



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued

Faculté des Science et Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme Master professionnel (LMD) en
Hydraulique Option: **Ouvrage Hydraulique**

THEME

**Vulnérabilité et risque à la pollution des
ressources en eaux souterraines
dans la région de Skikda
(Nord-est-Algérien)**

Présenté par :

Behir Amer
Dou Salem

Soutenu publiquement devant le jury composé de:

Mr. MILOUDI Abdel-Monem	Université d'El-Oued	Président
Mr. Nasrat Ali	Université d'El-Oued	Examineur
Mme. ZAIR Nadjet	Université d'El-Oued	Promoteur

Promotion : mai 2017

REMERCIEMENT

Nous remercies en premier lieu Dieu tout puissant pour m'avoir donné la force, la santé et la volonté d'accomplir ce modeste travail.

Au terme de ce travail, nous souhaitons exprimer notre gratitude et nos remerciements à notre promoteur madame. **Zair Nadjet**, pour la confiance dont elle nous a gratifiés en acceptant d'encadrer les travaux de ce mémoire, en se préoccupant constamment de son avancement, et à tous ceux qui ont de près ou de loin contribué à notre étude.

Nous voudrais également exprimer mes vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur Mr: MILOUDI Abdel-Monem (président) et Mr Nasrat Ali (examineur) qu'ils me font en acceptant de participer au jury.

Nous tiens à exprimer mes très vifs remerciements à tous mes enseignants du département d'hydraulique et de Génie civil et de la Faculté des Technologie à l'université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued.

Nous exprimons mon profonde gratitude à tous mes collègues de l'université d'El Oued.

Nombreuses sont les personnes qui m'ont aidé durant l'acquisition des données et la préparation de ce travail, mais nous voudrais adresser mon remerciements plus particulièrement à :

Mr. Soltani Salah Eddine

Nous étendons aussi des remerciements particuliers à la famille et les amis qui ne sont pas dissimuler leurs efforts et leur motivation pour nous.

Pour tous ceux qui ont apporté leur aide de près ou de loin à la réalisation de ce document, nous dis merci.

AMER , SALEM

DÉDICACE

En cet honorable lieu, d'un simple geste tracé par écrit, mais qui jaillie du profond sentiment de reconnaissance, permettez-moi de citer les noms comme un mémorandum pour ceux qui ont une place particulière:

*A mon très cher père
A ma très chère mère
A mes frères et sœurs*

A tous mes cousins sans exception

A toute ma famille.

A tous mes ami(e) s sans exception.

A tous ; je dédie cet ouvrage, qui est le sens de mes études supérieurs, tel un présent du cœur, en priant ALLAH tout puissant à le mettre au service de notre nation et du bien de L'humanité, et qu'il sera une lumière sur mon parcours professionnel.

AMER, SALEM

Résumé

La plaine de Skikda possède actuellement des ressources hydriques relativement illimitées, et qui sont représentées, par les eaux de surfaces et les eaux souterraines de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire. Ces dernières années, un essor économique, particulièrement agricole et industrielle, a eu lieu, ce qui a entraîné, d'une part, l'accroissement des besoins en eaux et a provoqué, d'autre part, la dégradation de la qualité des eaux.

Suite à l'analyse de la situation actuelle de la nappe et de son environnement, un programme d'action a été conçu pour mener un suivi des variations, en fonction de la lithologie et des facteurs climatiques. Nous avons ainsi pu étudier l'évolution des paramètres hydrodynamiques et physicochimiques au cours de campagne (2015).

Le traitement et la représentation des données ont été menés en faisant appel à des outils modernes :

Analyse statistique, cartographie et graphisme automatique, ainsi que la géostatistique.

L'interprétation de ces données a abouti à :

- la description de la géométrie et de la structure des nappes, réalisée grâce à l'étude géologique, qui montre que la nappe libre superficielle est constituée de graviers, sables, argiles et marnes. Elle est alimentée principalement à partir de nappes voisines et par l'infiltration des précipitations.
- La qualité chimique de l'eau qui est médiocre, et résulte d'une forte salinité, influencée par la lithologie de la nappe et le biseau salé.
- la présence de quelques polluants, tirant leurs origines des activités industrielles.

