



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Ould Mohamed Zein

DOMAINE : Science et Technologie

FILIER : Hydraulique

OPTION : Ressource en eau

Thème

**Evaluation de la vulnérabilité a la pollution
moyennant la méthode DRASTIC
(Cas de la nappe du synclinal d`Aflou)**

Jury de soutenance :

President -Mr.TADJ WALID

Examineur -Mr.DJHICHE ABDELKADER

-Mr.GAFSI MUSTAPHA

Promoteurs:

- Mr.Sekkoum mohamed

- Mr.stamboul madani

Année universitaire : 2016 / 2017

Remerciement

Je remercie tout d'abord le bon Dieu qui m'a donné le courage, la volonté et la santé afin d'accomplir ce travail.

Mes vifs remerciements à mon promoteur

M^r. Sekkoum mohamed

M^r.stanboul madani

Je tenais à exprimer ma vifs remerciements et ma profonde gratitude à M^r. Sekkoum mohamed et M^r.stanboul madani voulu je consacré tout son temps pour la réalisation de ce travail, ses conseils et ses observations.

Par ailleurs je remercie tous les enseignants de l'université Amar TeLIDJI qui ont participé à mon formation.

Dédicaces

A ma mère

Je te dois tous l'amour et la gratitude du monde entier.

A mon père

A ma famille

Particulièrement mes frères et sœurs.

A tous mes amis chaque un par son nom

Pour tous je dédié ce travail.

OULD MOUHAMED ZEIN 2017

Résumé :

Dans ce travail on a essayé de traiter la vulnérabilité et le risques de pollution de la nappe du synclinale d'Aflou menacés par de nombreux foyer de pollution (urbanisations, industrie, élevage, activité agricoles etc....). On aboutit à une augmentation de la demande en eau, accompagné d'une pollution d'oued et nappe d'eau souterraine. Etant donné les coûts importants que nécessite la restauration des aquifères contaminés. La protection des eaux souterraines devient alors primordiale. L'étude de la vulnérabilité à la pollution des ressources en eaux se présente comme un outil efficace pour limiter et contrôler les risques de dégradation de la qualité des eux. Notre travail consiste à estimer la vulnérabilité à la pollution des aquifères du synclinal d'Aflou, et l'élaboration d'un document cartographique, dont la simple lecture permet de localiser les zones où la nappe présente une vulnérabilité élevée, et donc les zones où des protections soutenues s'imposent.

Mots clé : Synclinale d'Aflou, Vulnérabilité, Pollution, DRASTIC

Abstract:

This work handles the vulnerability and the risk of the synclinal of aflou groundwater pollution. Threaten by several sources of pollution (urbanisation, industry, breeding, rubbish dump, agriculture activity, etc....) that increase water demand and groundwater pollution. As the price needed to the contaminated aquifers restoration is important, the protection of groundwater becomes then primordial. The study of vulnerability to water resources pollution present the best tool to limit and control the risk of water quality degradation. Our work consists to estimate the vulnerability to aquifer pollution of the synclinal of aflou and the elaboration of vulnerability maps easy to read it and to localize the very important vulnerable

Key word: synclinal of aflou , aquifer , vulnerability, pollution, DRASTIC ,Groundwater, GIS

ملخص :

يتمثل هذا الموضوع في دراسة قابلية التلوث للمياه الجوفية لمنطقة آفلو ، حيث تتأثر هذه المنطقة بمختلف مصادر التلوث الناتجة عن التطور في (العمران ، تربية المواشي ، الصناعة ، النفايات العشوائية ، النشاط الزراعي.....) وهو ما جعل الطلب علي المياه في ازدياد مستمر مصحوبا بتلوث المياه الجوفية، التي تصعب تنقيتها من التلوث، وبالتالي تصبح حمايتها مطلب أساسي. ان دراسة قابلية تلوث المياه الجوفية تعتبر وسيلة فعالة لمراقبة التلوث والحد من مخاطر تدهور نوعية المياه الجوفية بالمنطقة. إن تقدير القابلية للتلوث للمياه الجوفية بإنجاز خرائط بسيطة تسهل قراءتها و تحديدا المناطق التي تتأثر أكثر بالتلوث.

الكلمات المفتاحية : القابلية للتلوث، المياه الجوفية، آفلو ، التلوث.

SOMMAIRE

Liste des tableaux et figures

Résumé

Introduction générale1

CHAPITRE I :

Synthèse bibliographique

I.1. Introduction.....	3
I.2. Pollution des eaux souterraines :.....	4
I.2.1. Principales sources et foyers de pollution :.....	4
I.2.2. pollution d'origine domestique et urbaine	4
I.2.3. Pollution d'origine agricole	5
I.2.4. Pollution d'origine industrielle	5
I.3. mécanismes et facteurs de pollution de l'eau souterraine.....	5
I.3.1. Introduction du polluant dans le sol	6
I.3.2. Migration et évolution du polluant en zone non saturée	6
I.3.3. Mécanismes physiques de l'autoépuration	7
I.3.4. Mécanismes hydrodynamiques de l'autoépuration.....	7
I.3.5. Mécanismes hydro chimiques de l'autoépuration.....	7
I.4. Mécanismes hydro biologiques de l'autoépuration:	8
I.4.1. Mécanismes de l'adsorption et de la désorption :.....	8
I.4.2. Propagation et évolution du polluant dans l'aquifère (mécanisme de la dilution).....	8
I.4.3. Persistance de la pollution.....	9
I.4.5. Cas des polluants plus lourds que l'eau	9
I.5. Concept de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution	11
I.5.1. Historique du concept et définitions.....	11
I.6. Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines	13
I.6.1. Objectifs des cartes de vulnérabilité et échelles de représentation.....	13
I.7. Critères de vulnérabilité intrinsèque	14
I.7.1. Critères relatifs aux conditions de surface ou sub surface:	14
I.7.2. Critères relatifs à la zone non saturée:	14
I.7.3. Critères relatifs à la zone saturée:	14
I.7.4. Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone Saturée.....	15

CHAPITRE II:

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

II.1 description des différents méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :	17
II.2. Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères	18
II.2.1. La méthode DRASTIC	18
II.2.2. La méthode SINTACS	19
II.2.3. La méthode AVI.....	19
II.2.4. La méthode SI (Susceptibility Index).....	19
II.2.5. La méthode GOD	20
II.2.6. La méthode EPIK	20
II.3. Aspects théoriques et pratiques de la méthode DRASTIC.....	20
II.3.1 Introduction	20
II.4- Les paramètres de la méthode "Drastic"	21
II.5. Système de notation.....	21
II.6. Interprétation de l'indice Drastic.....	22
II.7. Concept d'unité hydrogéologique	23
II .8. Description des paramètres Drastic	23
II.8.1. Profondeur de l'eau	23
II .8.2. Recharge nette	23
II.8.3. Nature du matériel aquifère	24
II .8.4. Type de sol	25
II .8.5. Topographie.....	25
II.8.6. Impact de la zone vadose.....	26
II.8.7. Conductivité hydraulique	26
II .9. Construction de la carte de vulnérabilité	26

Chapitre III :

Contexte naturel de la région d'étude

III.1. Présentation de la région d'étude	30
III.2. Situation géographique	31
III.2.1. Historique des travaux	32
III.3. Géologie	33
III.3.1. Aperçu sur la géologie de l'Algérie du Nord	34
III.3.2. La chaîne des Maghrébides	34
III.3.3. Les Hautes Plaines (ou Hauts Plateaux)	35
III.3.4. L'Atlas Saharien	35
III.4. Stratigraphie	36
III.5. Paramètres géomorphologiques du bassin versant	39
III.5.1. Caractéristique de forme du bassin versant	40
III.5.2. Indice de compacité de gravelius	40
III.5.3. Établissement de la courbe hypsométrique	40
III.6. Réseau hydrographique	41
III.6.3. Essai du bilan hydrologique :	42
III.7 Climatologie	43
III. 7.1. Température	43
III. 7.2. Précipitation	44
III. 7.2.1. Diagramme ombro-thermique	45
III. 7.2.2. Indice de De Martonne:	46
III.7. 3. Evaporation	46
III. 7.4. Humidité	47
III. 7.5. Vents	48
III. 7.6. Nébulosité : Représente la fraction de ciel couvert par des nuages	49
III. 7.7. Insolation :	50
III.8. Hydrogéologie	50
III.8.1. Généralités	51
III.8.2. Horizons aquifères	51
III.8.2.1. Le quaternaire	51
III.8.2.2. Aquifère du turonien	51
III.8.2.3. Aquifère du complexe gréseux	51
III.8.2.4 Aquifère du portlandien	52

III.8.2.5 Aquifère du kimméridgien	52
III.8.3. Inventaire des points d'eau	52
III.8.4. Piézométrie.....	53
III.8.5.1. Structure hydrogéologique	53
III.9. Hydrochimie.....	54
III.9.1. Introduction.....	54
III.9.2. Mesures physico-chimiques.....	55
III.9.2.1. pH.....	55
III.9.2.2. Analyse de la carte des résidus secs.....	55
III.9.2.3. Conductivité.....	55
III.9.2.4 DHT (degré hydrométrique total)	56
III.9.3. Potabilité chimique des eaux.....	56
III.10. Caractères chimiques et potabilité des eaux	58
III.11. Cartographie hydro-chimique	58
III.11.1 Rapport caractéristique Mg /Ca	59
III.11.2. Rapport caractéristique S04- /Cl-.....	59
III.11.3. Rapport caractéristique Cl- / HC03.....	59
III.12. Aptitude des eaux a l'irrigation.....	60

Chapitre IV :

Etude de la vulnérabilité de la nappe du synclinal d`Aflou

IV.1.Établissement de la carte de vulnérabilité de la nappe du synclinal d`Aflou	63
IV.2.Profondeur de la nappe	64
IV.3.Larecharge efficace	65
IV.4.Naturede la zone saturée	66
IV.5.Lanaturedu sol	67
IV.6.Latopographie(pente).....	69
IV.7.Naturede la zone non saturée (vadose)	70
IV.8.La perméabilité.....	71
IV.9.Carte de carte de vulnérabilité.....	72
IV.9.1. Interprétation de la carte de vulnérabilité.....	72
Conclusion Général.....	74

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
Figure I.1.	Propagation et évolution du polluant dans l'aquifère	9
Figure I.2	Pollution par un produit plus léger que l'eau et qui atteint la nappe.	10
Figure I.3	Pollution de la nappe par un produit plus lourd que l'eau.	10
Figure III.1	Localisation de la ville d'Aflou par rapport à l'ensemble montagneux du djebel Amour.	30
Figure III.2	Situation géographique de la région étudiée	31
Figure III.3	Situation des principaux Djebels et Oueds dans la région d'Aflou	32
Figure III.4	Schéma structural des Chaînes alpines de la Méditerranée occidentale	35
Figure III.5	Les différentes parties de l'Atlas saharien en Algérie. Carré rouge : région d'étude.	36
Figure III.6	Coupe géologique	39
Figure III.7	Hypsometrique du sous bassin versant aflou	41
Figure III.8	Réseau hydrographique au niveau de la nappe d'Aflou.	42
Figure III.9	Variation mensuelle de la température	44
Figure III.10	Précipitations mensuelles.	45
Figure III.11	Diagramme ombro-thermique de la région d'Aflou.	45
Figure III.12	Courbe d'évaporation moyenne mensuelle.	47
Figure III.13	Humidité relative.	47
Figure III.14	Direction des vents	48
Figure III.15	Durée d'insolation en heures	49
Figure III.16	Localisation du point de prélèvement de la nappe entière.	50
Figure IV.1	Carte Piézométrique.	64
Figure IV.2	Indice de profondeur	65
Figure IV.3	Indice de recharge	66
Figure IV.4	Indice de la zone saturée	67
Figure IV.5	Indice de sol	68
Figure IV.6	Indice de pente	69
Figure IV.7	Indice de la zone vadose	70
Figure IV.8	Indices de perméabilités de la nappe du synclinal d'Aflou	71
Figure IV.9	la carte de vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou	72

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
Tableau II.1	Les 7 paramètres "Drastic" et leur poids	33
Tableau II.2	Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC	27
Tableau II.3	Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC.	28
Tableau II.4	Paramètres de la méthode DRASTIC	29
Tableau III.1	Température moyennes mensuelles et annuelle	43
Tableau III.2	Précipitations moyennes mensuelles et annuelle	44
Tableau III.3	Evaporation moyennes mensuelles	46
Tableau III.4	Humidité relative à Aflou	47
Tableau III.5	Vitesse de vent	48
Tableau III.6	Direction des vents	48
Tableau.III.7	Nébulosité	49
Tableau III.8	Insolation	49
Tableau III.9	Nombre des forages	52
Tableau V.1	Notation et pondération du paramètre de la profondeur.	64
Tableau IV.2	Notation et pondération du paramètre de la recharge.	65
Tableau IV.3	Notation et pondération du paramètre de la zone saturée.	61
Tableau IV.4	Notation et pondération de la nature du sol.	68
Tableau IV.5	Notation et pondération du facteur de la pente.	69
Tableau IV.6	Notation et pondération de la couche vadose.	70
Tableau IV.7	Classes et notations retenues pour la perméabilité.	71

Introduction générale

Introduction générale

En milieu aride à semi-aride les eaux souterraines sont fortement sollicitées. La rareté et l'irrégularité de la pluviométrie et l'augmentation de la demande pour satisfaire les besoins croissants pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture et l'industrie accentueront les contraintes sur cette ressource. La diminution des réserves des aquifères redouble par les problèmes liés à la pollution de cette ressource.

Il est important, dans le contexte environnemental actuel, que des mesures soient prises afin de les protéger de la pollution tout en étant conscient que les activités humaines sont une nécessité au sein de la société. Une des approches d'aide à la prévention de la pollution de l'eau souterraine est l'identification des zones vulnérables. Les cartes de vulnérabilité, ne remplacent pas les mesures de protection des eaux souterraines existantes, mais complètent utilement les informations disponibles pour l'aménagement du territoire.

La nappe du synclinal d'Aflou est sollicitée par un grand nombre de puits traditionnels destinés à l'irrigation des terres cultivées.

Il s'avère très important d'étudier cette ressource afin de la protéger contre toute éventuelle pollution et offrir un document qui aide la future planification et décision en matière d'aménagement.

Dans cette étude nous allons essayer d'établir une carte de vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou, pour déterminer l'état actuel des eaux de la nappe, Pour atteindre ce but nous avons structuré notre travail en quatre chapitres :

- ❖ Le premier chapitre permet d'exposer les principes de base du concept de vulnérabilité et sur la pollution des eaux sous terrains
- ❖ Le deuxième chapitre consiste à présenter les différentes méthodes d'évaluation.
- ❖ Le troisième chapitre présente les contextes naturels de la région d'étude
- ❖ Le quatrième chapitre porte sur l'Etude de la vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1. Introduction :

L'eau souterraine est une ressource naturelle importante à travers le monde. L'importance des eaux souterraines est reconnue depuis longtemps, mais le potentiel de la nappe phréatique soit contaminée à la suite d'activités humaines ou à proximité de la surface terrestre a seulement été reconnu ces dernières années. Avant 1980 environ, on pensait que les sols servis comme des filtres, empêchant les substances nocives déposés à la surface de migrer vers le bas et atteindre les eaux souterraines. Aujourd'hui on sait 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 altération qui la rend impropre à une de ses utilisations ou perturbe l'écosystème aquatique, elle peut être provoquée par différentes sources comme l'utilisation de produits phytosanitaires (insecticide, herbicide, fongicide), les engrais (azotés, etc.), les accidents industriels (fuite de cuve, incendie, etc.) ou routiers (vidange de la cargaison d'un camion), les fuites des réseaux d'égouts, les décharges sauvages de déchets domestiques ou industriels, etc.....

La prévention de la pollution des eaux souterraines, action d'autant plus nécessaire que la décontamination des nappes d'eaux souterraines polluées, est une entreprise longue et coûteuse.

La protection et la préservation de ces ressources sont une nécessité de premier ordre particulièrement dans les zones arides où l'eau souterraine constitue 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)

I.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...

I.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.

I.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 épôts d'ordures ménagères apportent leur lot de charge polluante.

I.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'agricultures 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).

I.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).

I.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.

Chapitre I :

I.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.

I.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.

Chapitre I :

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

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

I.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.

I.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).

I.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 complexion 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.

I.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.

I.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.

I.4.2. Propagation et évolution du polluant dans l'aquifère (mécansime 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 I.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.

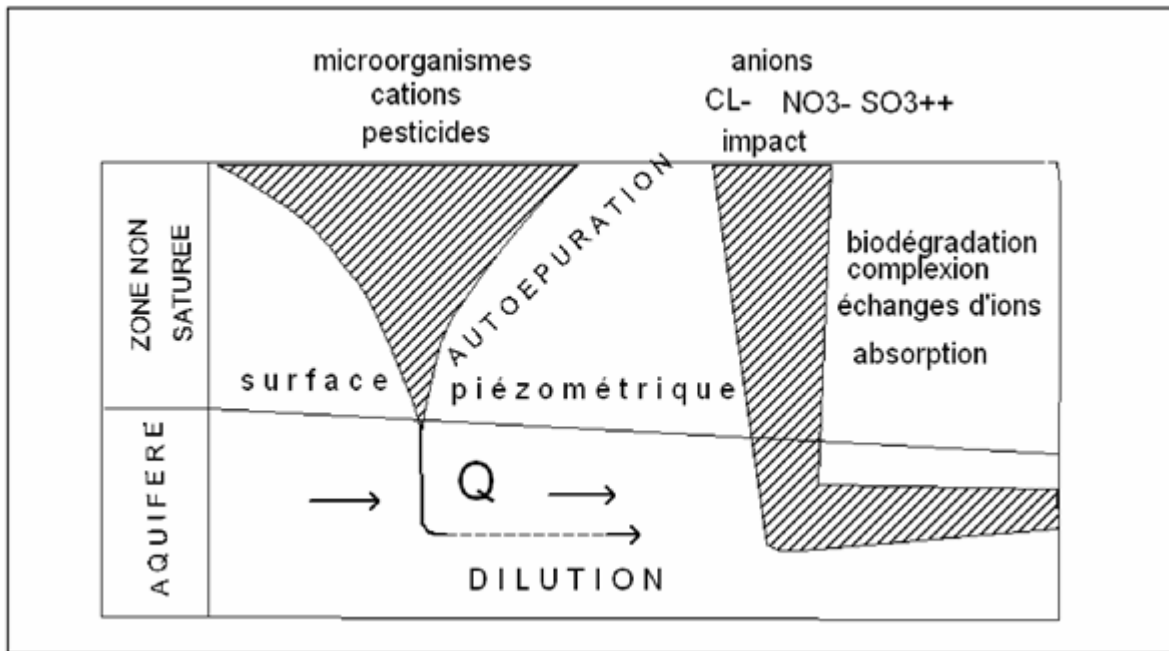


Figure I.1. Propagation et évolution du polluant dans l'aquifère (Mécanisme de la dilution).
(G.Castany, 1982).

