 687-703

Le Houerou H.N, (1995). Bioclimatologie et Biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. Diversité biologique, développement durable et désertification. Option méditerranéenne. Série B : études et recherches n 10 ; Cheam. Montpellier, 397 p.

Le Houerou HN., (1993). Changements climatiques et désertisation. *Revue Sécheresse* 1993 ; Vol. N°4 : PP. 95 – 111.

Le Houerou HN., (2005). Problèmes écologiques du développement de l'élevage en région sèche. *Revue Sécheresse*. Vol. 16, N° 2, Juin 2005, PP. 89-96.

Le Houerou HN., (1995). Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. Diversité biologique, développement durable et désertisation. Option Médit. Série B n° 10. CIHEAM & ACCT. 396 p.

Lemière B et Al, (2001). Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte d'Évaluation Détaillée des Risques pour les ressources en eau. Éditions BRGM

Li, Z., and Zhang, K. (2008). Comparison of three GIS-based hydrological models. *J. Hydrol. Engng ASCE*, 13 (5), 364–370.

Margat J. (1968). Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de sa cartographie - Rapport BRGM 68 SGL 198 HYD.

Mangin A. (1971). Etude des débits classés d'exutoires karstiques. *Ann.Speleo*.

Mangin A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrale. *Journal of hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrale. Journal of hydrology*.

Mebarki A. (1984). Ressources en eau et aménagement en Algérie. Office des publications universitaires.

Mechaiguen M. (2005). Bilan hydrologique et ressources en eau de surface du bassin Chellif-Zahrez ; Mémoire de Magister. Ecole nationale supérieure d'Hydraulique Blida.

Mansour H. (2007). Hydrogéologie du central intercalaire et du complexe terminal en domaine aride; exemple des monts des ksour (atlas saharien occidental) thèse doctorat ; Univ d'Oran.

Mahboubi M. (1983). Etude géologique et paléontologique du crétacé post aptien et du tertiaire de la bordure méridionale du djebel amour (atlas saharien central), Thèse 3eme cycle, I.S.T, Univ; d'Oran.

Menani M.R. (2001). Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la method DRASTIC. Science et changements planétaires / Sécheresse. Vol. 12, Numéro 2, Juin 2001 : 95-101, Notes originales

Mohamed S. Moumtaz R. (2008). An extension to the DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquifer of Marrakech (Morocco) Environ Géol DOI 10.1007/s00254-008-1304-2

NADJI, A-M. (1997). Etude sédimentologique, cartographique et néotectonique des formations post-turonniennes de l'Atlas saharien central (région d'Aflou-Laghout). Géodynamique des bassins; Mémoire de Magister, Université d'Oran(1), 302 p.

NADJI, A-M, AIT-OUALI R. (2006). Une approche pour la cartographie géochimique des minéraux argileux des terrains tertiaires de l'atlas saharien central (région d'Aflou). Essai de reconstitution paléogéographique. Bulletin du Service Géologique National; Vol. 17, n° 1, pp. 75 - 93, 13 fig., 1 tableau.

Nas B, Berkta A. (2010). Groundwater quality mapping in urban groundwater using GIS. Environmental Monitoring Assessment. 160: 215–227.

N.Dörfliger, D. Jauffret, S. Loubier (2004). Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche-Comté. Rapport final, BRGM/RP-53576-FR.

Nedjraoui D., (2003). Country pasture, forage resource profiles . edition FAO. Grassland and pasture crops Algérie, pp: 1-29.

Nouar O. (1992). Télédétection dans l'Atlas Saharien Central, structure de réactivation dans le Djebel Amour d'Après l'analyse d'images Landsat et SPOT, Mémoire de Magister, CNTS d'Arzew. P17.

Piscopo G. (2001). Groundwater vulnerability map explanatory map Castelreagh catchment. NSW Department of Land and Water Conservation, Sydney, Australia

Standish-Lee, Perri; Loboschefskey, Erik; Beuhler, Mark (2005): The future of water: identifying and developing effective methods for managing water in arid and semi-arid regions.

: Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2005, Water Environment Federation, pp. 8598-8606(9)

R.A.N. Al-Adamat et al. (2003). Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC Applied Geography 23 (2003) 303–324.

Reminiras G, (1986). L'hydrologie de l'ingénieur; edition Eyrolles, Paris.

Rodier, J. (1996). Analyse de l'eau. Eau naturelles. Eau résiduaires. Eau de mer ,8ème édition, Dunod, Paris.

Roche M. (1963). Hydrologie de surface. Gauthier - villars Editeur – Paris.

Ritter E. (1902). Le Djebel Amour et les Monts des Ouled Nail. Mémoires et bulletins du Service de la carte géologique de l'Algérie

Schumann, A.H., and Geyer, J. (2000). GIS-based ways for considering spatial heterogeneity of catchment characteristics, Phys. Chem. Earth, 25, 691–694.

Seltzer P. (1946). Le climat de l'Algérie, Université d'Alger.

Smati A. et Zebbar Z. (2011). Contribution de l'imagerie ALSAT-2A pour l'étude du réseau hydrographique : zone d'Aflou (wilaya de Laghouat) publication in Agence Spatiale Algérienne.

Seltzer P. (1946) : Le climat de l'Algérie. Travaux de l'institut de météorologie et de physique du Globe de l'Algérie.

Stamboul M. (1986). Hydrologie de la haute vallée de l'Oued Sebgag. Séminaire des sciences de la terre, Alger Dec 1986.

Stigter T.Y., I. Ribeiro, A.M.M. Carvalho Dill(2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal, Hydrogeol. J., 14, 79-99, <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-004-0396-3>

Thornes, J.B., (1994a). Catchment and channel hydrology. In: Abrahams, A.D., Parsons, A.J. (Eds.), Geomorphology of Desert Environments. Chapman & Hall, London, pp. 257–287.

Unganai, L. S. & Mason, S. J. (2002). Long-range predictability of Zimbabwe summer rainfall. Int. J. Climatol. 22, 1091–1103.

Van Dijk, A.I.J.M., and Renzullo, L.J. (2010). Water resource monitoring systems and the role of satellite observations. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 39–55, 2011

Van Stempoot D, Ewert L, Wassenaar L (1993) Aquifer vulnerability index (AVI): a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Can Water Res J* 18:25–37

Verdeil P. (1989). Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie. *Sem. Sci. Terr, Alger*.

WEC Algérie (2007). Petroleum of Algeria. Algeria Well Evaluation Conference.

Zaporozec A. & Vrba J. (1994b): Classification and review of groundwater vulnerability maps. In Vrba J. et Zaporozec A. (Ed.), *Guidebook on mapping groundwater vulnerability, International contributions to hydrogeology*, Verlag Heinz Heise Publisher, Hanovre, 16,21-29.

Zabet T.A., (2002) Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Env. Geol* (2002). 43: 203-208, DOI: 10.1007/s00254-002-0645-5

Zhan, X., and Huang, M. (2004). ArcCN-runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. *Environ. Model. Software*, 19 (10), 875–879.