Les méthodes DRASTIC et GOD ont permis d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque inhérente à la pollution de la plaine de Skikda. L'examen de la carte de vulnérabilité a révélé que la vulnérabilité se concentre sur les classes moyenne et élevée. Les valeurs élevées de l'indice de vulnérabilité selon les deux méthodes DRASTIC et GOD varient entre 120, 160, 0,3 et 0, 7, respectivement. Cette vulnérabilité moyenne à élevée en toute la surface de la plaine, la répartition des teneurs en fer suit cette augmentation.

Mots clés : Vulnérabilité, pollution, DRASTIC, GOD, eau souterraine, Skikda.

summary

The Skikda Plain currently has relatively unlimited water resources, which are represented by the surface waters and groundwaters of the Mio-Plio-Quaternary aquifer. In recent years, an economic boom, especially agricultural and industrial, has taken place, which has, on the one hand, increased water needs and caused, on the other hand, the degradation of water quality. . Following an analysis of the current situation of the aquifer and its environment, an action program was designed to monitor variations, depending on lithology and climatic factors. We were able to study the evolution of hydrodynamic and physicochemical parameters during the campaign (2015).

Data processing and representation were conducted using modern tools:

Statistical analysis, cartography and automatic graphism, as well as geostatistics.

The interpretation of these data has resulted in:

- the description of the geometry and the structure of the sheets, realized thanks to the geological study, which shows that the free surface layer consists of gravel, sand, clay and marl. It is fed mainly from neighboring aquifers and by infiltration of precipitations.
- The chemical quality of the water which is mediocre, and results from a high salinity, influenced by the lithology of the water and the salted bevel.
- the presence of some pollutants, originating from industrial activities.

The DRASTIC and GOD methods have been used to evaluate the intrinsic vulnerability inherent in the Skikda plain pollution. Examination of the vulnerability map revealed that the vulnerability is concentrated on the middle and high classes. The high values of the vulnerability index according to the two methods DRASTIC and GOD vary between 120, 160, 0.3 and 0.7, respectively. This medium to high vulnerability in all the surface of the plain, the distribution of the iron contents follows this increase.

Key words: Vulnerability, pollution, DRASTIC, GOD, groundwater, Skikda.

ملخص

يوجد في سهل سكيكدة حالياً موارد مائية غير محدودة نسبياً ، تمثلها المياه السطحية والمياه الجوفية في طبقة المياه الجوفية الأرضية. في السنوات الأخيرة ، حدثت طفرة اقتصادية ، خاصة زراعية وصناعية ، مما أدى ، من ناحية ، إلى زيادة الاحتياجات المائية وتسبب ، من ناحية أخرى ، في تدهور نوعية المياه.

بعد تحليل للوضع الحالي لطبقة المياه الجوفية والبيئة المحيطة بها ، تم تصميم برنامج عمل لرصد التغيرات ، اعتماداً على العوامل الصخرية والعوامل المناخية. تمكنا من دراسة تطور المعلمات الهيدروديناميكية والفيزيائية الكيميائية خلال حملة (2015)

تم إجراء معالجة البيانات والتمثيل باستخدام الأدوات الحديثة .
التحليل الإحصائي ، ورسم الخرائط ورسم بياني تلقائي ، وكذلك جيوساتاستيكي
نتج عن تفسير هذه البيانات ما يلي:

- وصف للهندسة وهيكل الطبقة ، تتحقق بفضل الدراسة الجيولوجية ، مما يدل على أن الطبقة السطحية الحرة تتكون من الحصى والرمل والطين والمارل. يتم تغذيته بشكل رئيسي من طبقات المياه الجوفية المجاورة ومن خلال تسرب الامطار -الجودة الكيميائية للمياه التي هي دون المتوسط، وينتج عن ملوحة عالية، تتأثر بعلم الصخور للماء والشطف المملوء.
وجود بعض الملوثات الناشئة عن الأنشطة الصناعية

لتقييم القابلية الجوهرية المتأصلة في تلوث سهل سكيكدة. كشفت دراسة GOD و DRASTIC وقد استخدمت طريقة خريطة الضعف أن الضعف يتركز في الطبقات المتوسطة والعالية. تختلف القيم العالية لمؤشر الضعف وفقاً للطريقتين بين 120 و 160 و 0.3 و 0.7 على التوالي. هذا الضعف المتوسط إلى العالي في كل سطح GOD و DRASTIC السهل، فإن توزيع محتويات الحديد يتبع هذه الزيادة.