I.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. I.2).

I.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

Chapitre I :

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. 3).

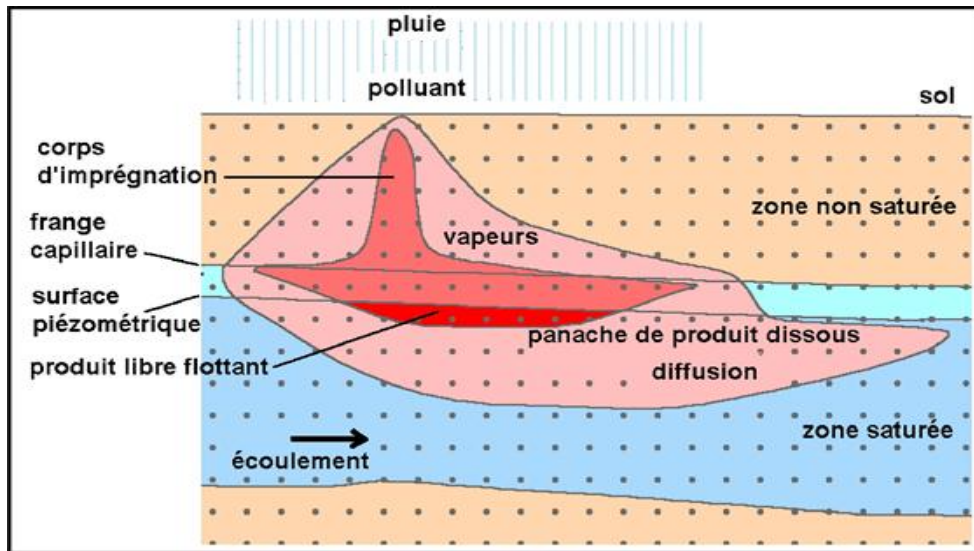


Figure I.2. Pollution par un produit plus léger que l'eau et qui atteint la nappe. (N. Bonvoisin, 2001)

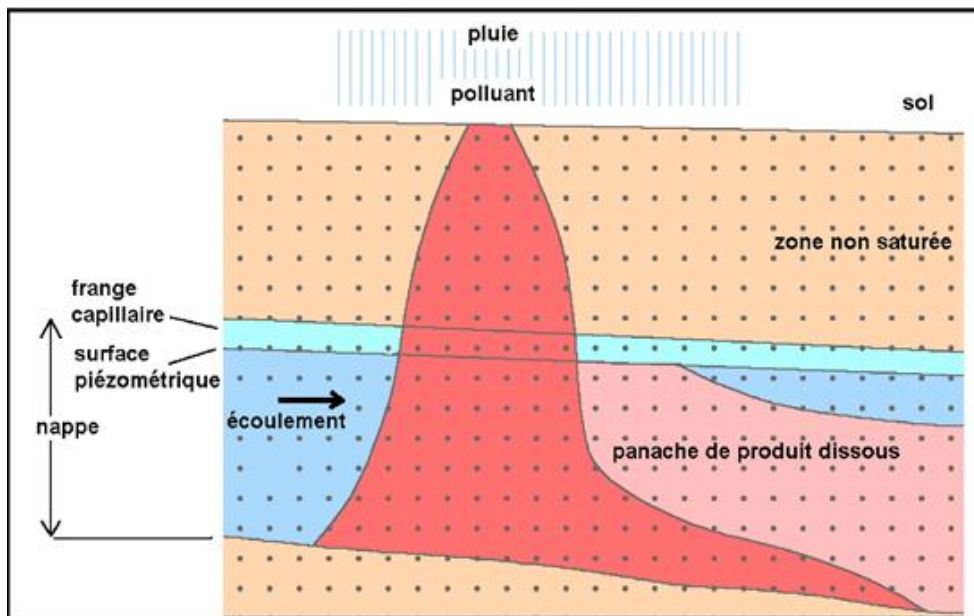


Figure I.3. Pollution de la nappe par un produit plus lourd que l'eau. (N. Bonvoisin, 2001)

I.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.

I.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 lié 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 ...".

Chapitre I :

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 - les 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 - des utilisations présentes et futures de la ressource en eau souterraine. Pour ce concept, Zaporozec et Vrba utilisent le terme de vulnérabilité spécifique (ou intégrée).

I.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.

À 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.

I.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.

I.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.

I.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).

I.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.

I.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.

Chapitre I :

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.

I.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).

Chapitre II

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

II.1 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.

Chapitre II : Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

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.

II.2. 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).

II.2.1. 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 (Di) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante:

Chapitre II : Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

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

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.

II.2.2. 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).

II.2.3. 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.

II.2.4. 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 RIBEIRO (2000).

Chapitre II : Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

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).

II.2.5. 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).

II.2.6. 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).

II.3. Aspects théoriques et pratiques de la méthode DRASTIC

II.3.1 Introduction

La méthode "Drastic" a été développée par l'association NWWA (National Water Well Association) pour le compte de l'USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). Conçue entre 1983 et 1987, dans le but d'offrir une base pour l'évaluation 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 notation 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.).

II.4- 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".).

II.5. Système de notation

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. II.1)

Tableau II.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 = $(D_c \cdot D_p) + (R_c \cdot R_p) + (A_c \cdot A_p) + (S_c \cdot S_p) + (T_c \cdot T_p) + (I_c \cdot I_p) + (C_c \cdot C_p)$

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.).

II.6. 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.).

II.7. 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 (A, 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).

II .8. Description des paramètres Drastic

II.8.1. 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).

II .8.2. 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).

II.8.3. 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. (Boufekane .A 2005).

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.

Chapitre II : Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

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.

II .8.4. 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.

II .8.5. 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.

Chapitre II : Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

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

II.8.6. 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.

II.8.7. 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.

II .9. 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.

Chapitre II : Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

- ❖ 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. (Boufekane .A 2005).

❖ Tableau II.2. Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC

(Boufekane .A 2005)

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Trèsfaible	< 80
Faible	80 – 120
Moyen	121 – 160
Élevé	161 – 200
Trèsélevé	> 200

Chapitre II : Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

Tableau II.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
Trèsélevé	> 200

Chapitre II : Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

Tableau II.4. Paramètres de la méthode DRASTIC. (Boufekane .A 2005).

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	
Calcairekarstique	10	Mince ou absent	10
Sable et gravier	8	Sables	9
Grès massif	6	Limonsableux	6
Métamorphiquealtéré	4	Limons	4
Métamorphique	3	Limonsilteux	3
Massive shale	2	Argiles	1
T : Topographie (pente)		I : lithologie de la couche vadoze	
Valeurs (%)	Notation	CalcaireKarstique	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		

Chapitre III

**Contexte naturel de
la région d'étude**

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

III.1. Présentation de la région d'étude

La région d'Aflou, est située, au cœur de l'atlas saharien, et en même temps, est la capitale du Djebel Amour. Elle est à environ 400 Kilomètres de la capitale, Alger et se trouve presque à mi-chemin, de quatre grandes villes, Laghouat, Djelfa, Tiaret, et El-Bayadh. (Bettahar A.2009).

- ❖ Elle est le chef-lieu de la Daïra, et appartenant à la wilaya de Laghouat, elle se trouve au Nord-ouest de la wilaya, La commune est limitée par:
- ❖ Nord par les communes de Sidi-Bouزيد et Gueltet Sidi Saad
- ❖ Est par les communes de Oued Morra et oued M'zi Sud par la commune d'El-Ghicha
- ❖ Ouest par la commune, de Sebgaç.

La ville d'Aflou est traversée par deux routes nationales (n°23-n°47)

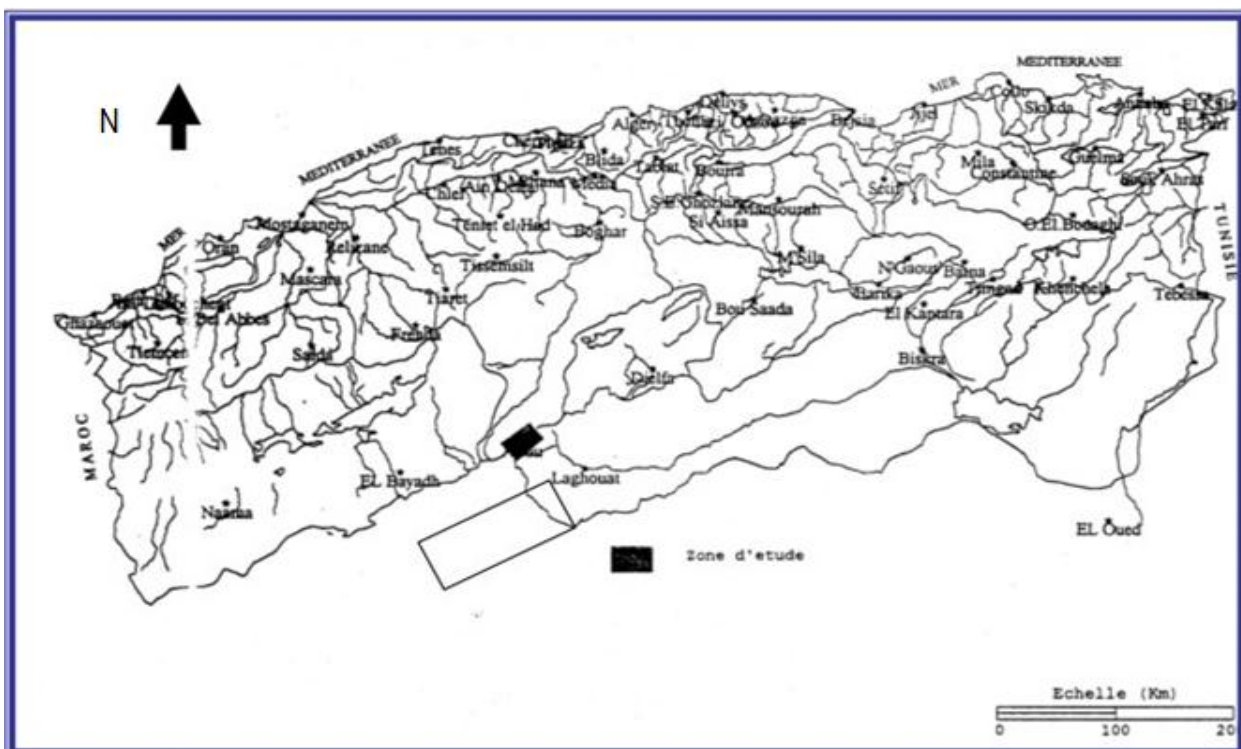


Figure III.1: Localisation de la ville d'Aflou par rapport à l'ensemble montagneux du djebel Amour. Stambouli M.(1983)

III.2. Situation géographique

La zone étudiée appartient au Djebel Amour dans la région d'Aflou et se situe à environ 350 km au Sud d'Alger .

Les Monts du Djebel Amour constituent la partie centrale de l'Atlas saharien, et sont limités au Sud-Ouest par les Monts des Ksour et au Nord-Est par les Monts des OuladNaïl.

L'aspect général de la région est celui de reliefs dénudés allongés suivant la direction SW-NE qui encadrent des vallées ou de vastes steppes planes couvertes d'un tapis végétal constitué surtout par l'armoïse et l'alfa. L'altitude moyenne des vastes steppes est comprise entre 800 et 1200 mètres.

Les crêtes qui forment les reliefs montagneux s'élèvent de 150 à 400 mètres au-dessus des plaines environnantes et atteignent leur maximum d'altitude près d'Aflou (Dj. Guern-Arif : 1721 m; Dj. Sidi-Okba : 1707 m ; Dj. Gourou : 1706 m ; Dj. Zlag : 1583 m)(Durand-Delga M., Fontboté J.M.1980).

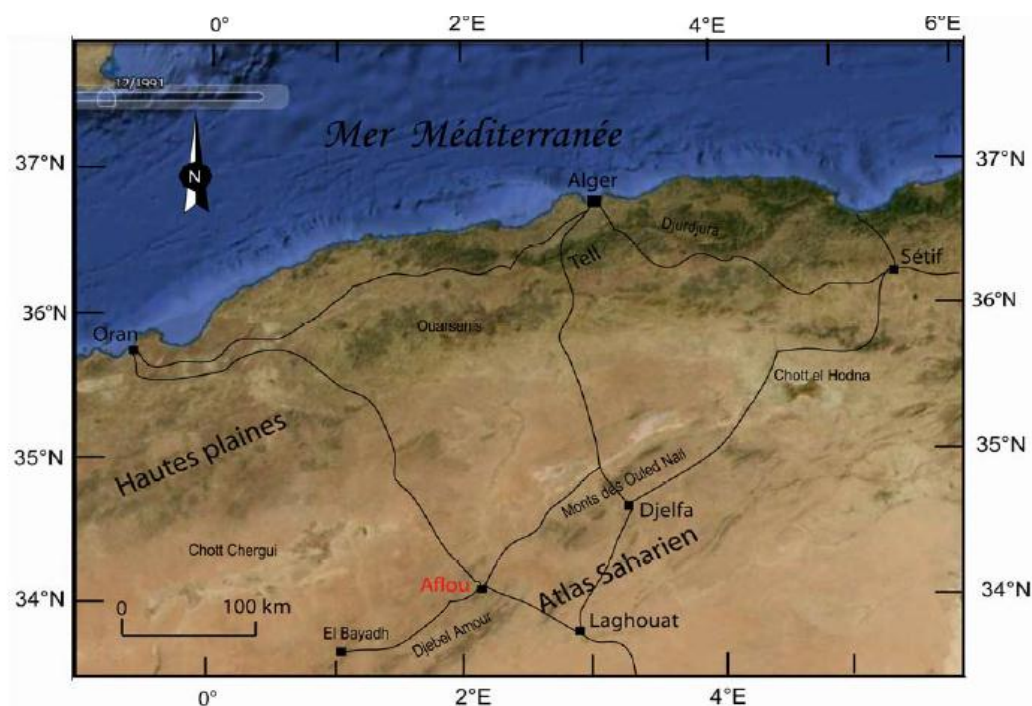


Figure III.2. Situation géographique de la région étudiée (secteur d'Aflou, Djebel Amour, Atlas Saharien). (Google Earth)

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

Sur le plan hydrographique, les cours d'eau ou oueds suivent une ligne de pente insensible à l'œil au milieu de la steppe étendue et s'épanchent 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. Une exception est l'Oued Sebgag située à l'Ouest d'Aflou, qui est l'unique rivière de l'Atlas saharien 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. Un autre oued important, l'Oued Djeddi, naît 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. (Durand-Delga M., Fontboté J.M.1980).



Figure III.3. Situation des principaux Djebels et Oueds dans la région d'Aflou (Monts du DjebAmour). (Google Earth)

III.2.1. Historique des travaux

Les travaux géologiques consacrés à notre zone d'étude sont rares. La première étude géologique détaillée de la région d'Aflou est due à Etienne Ritter (1901) qui donna une description stratigraphique du Djebel Amour et des Monts des Ouled Naïl.

La région a été ensuite étudiée lors de l'établissement de la carte géologique au 1/200.000e de Laghouat par l'IAP sous la direction de J. Guillemot.

Dans le cadre des travaux pour l'établissement de cette carte, Marks et al. (1972) ont publié un article sur la structure d'Ain El Harfi située près d'Aflou (Abed S. 1982).

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

Cet article contient une description géologique de notre zone d'étude.

Les séries du Jurassique du Djebel Amour ont l'objet d'une étude détaillée par S. Abed (1982).

Kazi-Tani (1986) décrit dans sa thèse les séries du Jurassique et du Crétacé de la région.

Enfin, une étude structurale du Djebel Amour en utilisant la télédétection a été réalisée par O. Nouar (1992).

III.3. Géologie

D'un point de vue géologique, l'Algérie est subdivisée en deux domaines qui s'opposent par leur histoire et leur structure géologique :

Un domaine septentrional ou Algérie du Nord, qui fait partie de la chaîne alpine, édifié au cours du Tertiaire et qui demeure encore instable aujourd'hui.

L'Algérie saharienne, domaine relativement stable depuis la fin du Précambrien, constitué d'un socle déformé par les orogénèses éburnéenne et panafricaine, d'une couverture paléozoïque généralement tabulaire affectée localement de plis hercyniens et d'une couverture méso-cénozoïque tabulaire. [

La frontière entre ces deux domaines est délimitée par l'**accident sud-atlasique** qui suit le revers sud de l'Atlas saharien.