الكلمات المفتاحية ، الضعف ، GOD و DRASTIC ، المياه الجوفية ، سكيكدة ، التلوث.

SOMMAIRE

N°	Titres	Page
	Introduction générale	01
<i>Chapitre I Aperçu géographique et géologique de la région d'étude</i>		
I	Caractéristiques géographiques et géologiques	03
I.1	Situation géographique de la zone d'étude	03
I.1.1	Description de la zone d'étude	04
I.1.1.1	Le contexte agricole	05
I.1.1.2	Le contexte industriel	05
I.2	Géomorphologie et relief	05
I.3	Climat et végétation	06
I.4	le Réseau hydrographique de la région de Skikda	06
I.5	Caractéristique climatologiques de la zone d'étude	08
I.6	Caractéristique géologiques	08
I.6.1	Introduction	08
I.6.2	Cadre géologique régionale	08
I.6.3	Les zones internes	09
I.6.3.1	Le socle kabyle	09
I.6.3.2	La dorsale kabyle	09
I.6.3.3	Le domaine des flyschs	09
I.6.3.4	L'oligo-miocène kabyle	10
I.6.3.5	Le numidien	10
I.6.3.6	Les Olistostromes	10
I.6.4	Les zones externs	10
I.6.4.1	Les nappes telliennes	10
I.6.4.2	Les nappes ultra-telliennes	11
I.6.4.3	Les nappes péni-telliennes	11
I.7.	Géologie de la zone d'étude	11
I.7.1	Les dunes anciennes	11
I.7.2	Les alluvions	11
I.8	Tectonique	14

I.9	CONCLUSION	15
<i>Chapitre II: Hydroclimatologie</i>		
II.1	Introduction	16
II.2	Climatologie de la zone d'étude	16
II.3	Stations de mesure	16
II.4	Facteurs climatiques	16
II.4.1	Les précipitations	16
II.4.1.1	Répartition des précipitations mensuelles	17
II.4.1.2	Les précipitations moyennes mensuelles	17
II.4.1.3	Précipitations moyennes saisonnières	18
II.4.1.4	Précipitations annuelles	19
II.4.1.5	le coefficient pluviométrique (CP)	21
II.4.2	Température	23
II.4.2.1	Variation des températures moyennes mensuelles	23
II.4.2.2	Diagramme ombro - thermique (pluvio - thermique)	24
II.4.3	L'humidité relatives de l'air	25
II.4.4	Les vents	25
II.4.5	Insolation	26
II.5	Le bilan hydrique	26
II.5.1	L'évapotranspiration	26
II.5.2	Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	27
II.5.3	Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)	28
II.5.4	Ruissellement (R)	29
II.5.5	Infiltration (I)	29
II.5.6	Analyse du bilan hydrique	30
II.5.7	Interpretation du bilan hydrique	32
II.6	Conclusion	33
<i>Chapitre III: Caractéristiques hydrogéologiques</i>		
III	Les Caractéristiques Hydrogéologiques du bassin	34
III.1	Introduction	34
III.2	Les horizons aquifères	34
III.2.1	L'aquifère poreux	34
III.2.2	L'aquifère karstique	35