La région étudiée (Aflou, Djebel Amour) appartient au premier domaine et fait partie de l'**Atlas saharien**, une chaîne intracontinentale formée au Tertiaire, et qui constitue l'avant-pays déformé de la chaîne alpine d'Afrique Nord ou chaîne des Maghrébines. (Neuilly S.S, Malmaison R, 1963)

III.3.1. Aperçu sur la géologie de l'Algérie du Nord

L'Algérie du Nord est structuré en 3 domaines qui sont du Nord au Sud .

La chaîne alpine d'Afrique du Nord ou **chaîne des Maghrébides** constituée d'unités allochtones charriées sur la marge africaine, la zone tabulaire des **Hautes Plaines**, constituée de terrains méso-cénozoïques tabulaires qui reposent sur un socle paléozoïque plissé et métamorphisé durant l'orogénèse hercynienne et l'**Atlas saharien**.

III.3.2. La chaîne des Maghrébides

La chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogène alpin périméditerranéen d'âge Tertiaire qui s'étend de l'Ouest à l'Est sur 2000 km du Rif à la Sicile.

Dans ce domaine en forme d'anneau très aplati, on distingue classiquement les zones internes, situées à l'intérieur de l'anneau et représentées aujourd'hui par différents massifs, dispersés le long de la côte méditerranéenne et les zones externes situées à sa périphérie.

Les zones internes sont représentées par des « massifs anciens » littoraux, bordés au sud par une « chaîne calcaire » ou « Dorsale ». En Algérie, les socles de Grande et de Petite Kabylie constituent l'essentiel des zones internes. Ces zones comportent un socle gneissique.

Surmonté par une formation de phyllades et un Paléozoïque schisteux allant du Cambrien au Carbonifère inférieur. La couverture mésozoïque et paléogène, localisée à la marge sud de ces massifs anciens, constitue la Dorsale kabyle ou Chaîne calcaire.

Elle est vivement plissée et écaillée. Au cours de l'orogénèse alpine, les zones internes ont été largement charriées vers le Sud.

La zone des flyschs est constituée par un matériel crétacé et paléogène qui s'est déposé dans un sillon qui se situait entre les zones internes et les zones externes. On distingue deux grands groupes de flyschs:

Les flyschs *maurétaniens* les flyschs *massylien* respectivement les plus internes et les plus externes, auxquels s'ajoutent un troisième groupe de flyschs plus récent, les flyschs *numidiens* gréseux d'âge Oligocène supérieur–Burdigalien inférieur. .

Ces flyschs ont été charriés sur les zones externes puis, pour une partie, ils ont été ramenés sur les zones internes par des glissements plus tardifs.

Les zones externes résultent du décollement et du clivage au Miocène de la couverture sédimentaire mésozoïque–paléogène déposée sur la marge nord de la plaque Afrique.

En Algérie, les zones externes telliennes comportent de grandes nappes pelliculaires à matériel marneux du Crétacé–Paléogène, sur une sole gypsifère triasique.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

III.3.3. Les Hautes Plaines (ou Hauts Plateaux)

Entre l'Atlas saharien et la chaîne des Maghrébides s'étend le domaine des Hautes Plaines constitué d'une plate-forme cratonique recouverte de sédiments méso-cénozoïque d'épaisseur relativement faible.

Très étendu à l'Ouest où il constitue la masse des Hautes Plaines oranaises, ce domaine se réduit à l'Est où les Hautes Plaines constantinoises disparaissent entre le domaine tellien et l'Atlas saharien (Durand-Delga M., Fontboté J.M.1980).

III.3.4. L'Atlas Saharien :

L'Atlas Saharien au sens large, est composé par les monts des Ksour, le Djebel Amour et les monts des Ouled Nail à l'Ouest, par les Zibans au centre et les Aurès à l'Est.

Il s'agit d'une chaîne intracratonique d'âge Tertiaire orientée Nord-Est - Sud-Ouest, délimitée par deux lignes de fractures : l'Accident Nord-atlasique et l'Accident Sud-atlasique. [

L'orogénèse atlasique est l'héritage d'un sillon subsident où la sédimentation mésozoïque, soit marine mais de faible profondeur, soit continentale, atteint une épaisseur de 3-4 km, dépassant même 6 km dans le sud du Constantinois (Bouillin et al.1970).

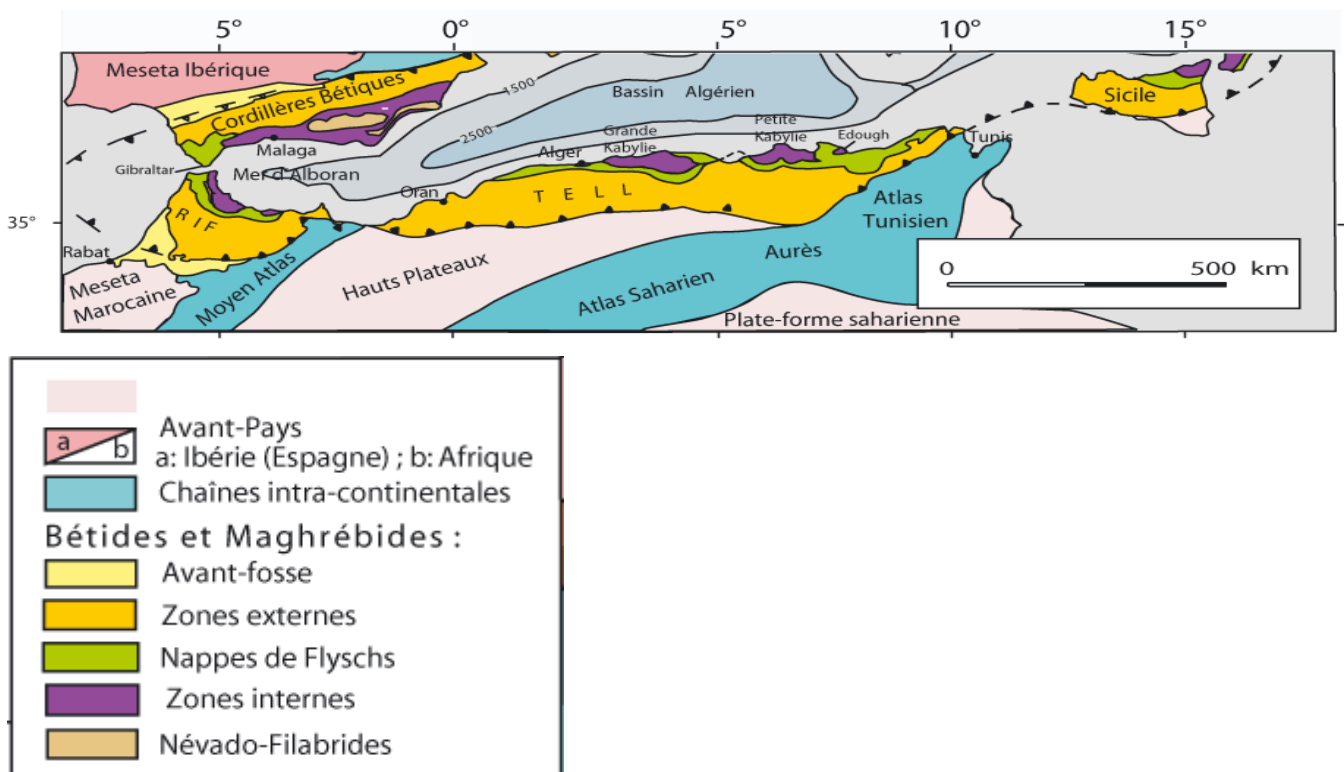


Figure III.4. Schéma structural des Chaînes alpines de la Méditerranée occidentale(Chalouan et al.2008).

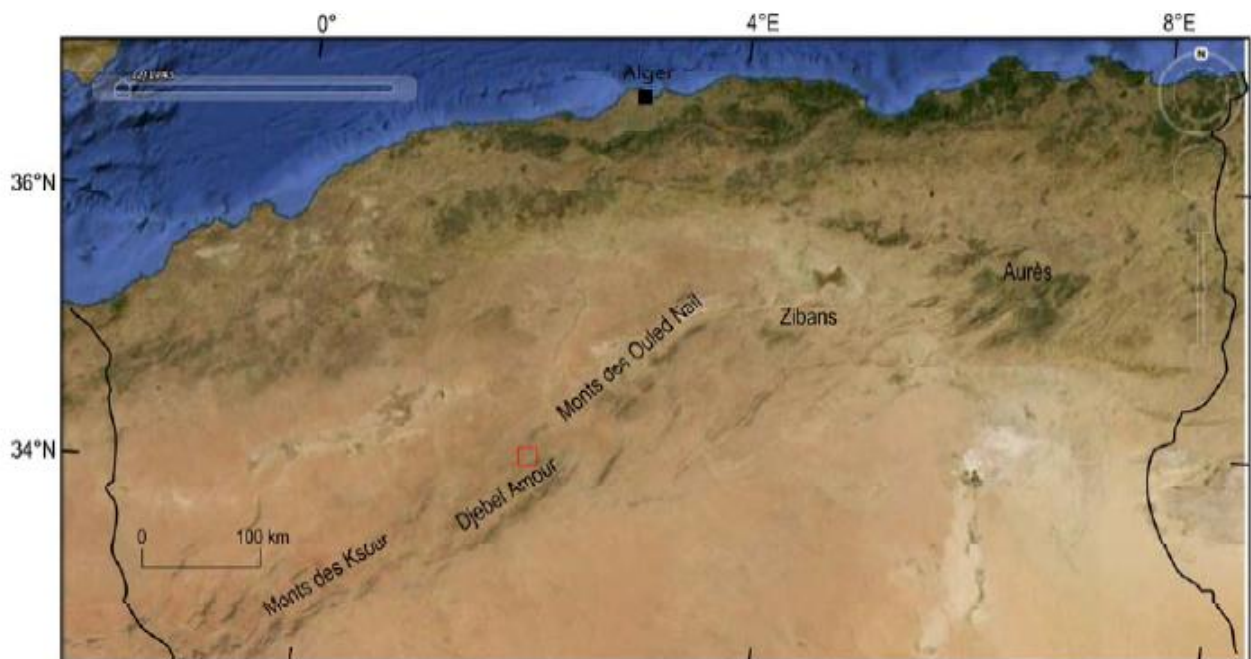


Figure III.5. Les différentes parties de l'Atlas saharien en Algérie. Carré rouge : région d'étude. (Google Earth)

III.4. Stratigraphie

Les montagnes du djebel Amour forment un nœud orographique très important, et constituent un ensemble de plis plus ou moins individualisés. Ils enserment une cuvette synclinale au centre de laquelle se trouve la ville d'Aflou.

Vers le nord on rencontre le djebel Sidi Okba (1707) dont le sommet est formé de calcaireau sud djebel Zlag (1580 m) qui sépare le synclinal d'Aflou du plateau de la Gaada.

Au Sahara et au début de l'ère secondaire les reliefs formés sont aplanis ; les terrains enlevés sont exportés au nord et vont combler les zones de subsidences. Durant l'ère secondaire la mer couvrait en majeure partie le Maghreb ; les grands géosynclinaux de l'atlas Saharien commencent à être comblés de sédiments dès l'ère secondaire, peu profond vers le nord.

Au crétacé la mer va couvrir la plus grande partie de l'Afrique du Nord, elle l'évacuera au début du Tertiaire. Les dépôts terrigènes et chimiques offrent une remarquable sédimentation.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

- **-LE TRIAS :**

- **-LE POINTEMENT DES TRIAS D'AIN FOURENE :**

Situé sur la route d'Aflou el Ghicha, il est constitué de roches vertes sous forme de filons en grains fins et légèrement modifiés au contact des calcaires jurassique. Ces filons de 1 à 2 mètres et sur une dizaine de mètres de long se trouvent à l'intérieur des marnes salifères et gypse. Cet affleurement se trouve enserré par l'anticlinal du djebel Chebka et djebel Zlag.

- **LE POINTEMENT DE DJEBEL ZLAG :**

En amont de l'Ain djeneb et le long de l'axe anticlinal du djebel Zlag on rencontre un affleurement de gypse et de sel qui forme les berges de l'oued M'zi d'une hauteur de quelques mètres.

- **LE POINTEMENT DE GOUROU :**

Il existe de nombreux petits pointements localisés dans les fonds et sur les bords des ravins souvent encaissés. Ils sont formés de gypse et micro diorites.

- **LE JURASSIQUE :**

- **LE KIMMÉRIDIEN**

- **KIMMÉRIDIEN GRÉSEUX :**

Il occupe le cœur des anticlinaux, c'est au niveau de l'anticlinal de Taouiala Kef Labiod au nord de AinSdi Ali, Djebel Zlag qu'affleurent ces grès. D'après les forages que nous avons effectués à Taouiala et Kef Labiod, et tout récemment à El Ghicha, l'épaisseur de ces grès varient d'un endroit à un autre. Nous avons noté une épaisseur de 100 mètres au niveau de Taouiala et plus de 200 m à Kef Labiod.

- **KIMMÉRIDIEN MARNO-CALCAIRE :**

La série présente une épaisseur de 100 m au niveau de djebel Djéhaifa et l'anticlinal de Taouiala au niveau de ses structures la séries se présente comme suit :Des calcaires sous forme de bancs métriques alternant avec des marnes vertes gypseuses.

Une succession de calcaire et marno-calcaire de couleur grise, des marnes parfois feuilletées de couleur grise dans lesquelles s'intercalent des bancs de calcaires.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

- **LE PORTLANDIEN :**

Cette série à une épaisseur de 200 m elle débute par :

Une assise calcaire, la roche est homogène dure, de couleur grisâtre à jaunâtre.

Des marnes vertes avec bancs de calcaires sous forme de plaquettes.

Le portlandien se termine par des bancs de calcaires bien visibles et forme parfois de véritables corniches. Ces calcaires à lumachelles deviennent parfois oolitiques et prennent des formes plus régulières.

Les terrains anciens du jurassique occupent généralement les cœurs des anticlinaux. Dans le djebel Amour les faciès calcaires, calcaire dolomitique se présentent surtout sous forme de bancs plus ou moins épais et mal lités. Cette épaisseur varie du mètre à quelques mètres. A la partie supérieure le calcaire spathique, de couleur grise, rugueux à la surface et au niveau de la partie supérieure, ce calcaire s'alterne avec des marnes parfois durcies de couleur verte et bleue.

Les couches de la partie supérieures sont situées immédiatement au-dessous d'un ensemble puissant de grès sans fossiles. Dans la chaîne du djebel Sidi Bouzid le bord de l'oued M'zi et le djebel Lazreg des fossiles caractéristiques du jurassique ont été rencontrés. la faune nombreuses et variée a suffi pour déterminer cet étage avec certitude.

- **LE CRÉTACÉ :**

- **LE BARREMIEN-VALANGENIEN :**

Dans le djebel Amour cet étage est représenté par un complexe très puissant de grès, présentant un faciès habituel de grès à stratifications entrecroisées allant de quelques centimètres à plusieurs mètres. La roche est friable avec un ciment calcaire.

C'est une série uniforme à grains grossiers qui en beaucoup de points contient de nombreux galets de quartz de diamètre variable allant de quelques millimètres à 2-3 centimètres. Ces grès sont largement fissurés suivant deux directions majeures d'orientation N60°E et N130°E. ce sont ces grès qui couvrent les plus grands espaces et constituent la cuvette du synclinal d'Aflou. Ces grès sont largement affectés par une tectonique cassante.

Les forages effectués au niveau du synclinal d'Aflou profonds de 900m sont restés en permanence dans les grès.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

• ALBIEN – APTIEN :

Cet étage commence à affleurer au pied de la pente qui forme le djebel de Sidi Okba, Le kef Gourou

A la partie supérieure on trouve une brève alternance de marnes calcaire et calcaire gréseux cet ensemble est attribué à l'Albien supérieur. Puis des grès en gros bancs très faiblement inclinés, de 2 à 6 mètres séparés par des lits marneux de l'ordre du décimètre ; le tout est attribué à l'Albien inférieur. Au-dessous apparaissent des calcaires jaunes marneux. Ces calcaires présentent des niveaux fossilifères. Cette barre de calcaire est attribuée à l'Aptien (Askri H. et al, 2001).

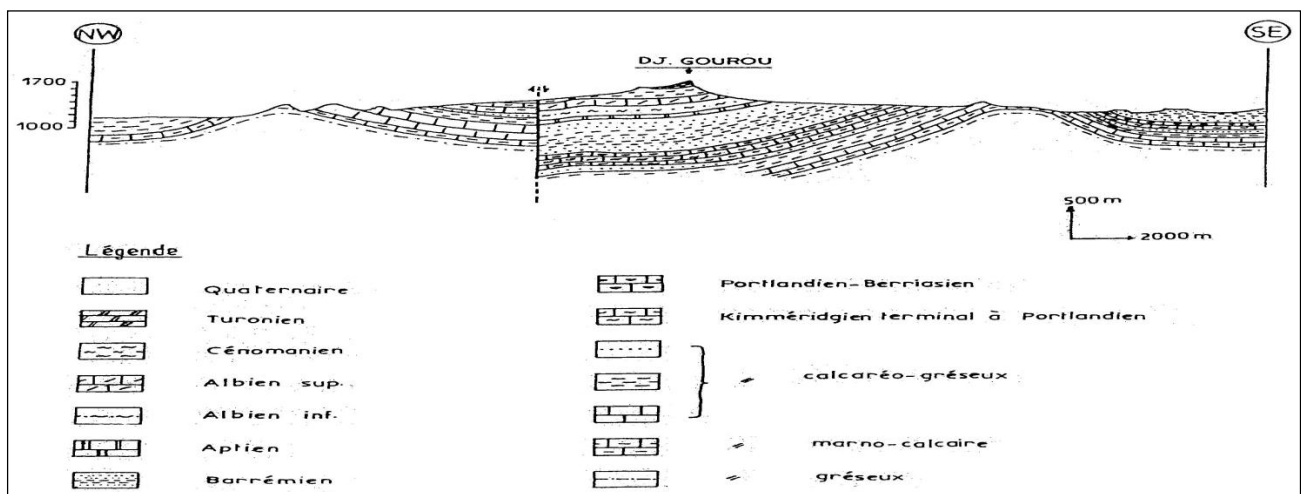


Figure III.6. Coupe géologique. (Stambouli M.1983)

III.5. Paramètres géomorphologiques du bassin versant

Les altitudes du bassin considérées sont comprises entre 1500 m au Djebel Mzara ,1710 m au djebel Sidi Okba et 1400 à l'exutoire du bassin versant, nous prendrons une moyenne de 1555m pour l'ensemble du bassin.

L'étude morphométrique nous a permis de dégager quelques paramètres caractéristiques qui ont une influence sur la circulation de l'eau à l'intérieur de ce bassin.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

L'étude des courbes altimétriques montre un relief assez élevé au Sud Est ainsi qu'au Nord Oust

Les reliefs s'élèvent du Djebel M'zara ainsi que djebel Sidi Okba sur les bordures du bassin provoquent des écoulements assez rapides des eaux.

En un temps de concentration assez court.

III.5.1. Caractéristique de forme du bassin versant

L'exutoire d'un bassin versant est largement influencé par la forme de celui-ci.

En effet la superficie, les conditions physiques et le relief étant constant, un bassin de forme allongée ne réagira pas de la même manière qu'un bassin de forme ramassée, la montée des crues sera plus rapide dans le cas de bassins compactes ce qui aura pour effet de diminuer l'infiltration donc l'alimentation des nappes si elles existent.

III.5.2. Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité de Gravelius est le rapport du périmètre du sous bassin à celui d'un cercle de même surface, il est obtenu à l'aide de la relation suivante

$$K = 0,28P / \sqrt{A}$$

P = périmètre du bassin versant en (Km)

A = superficie en (Km²)

III.5.3. Établissement de la courbe hypsométrique

L'établissement de la courbe hypsométrique par la méthode statistique pour le sous bassin versant étudié va nous permettre d'apprécier l'importance de l'effet du relief, sur le comportement hydrologique. Le tracé de la courbe hypsométrique est obtenu en remplaçant les surfaces cumulées en (%) en ordonnées et les altitudes en abscisses il permet de:-Déterminer graphiquement l'altitude médiane (Altitude de fréquence ½ à partir de l'ordonnée 50% de la surface. -Calculer l'altitude moyenne H.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

$$H = S \times h / St$$

S : aire des tranches altitude en (km²)

St : Aire totale du sous bassin en (km²)

h : Altitude moyenne (m) des tranches d'altitudes compris entre deux courbes de niveau .H=1200m

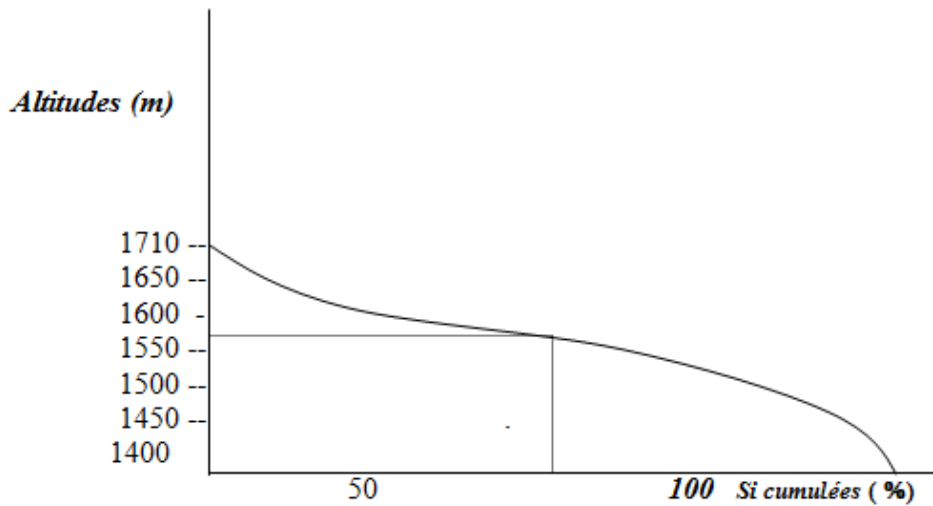


Figure III.7 Hypsometrique du sous bassin versant aflou

III.6. Réseau hydrographique

Les Oueds, de la région d'Aflou, en raison des pentes du relief, et de la nature de l'encaissement sont caractérisés par de fortes et rapides crues, après les pluies violentes.

Ils ont un temps de passages assez courts, de 10 à 30 minutes, sauf pour les Oueds importants est pérenne, comme l'Oued Moudjahiddine qui a une pente très faible (DGH.1988).

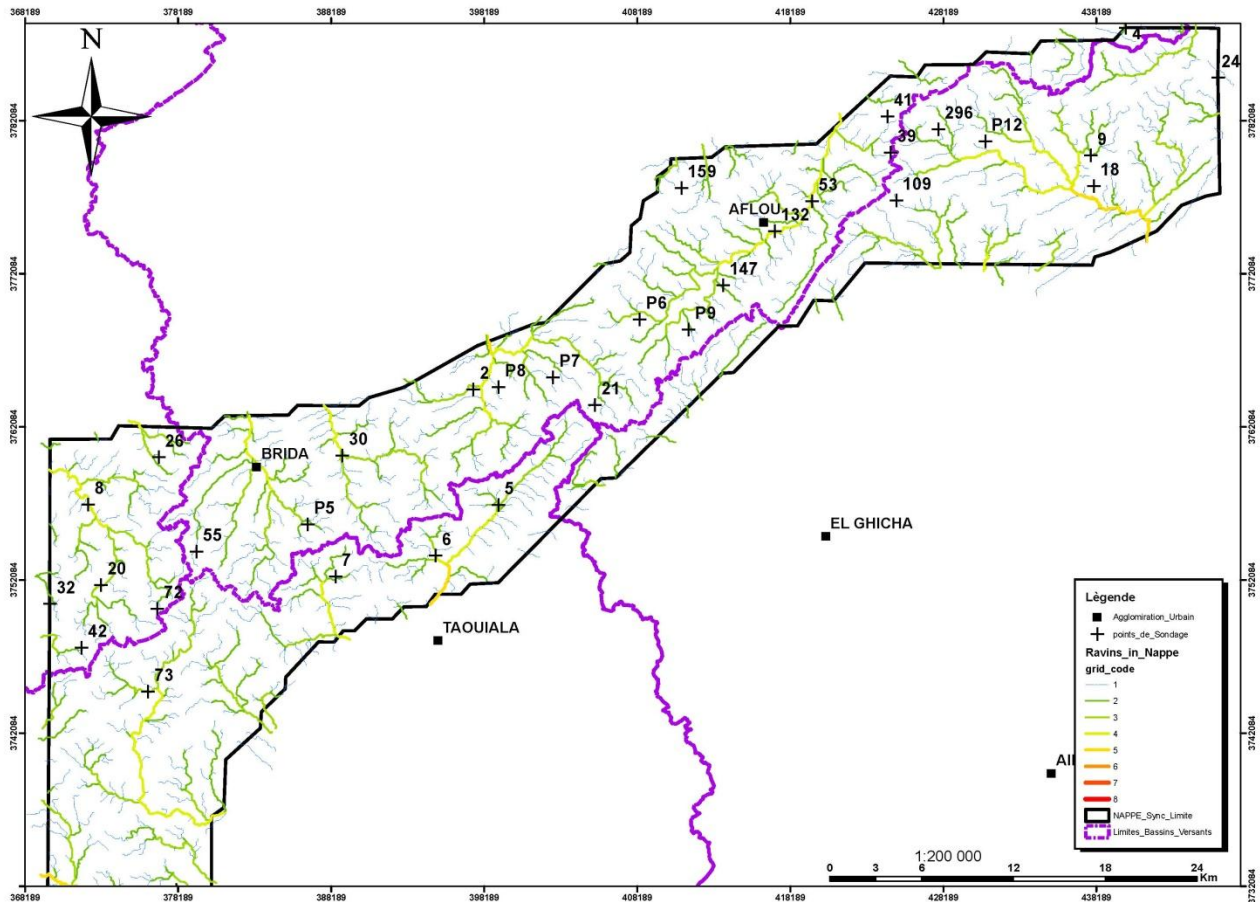


Figure 8 : Réseau hydrographique au niveau de la nappe d'Aflou.

III.6 .3.Essai du bilan hydrologique :

L'étude hydrogéologique est très liée à l'étude climatologique c'est à dire aux différentes composantes qui régissent le climat (pluviométrie, vents température, humidité, évaporation,...).

L'équation du bilan, peut s'écrire de différentes façons, mais la plus simple étant.

$$P = E + R + I + V_r$$

P : Précipitation annuelle, ou lame précipitée (mm)

E : Évapotranspiration réelle (ETR) (mm)

R : Ruissellement ou lame ruisselée (mm)

I: Infiltration ou lame infiltrée (mm)

V_r : Variation des réserves (mm)

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

III.7 Climatologie :

Dans la présente étude, nous considérerons successivement les phénomènes thermiques (la nébulosité, l'insolation et la température).

Les vents et le régime de l'eau (précipitations, crue, humidité de l'air, évaporation) mesurés à la station d'Aflou.

La plupart des observations ont été effectuées durant les périodes suivantes (1990-2011).

Le climat de la région d'Aflou est semi-aride, la pluviométrie moyenne annuelle est de 274,53. La température moyenne annuelle est de 13,67 °C (ANRH).

Les relevés que nous exposerons intéressent seulement celle de la station météorologique d'Aflou, dont les coordonnées, sont :

$$\left. \begin{array}{l} X=444.80 \text{ m ;} \\ Y=390.50 \text{ m ;} \\ Z=1406 \text{ m} \end{array} \right\} \text{Coordonnées Lambert}$$

III. 7.1. Température :

Il est très important de connaître la température de l'eau avec une grande précision. Cet élément joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et surtout des gaz, lorsque elle est élevée elle diminue la solubilité de l'oxygène.

Tableau III.1. Température moyennes mensuelles et annuelle (ANRH 1990-2011).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At	Moy.
Température	20,75	15,2	10,6	5,65	3,9	4,4	8,05	10,75	16,05	19,3	24,2	24,75	13,63

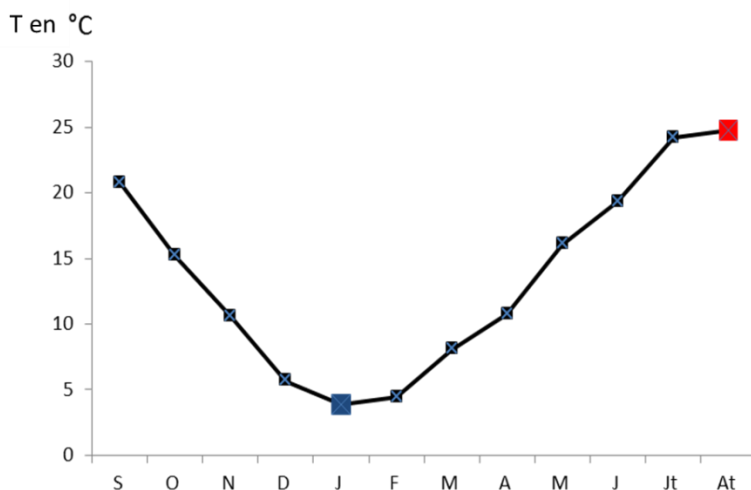


Figure III.9. Variation mensuelle de la température(ANRH 1990-2011).

Le tableau III.1. et la figure III.9 montrent que les températures moyennes faibles dans la région d'Aflou s'observent à partir du mois de décembre au mois de janvier ($5,65^{\circ}\text{C} > T > 3,9^{\circ}\text{C}$).

Tandis que les températures moyennes fortes s'observent du mois de juin au mois de septembre $T > 19^{\circ}\text{C}$.

III. 7 .2. Précipitation :

les pluies constituent la source principale de notre approvisionnement en eau.

Les variations moyennes mensuelles des précipitations pour la période 1990-2011 sont portées dans le tableau suivant :

Tableau III.2. Précipitations moyennes mensuelles et annuelle (ANRH 1990-2011).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At	annel
Précipitation	27,77	24,17	18,74	24,78	33	31,71	24,1	26,59	24,63	12,1	11,89	15,05	274,53

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

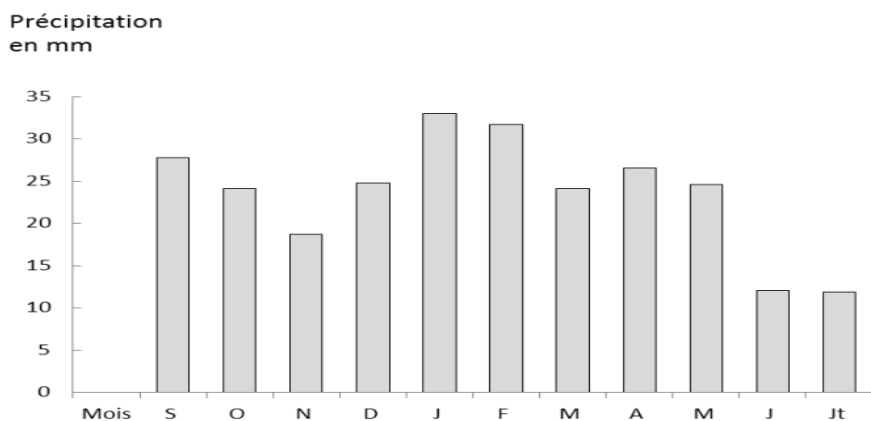


Figure III.10. Précipitations mensuelles.

Les histogrammes de la figure III.10 représentent la répartition des précipitations moyennes mensuelles. Janvier c'est le mois le plus pluvieux avec une lame précipitée de 33 mm.

Le minimum apparaît en Juillet avec 11,89 mm.

III. 7.2.1. Diagramme ombro-thermique

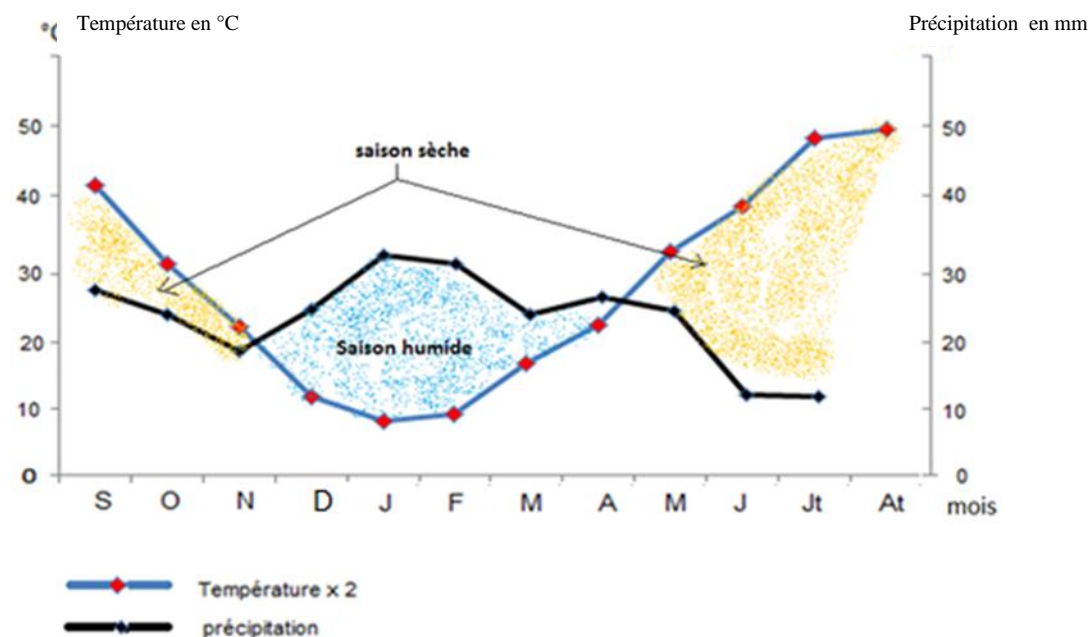


Figure III.11. Diagramme ombro-thermique de la région d'Aflou.

D'après la courbe ombro-thermique on constate que la saison sèche s'étend du mois d'Avril jusqu'à mi-Novembre.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

III. 7 .2.2. Indice de De Martonne:

En se basant sur le régime des précipitations et des températures, De MARTONNE a défini un indice d'aridité :

$$A = \frac{P}{T+10} = 11,59$$

P : précipitations moyennes annuelles (mm)

T : température moyennes annuelles (°C)

Pour $A < 5$: 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

L'indice d'aridité est de l'ordre de 11,59 indiquant donc un climat semi-aride.

III.7. 3. Evaporation :

Les valeurs de l'évaporation sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau III.3 : Evaporation moyennes mensuelles (ANRH 1990-2011).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At	Total annuel
Evaporation en mm	65,1	40,1	19,52	11,73	9,1	12,07	25,43	35,13	62	85,6	108,52	95,22	569,52

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

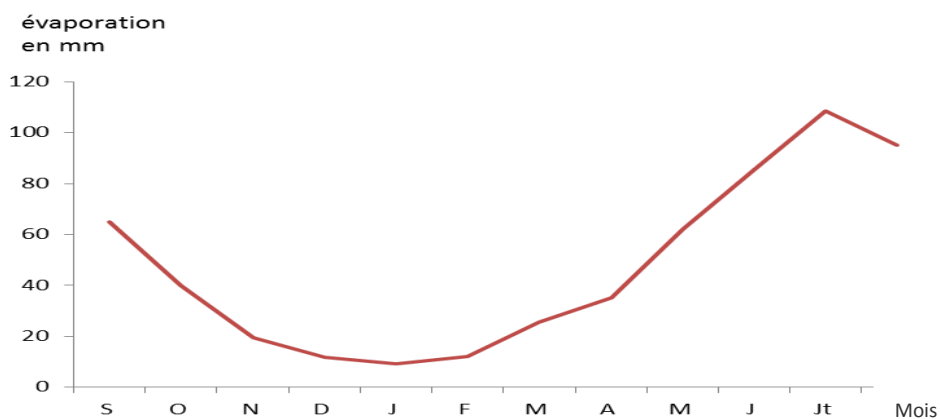


Figure III.12. Courbe d'évaporation moyenne mensuelle.