III.3	La coupe hydrogéologique	35
III.3.1	Inventaire des forages et puits pour la réalisation de la coupe hydrogéologique	35
III.3.2	Etablissement de la coupe hydrogéologique	36
III.3.3	Interprétation de la coupe hydrogéologique	37
III.3.4	Les conditions aux limites	37
III.4	La piézomètre	37
III.4.1	Les limites de l'aquifère superficiel	37
III.4.2	L'inventaire des points d'eau	38
III.4.3	L'alimentation de l'aquifère superficiel	40
III.5	Bilan du système aquifère	40
	Conclusion	41
Chapitre IV: Etude de la vulnérabilité de la nappe à la pollution		
IV.1	Introduction	42
IV.2	Paramètres physiques	43
IV.2.1	pH	43
IV.2.2	Conductivité électrique (CD)	44
IV.2.3	La dureté total : TH (°F)	45
IV.3	paramètres chimiques	46
IV.3.1	Le couple Na^+ - Cl^-	46
IV.3.2	Le couple Ca^{++} - SO_4^{2-}	47
IV.3.3	Le couple HCO_3^-	48
IV.4	Détermination des faciés hydrochimiques	50
IV.5	Evaluation de risque de la plaine à la pollution	51
IV.5.1	Introduction	51
IV.5.2	Origine de la salinité	51
IV.5.3	Détermination de la salinité par les rapports caractéristiques	51
IV.5.3.1	Rapport Caractéristique $r\text{HCO}_3^-/r(\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-})$ en fonction de la CE	52
IV.5.3.2	Rapport $r\text{Cl}^-/r\text{SO}_4^{2-}$ en fonction de la conductivité électrique	53
IV.6	Aptitude des eaux à l'irrigation	54

IV.6.1	Classification des eaux par la méthode de Wilcox	54
IV.7	Pollution anthropique	55
IV.7.1	Cas des nitrates	56
IV.7.2	Cas des nitrites	57
IV.7.3	Cas des phosphates (PO₄³⁻)	57
IV.7.4	Eléments métalliques en traces	58
IV.7.4.1	Fer (Fe)	58
IV.8	Etude d'approche de la vulnérabilité de la plaine de Skikda	59
IV.8.1	Introduction	59
IV.8	Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines	59
IV.8.3	Présentation les deux méthodes	60
IV.8.4	Etablissement la carte de vulnérabilité	61
IV.8.4.1	Etablissement la carte de vulnérabilité par méthode DRASTIC	61
IV.8.4.2	Etablissement de la carte de la vulnérabilité à la pollution par la méthode GOD	67
IV.8.5	Cartes de synthèse	69
IV.8.5.1	méthode statistique	69
IV.8.5.2	méthode DRASTIC	70
IV.8.5.3	méthode GOD	71
IV.8.6	Analyse de sensibilité de paramètre unique	72
IV.8.7	Validation la carte de vulnérabilité à la pollution par le Fer	73
IV.8.7.1	Distribution spatiale de Fer	73
IV.9	Conclusion	74
	Conclusion général	75

Liste des tableaux

N°	Titres	Page
Tableau N°01	Coordonnées géographiques de la station de mesure	16
Tableau N°02	Precipitations moyennes mensuelles (mm)	17
Tableau N°03	Répartition saisonnière des précipitations en (mm) à la station de Skikda (1993/1994 - 2014/2015)	18
Tableau N°04	Précipitations annuelles en (mm) de la station de Skikda (1994/1995 - 2014/2015)	20
Tableau N°05	Récapitule les résultats du coefficient pluviométrique (CP)	22
Tableau N°06	Températures moyennes mensuelles (°C) à la Station SKIKDA (1994-1995/2014-2015)	23
Tableau N°07	Humidité moyennes mensuelles en (%) à la station de Skikda	25
Tableau N°08	Vitesses moyennes mensuelles du vent en m/s station de Skikda	25
Tableau N°09	Durée d'insolation en heures (Ig) à la station de Skikda	26
Tableau N°10	Résultats de l'ETP obtenus par la formule de « C.W.Thornthwaite » à la station de Skikda (1994/1995-2014/2015).	27
Tableau N°11	Résultats de l' ETR obtenus par la formule de (TURC) (1994/2015)	28
Tableau N°12	: Résultats du ruissellement par la formule de «Tixeront Berkaloff» pour la station de Skikda (1994/1995-2014/2015).	29
Tableau N°13	Estimation de l'infiltration par l'équation fondamentale du bilan hydrique	30
Tableau N°14	Le bilan d'eau de C.W THORONTHWAITE–station de Skikda (1994-2015)	31
Tableau N°15	Inventaire des forages	35
Tableau N°16	Evolution des classes d'irrigation selon Wilcox	55
Tableau N°17	Valeurs des indices et des classes de vulnérabilité DRASTIC et GOD	61
Tableau N°18	Statistique de paramétrer unique sensibilité	55