L'évaporation la plus élevée est observée au mois de Juillet avec 108,52 mm, par contre, la plus faible est observée au mois de Janvier avec 9,11 mm.

III. 7.4. Humidité

Les données de l'humidité sont portées dans le tableau suivant :

Tableau III.4. Humidité relative à Aflou(ANRH 1990-2011).

mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At	Moyenne
Humidité en mm	46	57	64	73	67	67	59	52	45	36	32	32	52,5

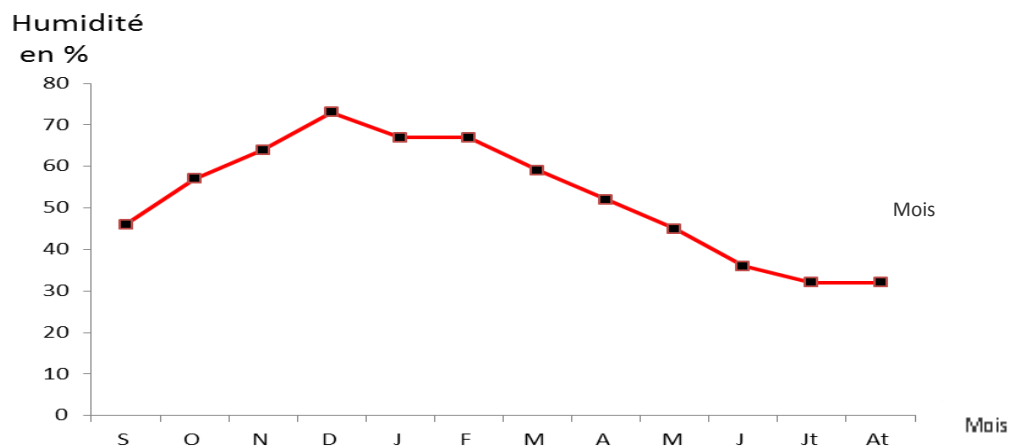


Figure III.13 : Humidité relative (ANRH 1990-2011)

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

Le taux hygrométrique de l'air est de 32 % en mois de Juillet et Août tout étant les mois les plus secs. Décembre est le mois le plus humide avec 73 %.

III. 7.5. Vents :

Les données de la vitesse du vent, représentant en moyenne exprimées en m/s, sont représentées dans le tableau ci-dessous. [

Tableau III.5 : Vitesse de vent (ANRH 1990-2011).

MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At
Vitesse en m/s	2,6	2,5	2,8	3,2	3,0	3,4	3,4	3,3	3,2	3,0	2,7	2,7

Les vents sont fréquents sur tous les mois avec une vitesse moyenne annuelle de 2,75 m/s.

Les vents les plus fréquents à Aflou sont :

Les vents d'Ouest et Nord-Ouest (27%) et (25%) respectivement Par contre les vents.

Les moins fréquents sont ceux d'Est avec 2%. [10]

Tableau III.6. Direction des vents (ANRH 1990-2011).

Direction	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Fréquences en %	13	3	2	4	10	16	26	25

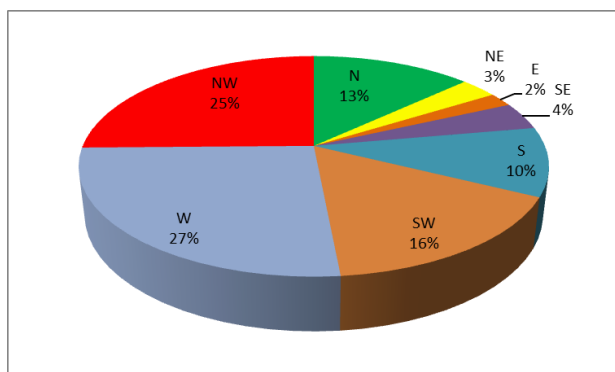


Figure III.14. Direction des vents (ANRH 1990-2011).

III. 7.6. Nébulosité : Représente la fraction de ciel couvert par des nuages

Tableau.III.7. Nébulosité (ANRH 1990-2011).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At	Année
Nébulosité	2,8	3,2	4	4,2	4,5	4,7	4,1	3,8	3,6	3	2	2,2	3,5

Du Novembre au Mai, ce sont les mois où il y'a plus de nuages par rapport à la moyenne.

Tandis que les mois allant du Juin au Septembre sont plus clairs.

III. 7.7. Insolation :

L'insolation représente la durée d'ensoleillement horaire ou journalière

Tableau III.8: Insolation(ANRH 1990-2011).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At
Insolation En (h)	89	77	66	57	58	62	74	84	95	109	109	99

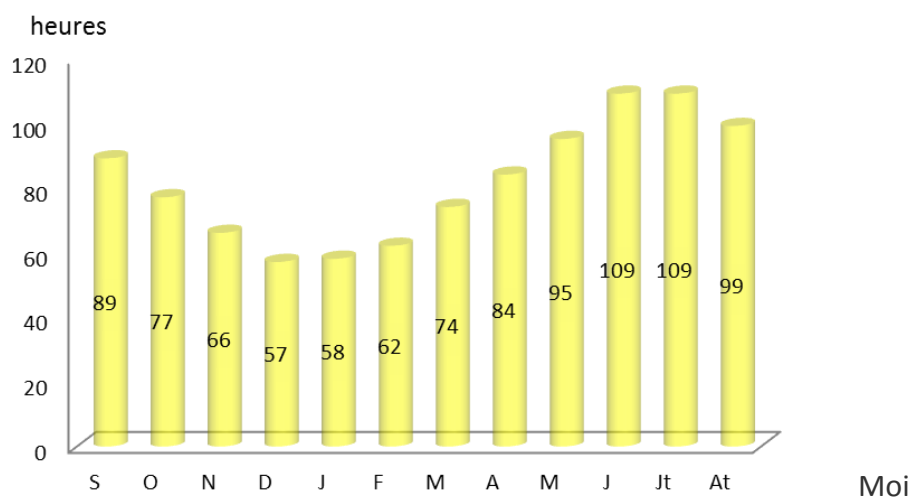


Figure III.15. Durée d'insolation en heures (ANRH 1990-2011).

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

La répartition de la durée moyenne quotidienne d'insolation présente un maximum en mois de juin et Juillet avec 109 heures, et un minimum en décembre avec 57 heures.

III.8. Hydrogéologie :

Le Système Aquifère Saharien désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes :

- la formation du Continental Intercalaire, la plus profonde,
- celle du Complexe Terminal, Ce Système recouvre une étendue de plus de un Million de km² dont 700,000 se trouvent en Algérie.

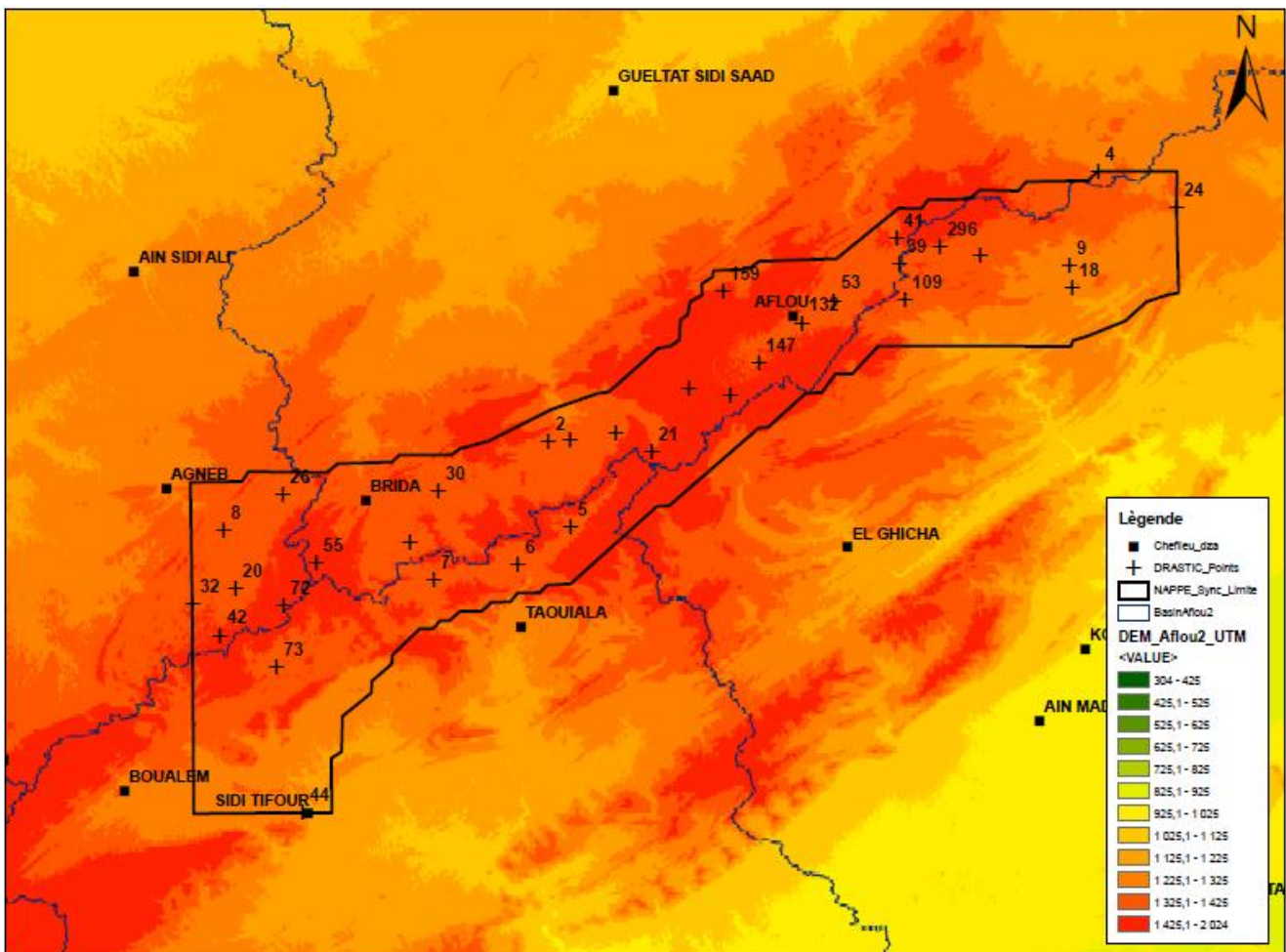


Figure III.16 : Localisation du point de prélèvement de la nappe entière.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

III.8.1. Généralités :

Ce travail a pour but la détermination des différents horizons aquifères, et particulièrement l'étude de la nappe du Barrémien Valangénien.

- ✓ Reconnaissance et inventaire des points d'eau
- ✓ les différentes zones d'alimentation et les directions d'écoulements
- ✓ interprétation de la géophysique
- ✓ intercommunication possible entre différentes nappes

III.8.2. Horizons aquifères

L'étude géologique a mis en évidence l'existence de plusieurs horizons aquifères susceptibles de fournir des débits d'exploitation appréciable.

III.8.2.1. Le quaternaire

Il repose sur la formation gréseuse du barrémien- valangénien, il est constitué exclusivement d'alluvions limono-sableuses et d'argile, des galets emballés dans du sable; vu son épaisseur il constitue un aquifère peu important.

III.8.2.2. Aquifère du turonien

L'étude géologique a mis en évidence, l'existence de calcaires dolomitiques fissurés au niveau du Djebel Sidi Okba et Djebel Gourou, ces fissures ont une direction préférentielle N 130° E postérieure au plissement atlasiques.

L'émergence des sources situées à la base des calcaires dolomitiques, met en évidence l'existence d'une nappe d'eau dans les calcaires du turonien.

III.8.2.3. Aquifère du complexe gréseux

Le complexe grés-marnes du barrémien-valangénien constitue l'aquifère le plus important de la région, ainsi que la zone principale d'alimentation en eau potable de la ville d'Aflou et l'irrigation des différents périmètres agricoles aux alentours de la ville.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

Il est à noter que cette formation gréseuse est à porosité d'interstices, de fractures et de chenaux. Les fractures qui affectent ces grès ont généralement une direction N60°E, N130°E se sont ces dernières qui ont mis à jour l'émergence des principales sources au niveau du synclinal. (DGH.,1988).

Tableau III.9 : Nombre des forages (ANRH 1990-2011).

NOMBRE DE POINTS D'EAU	DESTINATION ET USAGE
10 forages	alimentation en eau potable de la ville d'Aflou
10 forages	irrigation du périmètre agricole d'El Haoudh
79 puits	points agriculteurs et paysans
50 puits	à usage domestique
14 sources	servent à alimenter les paysans en eau potable
07 sources	dont 04 sources à sec

III.8.2.4 Aquifère du portlandien

Comparativement aux deux aquifères précédents, celui du portlandien est peu important vu qu'il est constitué de calcaire et de niveaux marneux on note l'émergence de quelques sources à faible débit par exemple : la source de Sidi Aoun Allah 0.5 L /S. (ANRH).

III.8.2.5 Aquifère du kimméridgien

Aquifère profond au niveau de la cuvette synclinale d'Aflou, il est représenté par un ensemble gréseux avec des passées argileuses.

III.8.3. Inventaire des points d'eau

150 points d'eau ont été inventoriés au niveau de la cuvette synclinale d'Aflou. 55 points d'eau dans la région d'El Haoudh. 30 points d'eau situés dans la région d'Oued Morra. 65 points d'eau dans la région d'Aflou.

III.8.4. Piézométrie

L'étude piézométrique au niveau de la nappe du Valangénien–Barrémien sera basée essentiellement sur les relevés des campagnes lancées en 1986 et 2011.

Les points d'eau sont parfois dispersés et parfois éloignés et ne permettent pas une bonne triangulation :

Par ailleurs le niveau piézométriques semble évoluer régulièrement le long de la cuvette synclinale et montre l'existence d'une ligne de partage des eaux souterraines, au Sud-Ouest de la ville d'Aflou, en passant par Djebel de Sidi Okba.

L'existence de la faille qui recoupe le synclinal et traversant la ville d'Aflou tout en affectant les formations du portlandien jusqu'au pointement triasique au niveau de l'anticlinal du djebel Zlag.

On note l'existence d'une seconde ligne de partage des eaux au niveau de Djebel Gourou de même orientation que la première.

La campagne piézométrique de 1986 a mis en évidence :

Une zone Amont (El Haoudh –Aflou) où le sens d'écoulement est SW–NE. Une zone aval (Djebel Gourou), les écoulements se font du NW vers le SE.

Une zone située au Nord du Djebel Hairech dont l'écoulement se fait de l'Ouest vers l'Est.

Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique varie de la valeur $i = 1,38 \%$ au Nord Est d'Aflou à $0,3\%$ en Aval vers la région de Oued Morra, cette élévation du gradient hydraulique peut être due au débit important transitant à travers une section transversale ou causée par la fracturation Portlandien –Valangénien –Barrémien (ANRH).

III.8.4.1. Structure hydrogéologique

La nappe occupe la cuvette synclinale d'Aflou de direction NE-SW sur plus de 70 km de long et 10 à 12 km de large. Formé exclusivement de grès fins à moyens, parfois grossiers et à dragée de quartz dans lequel on rencontre des morceaux de bois silicifié qui s'ennoient sous la Quaternaire au centre de la cuvette, avec des intercalations de marnes, cet aquifère multicouches est limité au Nord par le Djebel sidi Okba et Djebel Chebka, au sud par djebel Mzara et djebel Zlag.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

La puissance des grès qui forment cet aquifère dépasse les 1200 mètres.

L'étude géologiques a mis en évidence deux directions moyennes de cassures au niveau des grès N60° E et N130°E (ANRH).

- **Condition d'émergence des sources**

Ce sont ces cassures qui sont responsables de mise en place d'un certain nombre de sources.

Les sources dont l'émergence est liée aux fractures N60°E dépassent les 3 L/ S, on note

AinArar 4L /S

AinMançour 4L/ S

Ain Ouamri 5L /S actuellement (sèche)

Les sources dont l'émergence est lié aux cassures de direction N130°E, le débit ne dépasse guère les 2L /s.

III.9. Hydrochimie

III.9.1. Introduction

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 (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻.....).

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.

Les activités anthropiques ont une influence non négligeable sur la qualité physicochimique des eaux souterraines. On observe principalement deux types d'influence:

-En agriculture : apports de K⁺, Ca²⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺ et PO₄³⁻.

-Rejets des eaux usées : apports de Na⁺, K⁺, NO₃⁻, Cl⁻ et quelques métaux lourds.

III.9.2. Mesures physico-chimiques

Trois cents soixante-quatre (364) échantillons, ont été prélevés lors de la campagne du 10/12/85 au 24/03/86, et qui ont été analysés au laboratoire d'analyse des eaux de l'ANRH.

Ces résultats d'analyses, nous permettront d'une part de préciser, la minéralisation des eaux de la région, leur concentration, et la variation de la composition chimique de ces eaux dans le temps et dans l'espace.

III.9.2.1. pH

Les eaux de la région d'Aflou ont un PH acceptable, légèrement basique, puisqu'ils varient de 7,1 à 8,2. [10] Seul le puits n° 66/448, appartenant à la commune de SIDI TIFOUR, ne répond pas aux normes établies par l'OMS, qui exige un pH compris entre 6,5 et 9,2, pour une eau destinée à l'AEP, puisqu'il atteint 10,9.