Liste des figures

N°	Titres	Page
Figure N° 01	Situation géographique de Skikda	03
Figure N° 02	Carte du découpage administratif du bassin du Saf-Saf	04
Figure N° 03	Réseau hydrographique de la zone d'étude	07
Figure N° 04	Carte géologique de la région de Skikda (J.M.Vila 1977)	12
Figure N° 05	Schéma géologique de la région de Skikda	13
Figure N° 06	Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (en mm) de la station de Skikda (1993/1994-2014/2015).	17
Figure N° 07	Histogramme des précipitations moyennes saisonnières en (mm) à la station de Skikda (1993/1994 - 2014/2015)	18
Figure N° 08	Diagramme de CP dans la station du Skikda (1994-2015)	23
Figure N° 09	Température moyenne mensuelle de la station Skikda (1994-1995/2014-2015).	24
Figure N° 10	Le diagramme ombro-thermique de la station de Skikda (1994-1995/2014-2015)	24
Figure N° 11	Représentation graphique du bilan de THORNTWAIT, station de Skikda (1994-2015)	31
Figure N° 12	Coupe hydrogéologique dans la plaine de Skikda (Attoui Barda modifiée 2016)	36
Figure N° 13	Carte d'inventaire des points d'eau de la plaine alluviale de Skikda (Aout 2015)	38
Figure N° 14	Carte piézométrique de la nappe alluviale de Skikda (Aout 2015)	39
Figure N° 15	position des points de prélèvements (souterrains)	42
Figure N° 16	Carte de répartition spatiale des teneurs de pH (Aout 2015)	43
Figure N° 17	Carte de répartition spatiale de Conductivité électrique (Aout 2015)	44
Figure N° 18	Carte de répartition spatiale de dureté totale (Aout 2015)	45
Figure N° 19	Carte de répartition spatiale de teneurs de Na ⁺² (Aout 2015)	46
Figure N° 20	Carte de répartition spatiale de teneurs de Cl ⁻ (Aout 2015)	47
Figure N° 21	Carte de répartition spatiale de teneurs de Ca ⁺² (Aout 2015)	48
Figure N° 22	Carte de répartition spatiale de teneurs de SO ₄ ⁻² (Aout 2015)	49
Figure N° 23	Carte de répartition spatiale de teneurs de HCO ₃ ⁻ (Aout 2015)	49

Figure N° 24	Diagramme de Piper (Aout 2015) de la plaine de Skikda	50
Figure N° 25	La relation $r\text{HCO}_3^-/r(\text{Cl}+\text{SO}_4^{2-})$ conductivite Août 2015L	52
Figure N° 26	La relation $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ conductivite Août 2015	53
Figure N° 27	Diagramme de Wilcox pour l'année 2015	54
Figure N° 28	Carte de Nitrates de la plaine de Skikda 2015	56
Figure N° 29	Carte de Nitrites de la plaine de Skikda 2015	57
Figure N° 30	Carte de phosphate de la plaine de Skikda 2015	58
Figure N° 31	Carte de Fer de la plaine de Skikda 2015	59
Figure N° 32	Carte de profondeur du niveau d'eau dans la plaine de Skikda	62
Figure N° 33	Carte de la recharge d'eau dans la plaine de Skikda	63
Figure N° 34	Carte des matériaux de l'aquifère de la plaine de Skikda	63
Figure N° 35	Carte de nature de sol de la plaine de Skikda	64
Figure N° 36	Carte de l'indice de pente de la plaine de Skikda	65
Figure N° 37	Carte de l'impact de vadose zone de la plaine de Skikda	66
Figure N° 38	Carte de perméabilité de la plaine de Skikda	67
Figure N° 39	Carte de type d'aquifer de la plaine de Skikda	68
Figure N° 40	Carte d'impact de la zone non saturée de la plaine de Skikda	68
Figure N° 41	Carte de profondeur d'eau de la plaine de Skikda	69
Figure N° 42	Carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC de la plaine de Skikda	70
Figure N° 43	Carte de vulnérabilité selon la méthode GOD de la plaine de Skikda	71

Introduction générale

L'eau est un élément indispensable à la vie et revêt une importance capitale pour toute activité humaine. L'eau peut être rare à certains endroits, comme les zones arides et semi-arides, ou tout simplement de mauvaise qualité dans d'autres régions. Il est certain que l'augmentation de la demande en eau pour les activités humaines accentuera les contraintes sur cette ressource. En outre, les facteurs naturels, telle que la sécheresse ou les contraintes géologiques, ont un effet sur l'approvisionnement en eau potable et sa distribution.