III.9.2.2. Analyse de la carte des résidus secs

Le résidu-sec des eaux, de l'aquifère principal (grès du valanginien barrémien) varie entre 220 mg/l et 1590 mg/l, donc nous pouvons les traiter, d'être de bonne potabilité chimique. Il existe quelques exceptions, 07 points d'eaux sur 230.

Dans les anticlinaux, nous rencontrons des eaux à résidus-sec, assez élevé, puisque éteignant parfois 7822 mg/l (17/475), cela est dû à la nature des formations du Kimméridgien terminal à portlandien gypseux, dès fois nous rencontrons des sels purs (HALITE) et alternance avec des marnes.

III.9.2.3. Conductivité

Dans la région d'Aflou, la conductivité varie de 4 à 113 en (l/18 de mmhos à 25°C). Les eaux du quaternaire, qui est très localisé, ont des conductivités varier entre 7 (très rare) à 45 1/10 de mmhos.

- ❖ Les eaux du valanginien - barrémien, étant les moins chargé ont une conductivité qui varie de 6 à 23 1/10 de mmhos.
- ❖ Les eaux du jurassique, à part le Kimméridgien gréseux qui est peu chargé avec de conductivités variant de 16 à 37 1/10 mmhos, ont des résidus secs très élevés, d'où les conductivités sont aussi grandes puisque variait entre 22 et 113 1/10 mmhos.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

Donc les eaux du valanginien restent les plus potables chimiquement, et nous déconseillons le captage des eaux du Kimméridgien évaporitique, qui sont très salées, et peuvent atteindre 14 gr/l. (Forage réalisé par une équipe Ms.sc aux alentours de SIDI TIFOUR).

III.9.2.4 DHT (degré hydrométrique total)

Le DHT varie, dans la région d'Aflou, de 14 à 340°F. Seules les eaux du valanginien ont des DHT, non élevés, et qui répondent aux normes de l'OMS (inférieur à 35°F).

Les eaux des autres formations, même le quaternaire et le Kimméridgien gréseux, ont des valeurs élevés, puisque atteignant parfois 340°F (Puits 17/475 captant les eaux du Kimméridgien évaporitique).

- ❖ Baux quaternaire (27 à 154, 35°F)
- ❖ Eaux valanginien-barrémien (22 à 75°F)
- ❖ Eaux portlandien – berriasien (82,15 à 164, 35°F)
- ❖ Eaux Kimméridgien évaporitique (atteignent 340°F)
- ❖ Eaux Kimméridgien - gréseux (61,90 à 197,50°F)

III.9.3. Potabilité chimique des eaux

Dans ce paragraphe, nous étudierons les teneurs des éléments chimiques par rapport aux normes établies par l'OMS.

❖ Ion calcium (Ca⁺⁺)

Les eaux de bonne potabilité chimique, selon les normes de l'OMS, devant renfermer entre 150 et 200 mg/l.

14,74% dos-points recensés, captant le valanginien-barrémien ne répondent pas à ces.

Ailleurs, c'est 50,44% des points recensés captant les autres nappes qui ne répondent pas à ces normes.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

❖ Ion magnésium (Mg^{++})

❖ La concentration maximale admissible de magnésium (Mg^{++}) est de 150 mg/l de 5,21 % des points d'eaux recensés, captant le valanginien-barrémien, dépasse le seuil admissible.

Ces 5.21% de Mg^{++} et 14,74 % de Ca^{++} , ne peut être expliqué que par le quaternaire, qui est riche en Ca^{++} et Mg^{++} . Les eaux de pluies en s'infiltrant et en traversant le quaternaire se charge en Ca^{++} et Mg^{++} , avant d'arriver au grès du valanginien barrémien.

Ailleurs, c'est 8,85 F° des points d'eaux recensés, captant les autres nappes qui dépassent la norme.

❖ Ion chlore (Cl^-)

La concentration maximale admissible de chlore est de 600 mg/l de 1,74 % des points d'eaux recensés, captant les grès du valanginien-barrémien, ne reprend pas aux normes. Ailleurs, c'est 4,42 % des points d'eaux recensés, captant les autres: nappes qui ne répondent pas à ces normes.

❖ Ion sulfate (SO_4^{-})

La concentration maximale admissible est de 250 mg/l. 46,95% des points d'eaux recensés, captant les grès du valanginien-barrémien, ne répondent pas aux normes établies par l'OMS.

Ailleurs, c'est 66,57 % des points d'eaux inventoriés, captant les autres nappes, qui ne répondent pas à ces normes.

Nous notons, d'après ces pourcentages, que les eaux de la région d'Aflou sont sulfatées, mais toujours est-il que les eaux des grès du valanginien-barrémien le sont moins.

❖ Ion nitrate (NO_3^+)

La concentration maximale admissible de nitrate est de 45 mg/l. 55,65 % des points d'eaux recensés captant. les grès du valanginien-barrémien, ne répondent pas aux normes établis par l'OMS.

Nous rencontrons des taux élevés de nitrates là où on pratique, de la culture maraîchère, d'eu c'est les engrais qui sent la cause de ces teneurs, facilité par une infiltration rapide.

Ailleurs, ce n'est que 15,04% des points d'eaux recensés, captant les autres nappes, qui ne répondent pas à ces normes, car les terres agricoles y sont rares (ANRH).

III.10. Caractères chimiques et potabilité des eaux

Dans la région d'Aflou et ses environs, nous notons que 49,00 des points d'eaux recensés sont incrustantes, d'où elles peuvent provoquer des dépôts sur les parois internes des conduites, jusqu'à peut-être les bouchés. 35,41% des eaux sont agressives, et pourront s'attaquer aux conduites, et aux canalisations; alors que 15,58 % des eaux sont neutres, ce caractère étant le plus souhaité pour une eau destinée à l'AEP.

III.11. Cartographie hydro-chimique

Les eaux souterraines contiennent toujours des sels dissous qui leur confèrent les caractéristiques du milieu dont elles sont issues. Ces sels peuvent également provenir de phénomènes exogènes qui ont contribué à des modifications de la chimie du milieu, parmi lesquels on note l'évaporation et le lessivage.

Afin de montrer la répartition spatiale des éléments chimiques, on a procédé à l'établissement de la cartographie hydrochimique. La répartition des concentrations dépend de plusieurs facteurs tels que la lithologie, l'état hydrodynamique de la nappe . (les profondeurs de la surface piézométrique, la vitesse d'écoulement) et les conditions climatiques (une température élevée provoque l'évaporation et les précipitations engendrent le lessivage et la dissolution des roches).

Dans notre présente étude, on va cartographier les éléments chimiques dominants caractérisant les faciès chimiques qui présentent une influence sur la qualité des eaux et qui montrent une évolution significative durant toute la période d'observation.

Les deux campagnes du mois de mars 2002 et celle du mois de juillet 2008 ont montré des teneurs maximales en sels dissous, c'est pourquoi nous les avons prises comme exemple pour illustrer la variation spatiale des éléments chimiques.

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

III.11.1 Rapport caractéristique Mg /Ca

Dans la région d'Aflou, dans son ensemble le rapport Mg/Ca varie de 0,045 à 1,870. Les régions, qui présentent un rapport supérieur à l'unité (01), sont au pied du Djebel Gourou, dans la plaine d'Aflou.

La source n° 1 de l'Oued Sebgag, (région très fracturée), le puits 23/447 sur la plaine du Djebel Tghisset, tous les points d'eaux situés dans le quaternaire (des régions de SIDI SLIMANE, TAOUIALA et BOUÀLEM), et tous les points captant le Kimméridgien calcaréo-gréseux.

Cette teneur élevée de magnésium par rapport au calcium, est due à plusieurs facteurs, dont : Nous avons vu que les eaux du quaternaire, avaient des DHT très élevés, et surtout le magnésium Le Kimméridgien calcaréo-gréseux est aussi riche en magnésium.

Les eaux de cette dernière formation, dans certains cas, ont tendance à monter en surface par l'intermédiaire de failles, et nous donnent des eaux riches en mg.

III.11.2. Rapport caractéristique SO₄⁻ /Cl⁻

Ce rapport, dans la région d'Aflou, varie de 0 à 35,890. L'étude de ce rapport, nous permettra, de voir s'il existe un sens préférentiel d'alimentation en sulfate.

En examinant la carte des iso rapports SO₄⁻/Cl⁻ , nous notons que les points d'eaux à teneur en sulfate élevé, avec un rapport supérieur à 5 sont cantonnés soit dans le portlandien berriasien (calcaire, grès, et marnes), soit dans le quaternaire avec en dessous le portlandien-berriasien, soit près de ces formations, ou en contrebas de celles-ci, ou aux abords du Kimméridgien évaporitique, ou finalement dans des endroits très failles, où il y'a alimentation par ascendance des nappes superficielles .

En conclusion, l'origine des sulfates ne peut être attribuée qu'à la formation calcaireuse du portlandien-berriasien, et à un degré moindre au Kimméridgien terminal évaporitique.

III.11.3. Rapport caractéristique Cl⁻ / HC03⁻

Il varie dans la région d'Aflou de 0,102 à 39,980. En examinant la carte du rapport caractéristique Cl⁻ nous constatons que les zones où ce rapport est grand, sont situées, là, où affleure le Kimméridgien terminal à portlandien marno-gypseux (formations salifère riche en NaCl)

Chapitre III : contexte naturel de la région d'étude

telle que Puits 43/449 (14,035), dans l'anticlinal, puits 16 et 17/475, avec des rapports respectif de 11,011 et de 39>980, situé» dans l'anticlinal, au niveau de ces formations salifères.

III.12. Aptitude des eaux a l'irrigation

III.12.1 Introduction

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, où 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.

L'accumulation des sels hydrosolubles dans le sol d'enracinement influe négativement sur la croissance des plantes, on a recensé deux séries d'effets de la salinité: les uns portent sur les végétaux, les autres sur le sol.

En effet, ces sels causent des changements de la perméabilité et de l'aération du sol d'une part, et d'autre part ils provoquent des perturbations du métabolisme des plantes et du processus osmotiques de ces dernières.

Comme la région d'Aflou est à vocation agricole, 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 chlorures et en sulfates.

Les risques qu'encourt cette plaine imposent une bonne connaissance des régimes hydriques et salins afin de pouvoir assurer une durabilité d'utilisation des ressources en eau et des sols.

Dans la présente approche, on a fait l'estimation de quelques paramètres de salinité en rapport avec l'usage agricole pour les six campagnes saisonnières. (BENMOUFFOK B.2003)

III.12.2 Caractérisation des eaux pour l'irrigation

La salinisation peut entraîner, comme on l'a signalé précédemment, des effets nocifs sur la qualité des eaux pour l'irrigation, et ce en raison de la fixation du sodium et des chlorures par les colloïdes du sol.

La présence du sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation et le sol :

- Un accroissement de la pression osmotique qui rend l'eau plus difficilement mobilisable par les plantes.
- Une toxicité de certains ions pour les végétaux (Cl^- , Na^+ , etc.);
- Une dégradation du sol (modifications de l'état structural, diminution de la perméabilité, etc).

Lorsque la concentration des ions Na^+ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent le plus fréquemment les cations Ca^{+2} (échange de base) dans le complexe absorbant. Une eau chargée en sels peut provoquer cette action (BENMOUFFOK B.2003).

Chapitre IV

**Etude de la
vulnérabilité de la
nappe du synclinal
d`Aflou**

Chapitre IV : Etude de la vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou

IV.1. 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.

IV.2. 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

Tableau IV.1 : 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

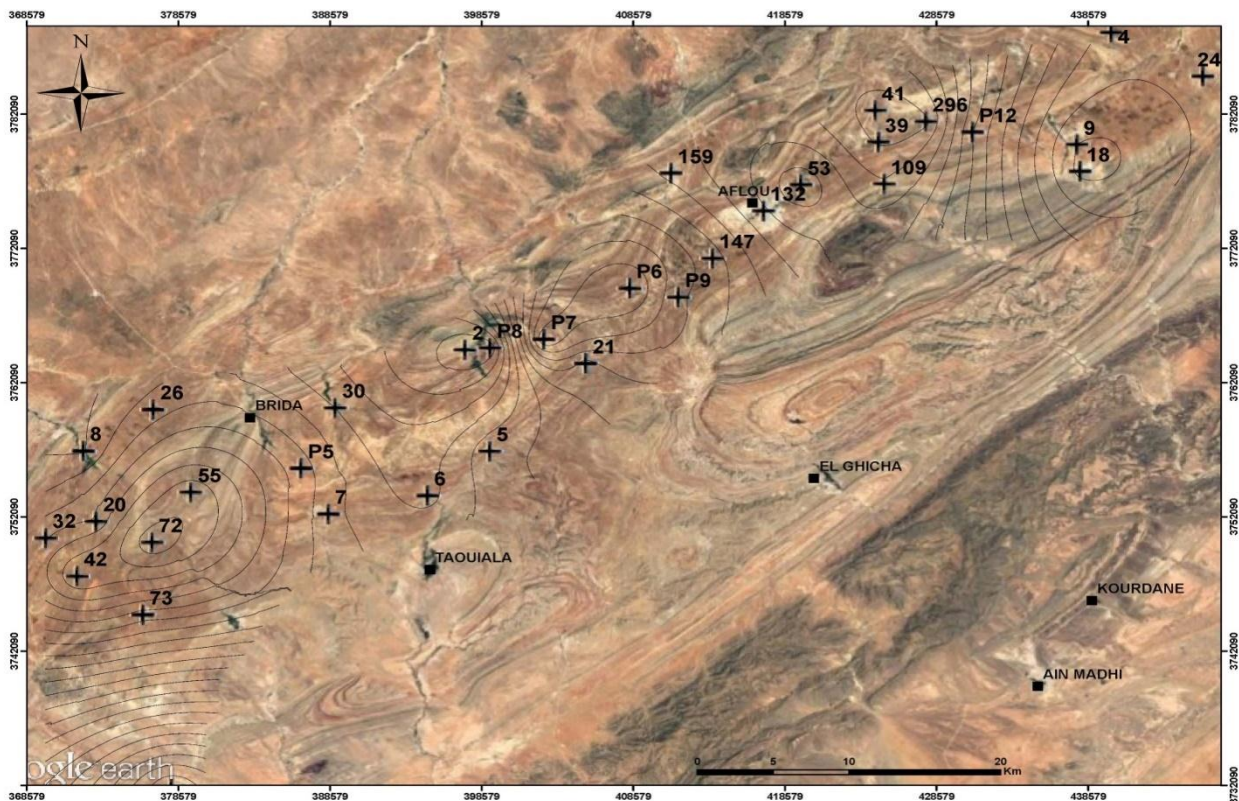


Figure IV.1. Carte Piézométrique.

Chapitre IV : Etude de la vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou

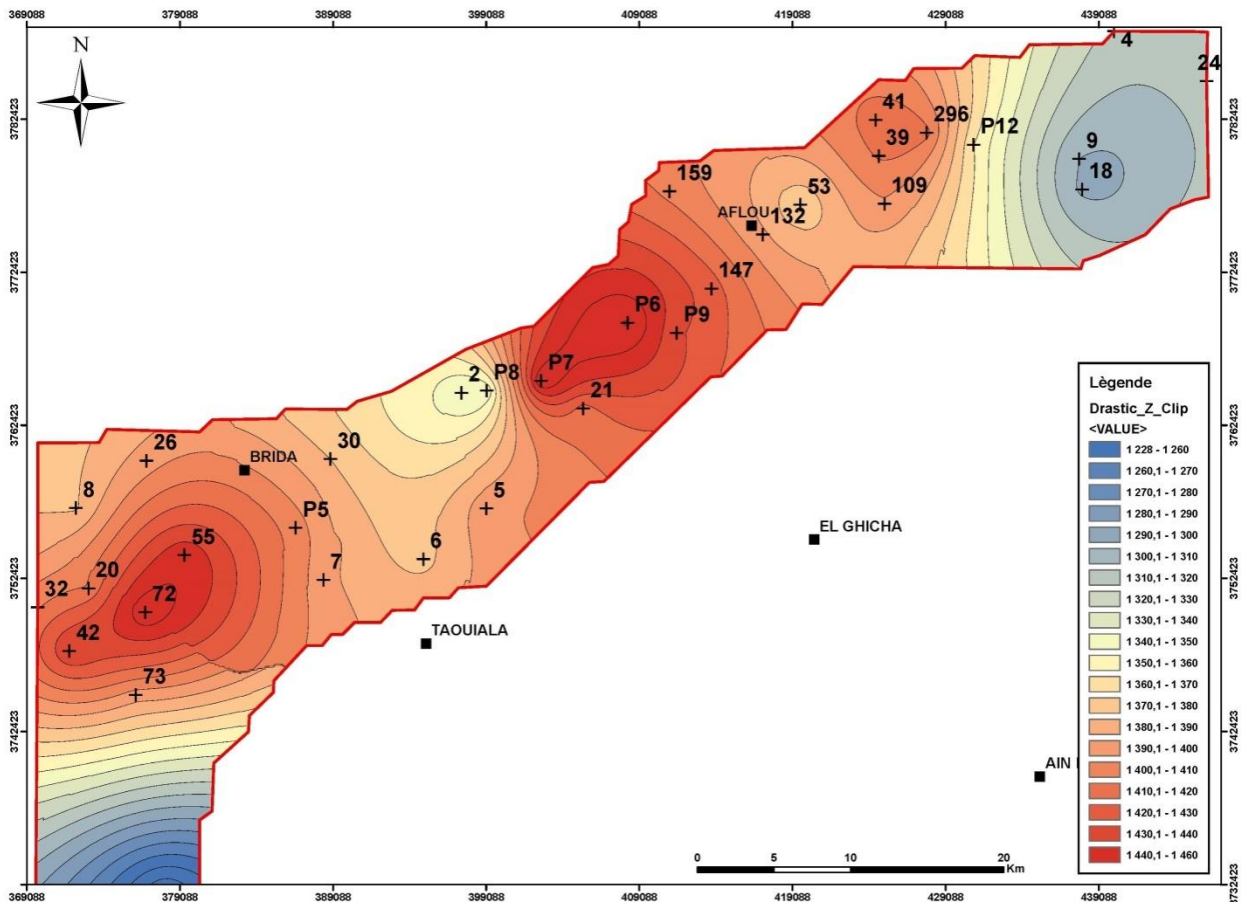


Figure IV.2 Indice de profondeur

V.3. 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.

Tableau IV.2. Notation et pondération du paramètre de la recharge.

Intervalle	Rn	Rp	Rn,Rp
0 à 5	1	4	4

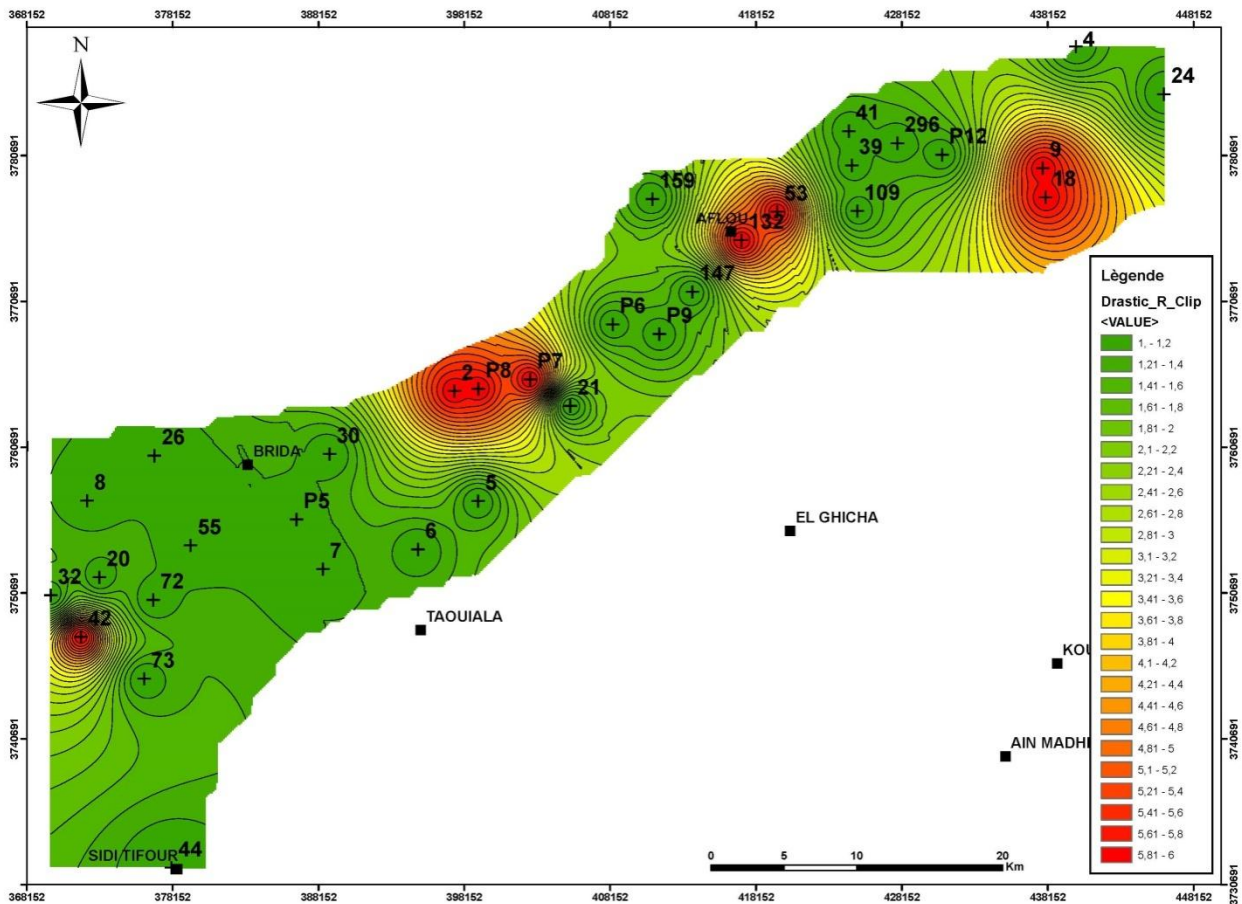


Figure IV.3. Indice de recharge

IV.4. 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 :

Chapitre IV : Etude de la vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou

Tableau IV.3. Notation et pondération du paramètre de la zone saturée.

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

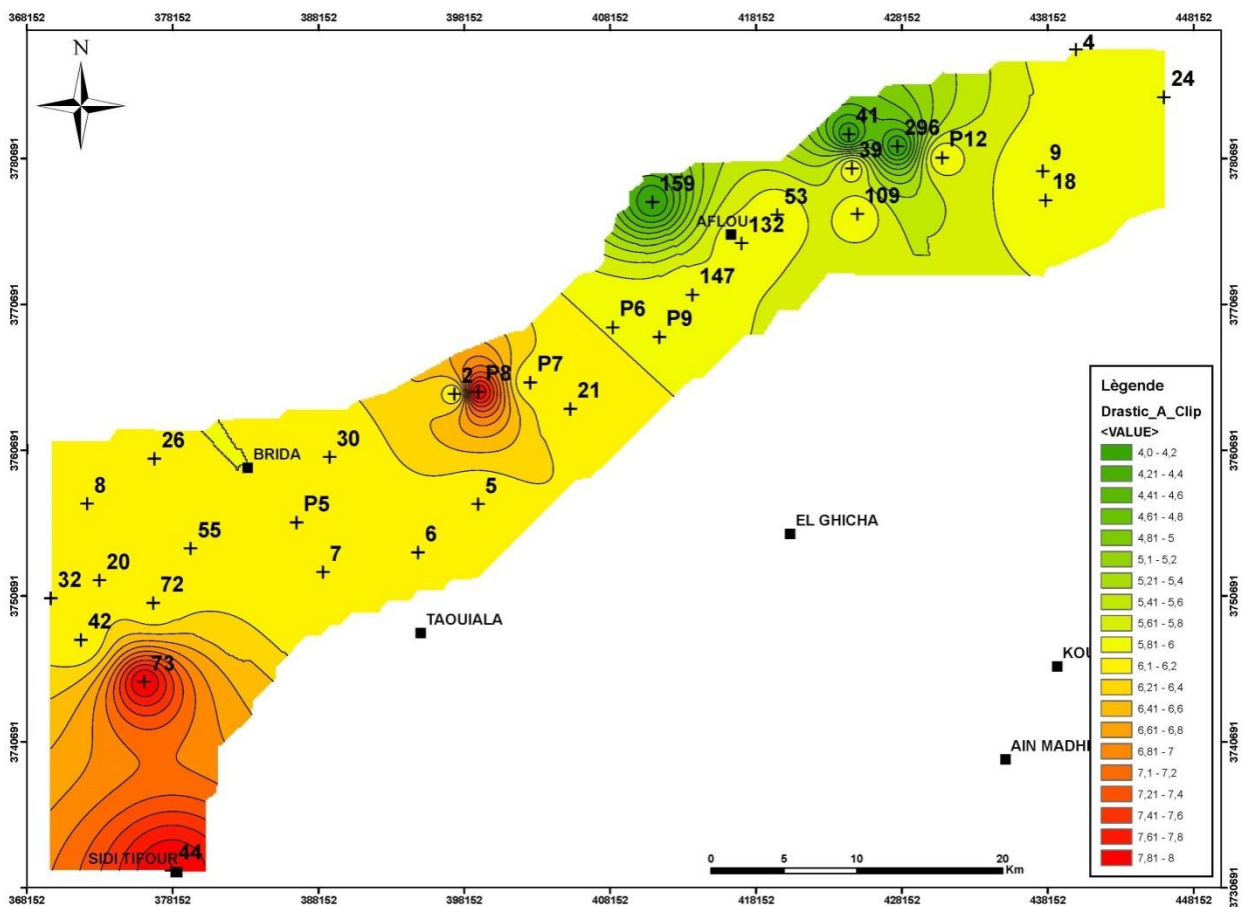


Figure IV.4 : Indice de la zone saturée

IV.5. 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.

Chapitre IV : Etude de la vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou

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

Tableau IV.4 : 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

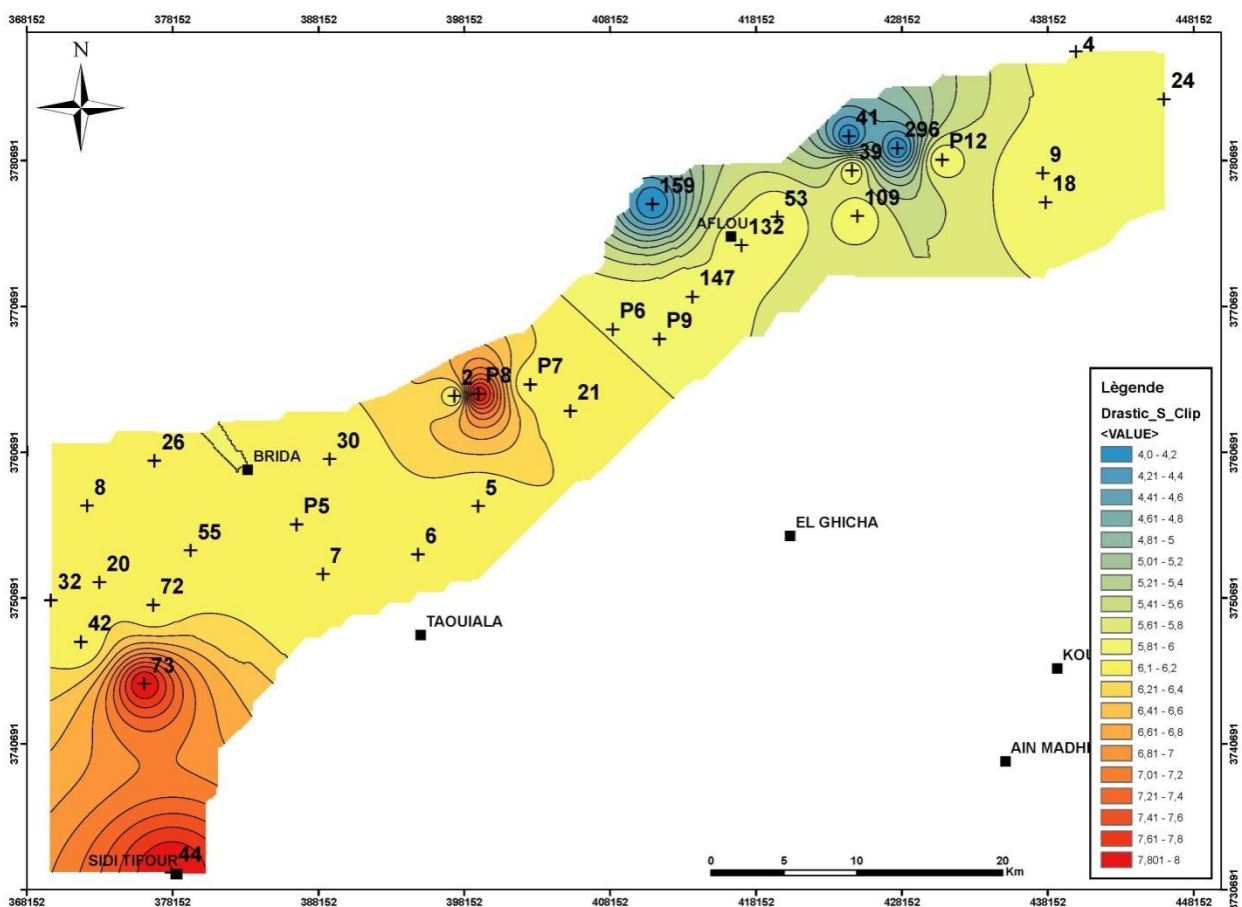


Figure IV.5 : Indice de sol

Chapitre IV : Etude de la vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou

IV.6. 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 (carte6) 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

Tableau IV.5 : 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

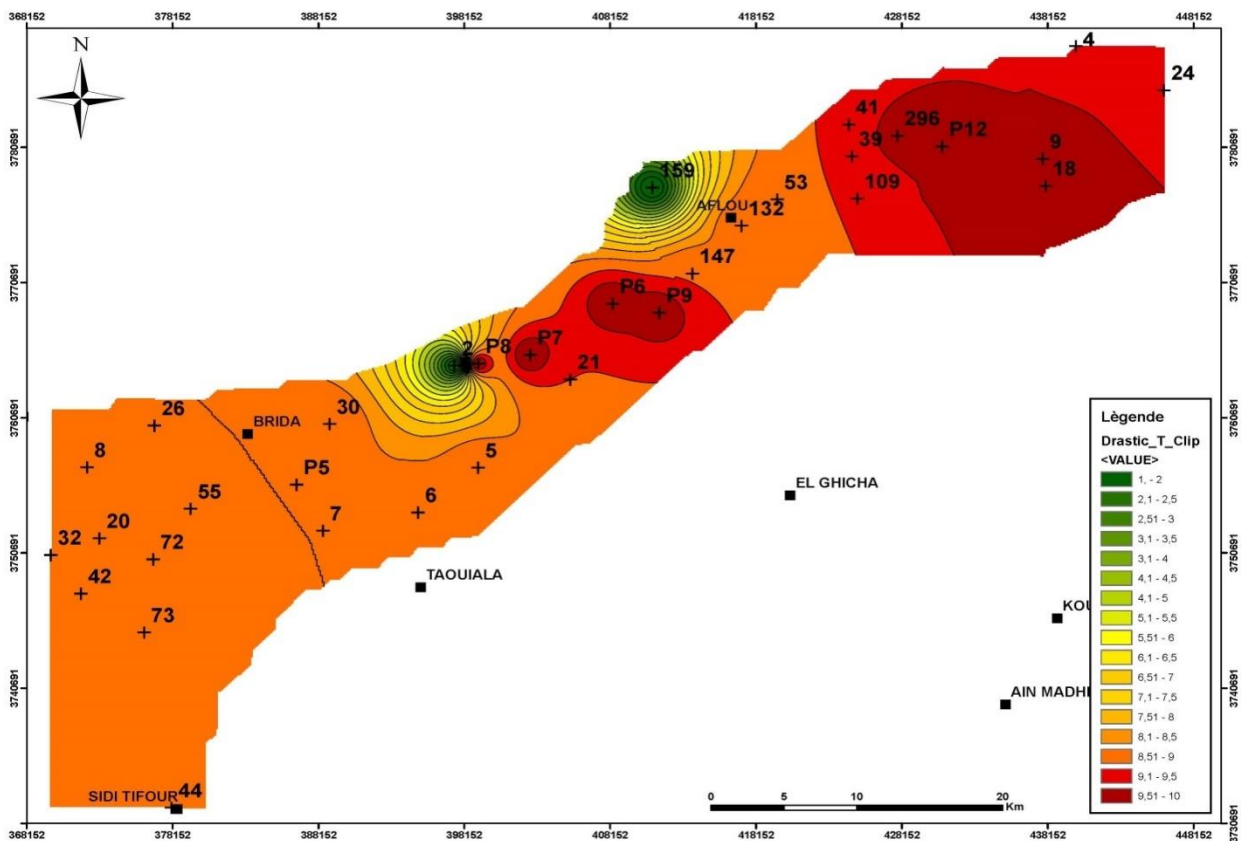


Figure IV.6 : Indice de pente

Chapitre IV : Etude de la vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou

IV.7. 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.

Tableau IV.6 : 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

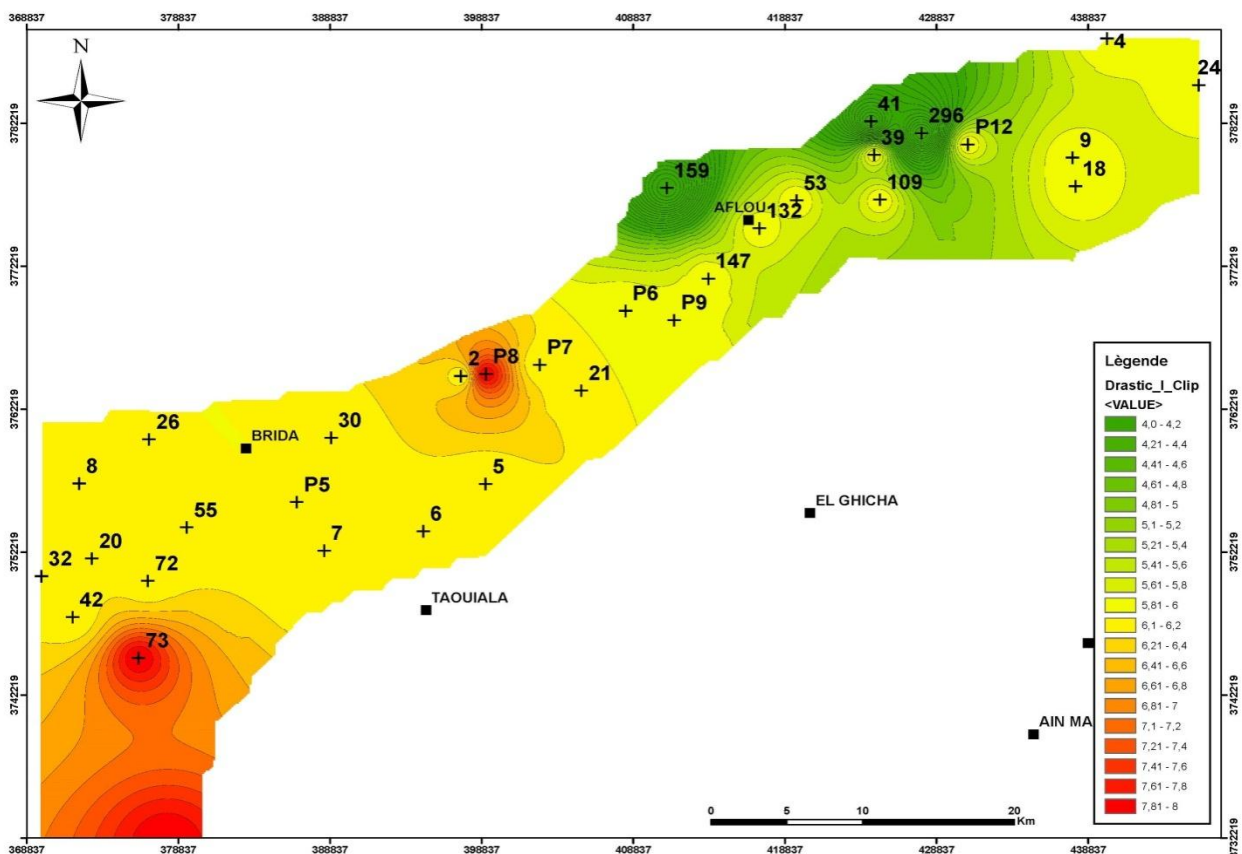


Figure IV.7 : Indice de la zone vadose

Chapitre IV : Etude de la vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou

IV.8. 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 :

Tableau IV.7 : 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

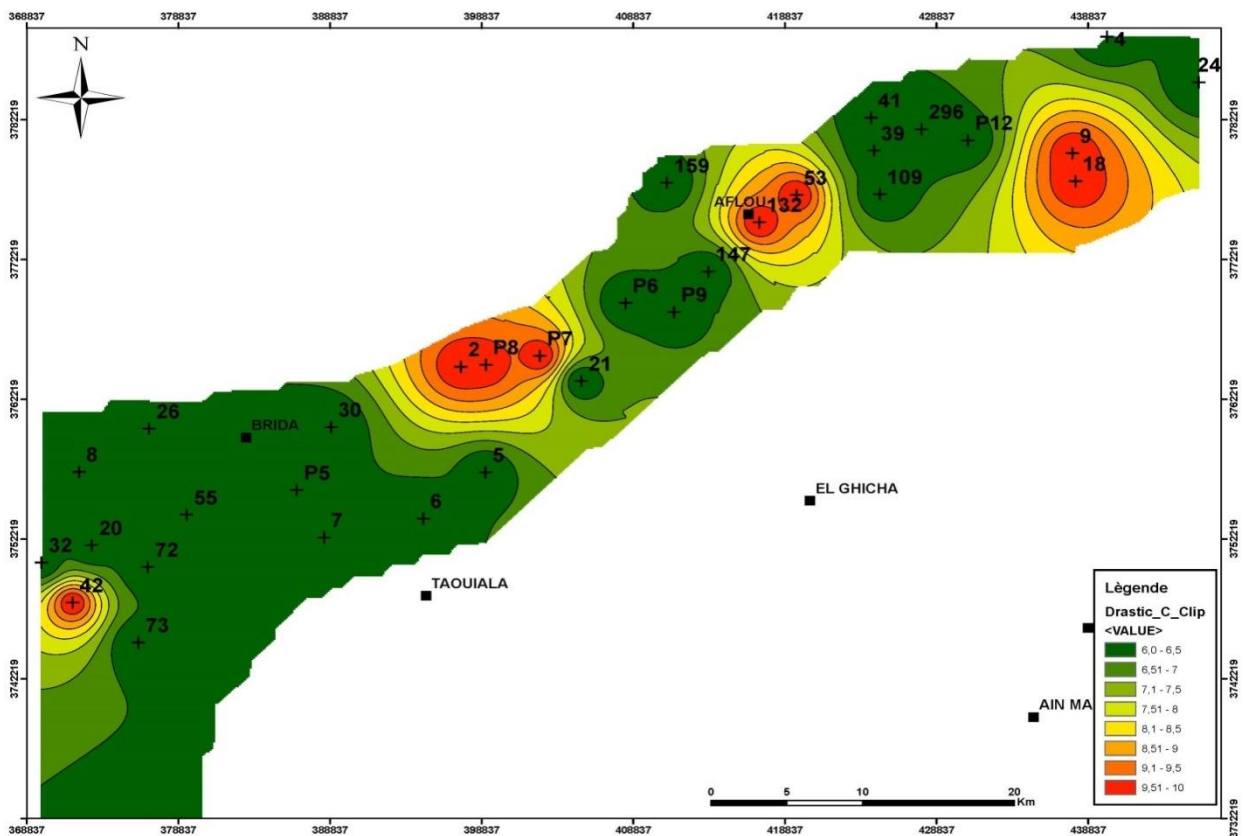


Figure IV.8 : Indices de perméabilités de la nappe du synclinal d'Aflou

IV.9. 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.

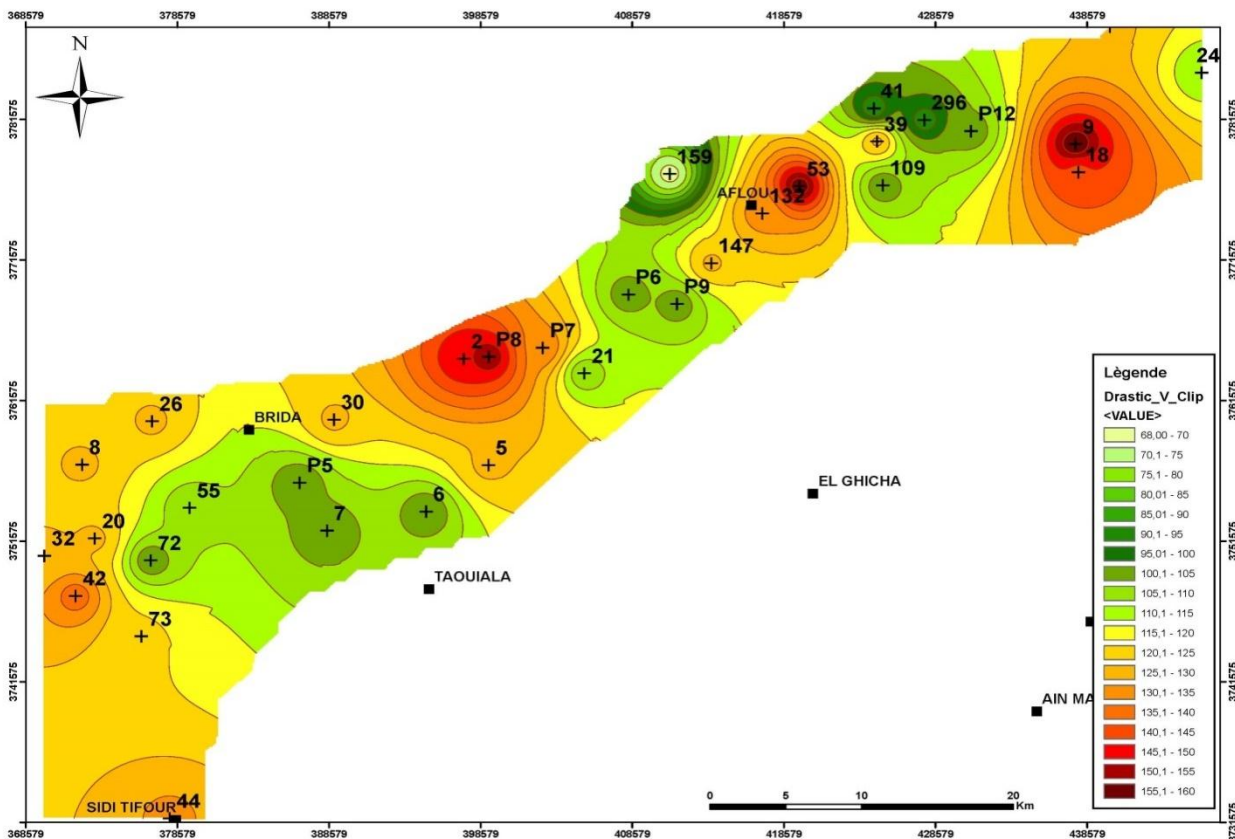


Figure IV.9. la carte de vulnérabilité de la nappe du synclinal d'Aflou

IV.9.1. 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.

Chapitre IV : Etude de la vulnérabilité de la nappe du synclinal d`Aflou

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 3 principales zones caractérisé par les couleurs suivants :

1) La première est caractériser par la couleur (rouge-bordeaux), l`indice de vulnérabilité ici atteint la valeur de 160 (vulnérabilités fortes) la plus importante dans toute la région, ceci est principalement dû à la présence des sables et gravier 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 caractériser par les couleurs suivants rouge, orange fluo, et jaune ,où l`indice de vulnérabilité compris entre(120 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 les couleur (vert fonce et vert pomme) . L`indice DRASTIC copris entre 95 et 70 (vulnérabilité faible). Due principalement au nature lithologique d`aquifère qui est à dominances argileuse dans cette zone.

Conclusion Général :

Le travail réalisé est une cartographie régionale de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution de la région d'Aflou. Le résultat de cette cartographie est un outil d'aide à la décision pour la gestion et l'aménagement du territoire. Les cartes obtenues, comme dans toute autre produit résultant de la manipulation ou du traitement de jeu de données, contiennent des erreurs qui se sont propagées de l'acquisition à la production de données, en passant par leur traitement.

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 présente dans son ensemble trois type de vulnérabilité : forte, moyenne et faible.

La maîtrise des paramètres de vulnérabilité à la pollution de la nappe du synclinal d'Aflou est facilité 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 géologique a permis de mettre en évidence les formations aquifères dans la région, il s'agit des dépôts alluviales qui renferment une nappe superficielle. Il en est de même pour les formations détritiques du Mio-pliocène, les calcaires fissurés du Sénonien supérieur, et la couche gréseuse de l'Albien. Quant aux formations imperméables, les dépôts argilo-marneux du Sénonien lagunaire forment le substratum de l'aquifère sénonien. Les formations argileuses du Cénomaniens forment le toit de la nappe de l'Albien. L'étude hydroclimatique a permis de déterminer le climat de la région.

Conclusion Général :

L'étude hydrogéologique nous a permis de mettre en évidence les aquifères exploités au niveau de la région de 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 de décision pour la protection, notamment dans la partie couvrant le champ de captage et les eaux destinée 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.

D'autre part, les rejets urbains, déversés sans aucun traitement préalable dans le réseau hydrographique, sont une source importante de pollution. Selon notre interprétation des données des analyses physico-chimiques, fournis par l'ADE, des eaux potables, au niveau de la ville d'Aflou, nous n'avons constaté aucune contamination des eaux souterraine au niveau de la ville d'Aflou, malgré eaux usées non traitées rejettent dans la nature et que l'oued Medssous non aménagé traverse la ville d'Aflou et malgré que quelques forages sont implanté plus près de celui-ci.

Cependant, selon l'ANRH de djelfa, une étude hydro-chimique, des eaux de la nappe du valanginien barrémien a montré une contamination des eaux par les eaux usées de la ville d'Aflou, qui sont rejetées.

RECOMMANDATIONS :

La qualité des eaux souterraines ne cesse de se dégrader. Pour remédier à cela, des mesures urgentes doivent être prises :

- ❖ Arrêter le déversement direct des rejets industriels au niveau de l'oued .
- ❖ Eviter l'installation des zones industrielles sur des sites à forte vulnérabilité et de s'orienter plus vers les zones à faible vulnérabilité.
- ❖ Réaliser un traitement préalable des rejets avant qu'ils n'atteignent les oueds et surveiller en permanence la qualité des eaux au niveau de l'oued.
- ❖ Pour le stockage des produits industriels, il est conseillé de les mettre sur des sites imperméables (terrains argileux), ou d'installer un système des couches isolantes entre les produits et la nappe.
- ❖ Eviter l'implantation des ouvrages d'AEP au niveau des berges des oueds, car cela produirait un abaissement du niveau piézométrique dans l'ouvrage et un écoulement des eaux de l'oued vers la nappe, ce qui amènerait une modification de la qualité des eaux de la nappe.
- ❖ L'aménagement de la ressource en eau et le développement économique et social ne peuvent être considérés séparément. Cela est un des éléments indispensables pour qu'un plan d'aménagement soit réaliste et puisse être appliqué. Cela est aussi nécessaire pour répondre à un objectif de développement durable donc l'aménagement de la ressource en eau doit en effet intégrer le développement social et économique de la région considéré.
- ❖ La délimitation des périmètres de protection de la ressource et enfin de généraliser les cartes de vulnérabilité aux différentes pollutions,
- ❖ Établissement d'inventaire des sources de pollutions accidentelles et les nitrates issus des activités agricoles et industrielles couplées aux rejets urbains et aux décharges sauvages.

- ❖ Il est souhaitable de faire des recherches au niveau des universités sur la géologie et l'hydrogéologie, modélisation de la nappe de la région, car les études actuelles sont rares, et inaccessible.

- ❖ En conclusion, la prévention reste le seul moyen efficace pour lutter contre la pollution des eaux et pour la protection des ressources eau

PROBLÈMES RENCONTRÉS :

- La difficulté ou l'impossibilité des étudiants d'accès à l'information auprès des organismes concernés.
- Manque des études dans ce domaine de la région d'Aflou
- Le nombre de point de prélèvement de l'ANRH (une quarantaine) est limité par rapport à la superficie de la nappe
- Les analyses chimiques des eaux sont limitées au niveau de la zone urbaine de la ville d'Aflou • Manque des analyses physico-chimique récentes sur la nappe (depuis 1986)
- Manque du piézomètre de contrôle et de surveillance au niveau des la décharges sauvages
- Manque d'un inventaire des différentes sources de pollutions,
- L'analyse chimique de l'ADE est limitée aux (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, NO₃, et HCO₃) et manque des analyses sur des métaux lourds et autres paramètres chimiques.
- La réalisation de cette étude nécessite un temps suffisant afin réaliser un bon travail, visite de terrain, prélèvement d'échantillons, enquête.

Références bibliographiques

Abed S. (1982). Lithostratigraphie et sédimentologie du Jurassique moyen et supérieur du Dj. Amour (Atlas saharien). *Thèse 3ème cycle, Univ. de Pau*. 242 p.

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

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Alger 1999-2011 : données des forages (coordonnées, piézométrie, analyse physico-chimique, données climatologiques)

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: « Qualité et Gestion de l'Eau »,

Boufekane .A (2005) : cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère

Bouillin et al., (1970). Définition d'un flysch massylien et d'un flysch mauretanic au sein des flyschs allochtones de l'Algérie. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Série D: Sciences Naturelles*, 270(19):2249-2252 carte pédologique, carte topographique

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

Chalouan et al., (2008). The Rif Belt, In : A. Michard et al. (Ed.), *Continental Evolution: The Geology of Morocco. Lecture Notes in Earth Sciences*, 116, 203-302.

DGH., 1988. : Etude du Plan Directeur Intégré d'Aménagement des Eaux des Bassins de Sebou, Bou Regreg, Oum Er Rbia et Tensift (S.B.OT). Mission

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

Références bibliographiques

Durand-Delga M., Fontboté J.M., (1980). Le cadre structural de la Méditerranée occidentale. In : J. Auboin, J. Debelmas et M. Latreille (Ed.), Géologie des chaînes alpines issues de la Téthys. Mémoire du B.R.G.M. n°115, 67-85.

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.

Gabriel E. et al. (2009) : Contribution des Méthodes de Vulnérabilité Intrinsèque DRASTIC.

Haertle´ T. (1983): Method of working and employment of EDP during the preparation of IAHS,

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.

Levés géologiques sur terrain (log stratigraphique) « SONATRACH »

MARDHEL V. 2001 :Evaluation et cartographie de la vulnérabilité des grands aquifères

Margat J. 1993 : Exploitation des réserves d'eau souterraines.

MARGAT J., novembre 1968 : Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de sa cartographie - Rapport BRGM 68 SGL 198 HYD.

Neuilly S.S, Malmaison R, 1963 : Etude du Continental Intercalaire Saharien, réalisé par l'Organisme Technique de Mise en Valeur des Richesses du Sous-sol Saharien, Service de Conservation des Gisements, Alger, Algérie

Pételet-Giraud E. et al (2000) : RISKE : Méthode d'évaluation multicritère de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques - Applications aux systèmes des Fontanilles et Cent-Fonts (Hérault, France), Hydrogéologie - volume 4, pp. 71-88.

SCHNEBELENN.et al (2002) : Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine -Année 5. Etude Sectorielle ~ Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise Nouvelles connaissances hydrogéologiques. Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions Rapport BRGM/RP-51178-FR, 75 p.

Stambouli M.(1983) :contribution à l'étude hydrogéologique de la de l'atlas saharien (l'exemple du djebel Amour)

Références bibliographiques

SELTZER P. (1946) : Le climat de l'Algérie. Travaux de l'Institut de Meteorology et de Physique du Globe de l'Algérie. Alge.

UNESCO (2002): Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agricultural pollution: the susceptibility index. Dans : Ribeiro L. (Editeur) FGR'01 - 3rd International conference on future groundwater resources at risk, p. 35-44, CVRM (Editeur), Lisbonne, Portugal.

Zaporozec A. & Vrba J. (1994b): Classification and review of groundwater vulnerability maps. In Vrba J. et ZaporozecA. (Ed.), Guidebook on mapping groundwater vulnerability, International contributions to hydrogeology, Verlag Heinz Heise Publisher, Hanovre, 16,21-29.