La présente étude vise donc à délimiter les zones contaminées et à déterminer l'origine de ces contaminants dans la nappe superficielle, car le contrôle de cette contamination passe par une bonne connaissance des sources de contaminants et des conditions hydrodynamiques et lithologiques de la nappe, qui influent sur leur mobilité.

Dans cette étude, nous allons essayer de mieux comprendre l'impact des paramètres climatiques et lithologiques sur la qualité de cette ressource souterraine et d'optimiser l'interprétation des analyses physico-chimiques en utilisant des moyens adéquats.

Il est donc essentiel de quantifier et d'analyser la quantité et la qualité des réserves en eau et de trouver le moyen de gérer cette ressource pour en assurer la durabilité.

Dans ce contexte, la présente étude vient enrichir les anciens travaux de recherche, et ce pour donner un aperçu scientifique sur l'état actuel de la nappe superficielle de notre zone d'étude Skikda. Les dernières décennies sont caractérisées par une sécheresse intense qui touche l'Algérie du Nord d'une manière générale. Cette situation rend le domaine de l'eau de plus en plus vital et les nappes aquifères de plus en plus vulnérables à la pollution. La région de SKIKDA a connu une certaine expansion économique industrielle et agricole, Ceci a d'une part, augmenté la demande en eau et a d'autre part exposé les ressources en eau à différentes pollutions résultant de l'activité agricole et industrielle.

Ce travail s'est attelé à répondre aux préoccupations suivantes :

- Quel est l'état actuel de la qualité chimique des eaux souterraines de la nappe?
- Quels sont les mécanismes physico-chimiques régissant l'évolution des éléments chimiques dans le temps et dans l'espace (influence de la lithologie et des facteurs climatiques sur le chimisme de la nappe)?
- Quels sont les différents polluants chimiques existant dans l'eau ainsi que leur origine?
- Délimiter les zones contaminées.

Afin de répondre à ces préoccupations, nous allons adopter la méthodologie suivante :

- Etude des paramètres physiques et chimiques de l'eau.
- Etude des dépendances et relations entre les divers paramètres physico-chimiques de l'eau.
- Etude des mécanismes d'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines.
- Etude des polluants et de leur origine.

Plusieurs outils (géologique, hydrodynamique, chimique, statistique et informatique) ont été utilisés, afin de mieux interpréter les données acquises.

La première partie est consacrée à l'étude des contextes géographique et géologique de la région d'étude en présentant les caractéristiques géologiques et hydroclimatologique.

La deuxième partie traite de l'hydrogéologie de la nappe superficielle de la région d'étude, en définissant et interprétant sa piézométrie.

La troisième partie concerne l'étude de l'évolution des paramètres chimiques dans le temps et dans l'espace en abordant les mécanismes de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines. Dans cette partie il a été question de la détermination des différents polluants dégradant la qualité des eaux souterraines et de la vulnérabilité de la nappe superficielle.

Chapitre I

Aperçu géographique et géologique de la région d'étude

I. Caractéristiques géographiques et géologiques

I.1. Situation géographique de la zone d'étude :

La wilaya de Skikda s'étend sur une superficie de 4 118 km², se situe dans la partie Nord-est du pays, dans l'espace géographique compris entre l'Atlas Tellien et le littoral méditerranéen. Elle dispose de 140 km de côtes qui s'étalent de la Marsa à l'est jusqu'à Oued Z'hour aux fins fonds du massif de Collo à l'ouest. Elle est limitrophe avec les Wilaya de Annaba, Guelma, Constantine et Jijel.



Figure N°01 : Situation géographique de Skikda (khelfaoui Fayçal mémoire magister 2007)

I.1.1. Description de la zone d'étude :

La zone d'étude appartient à la partie avale du bassin versant de Saf-Saf, elle est limitée au Nord par la mer méditerranée, au Sud par la Daïra de Ramande Djamel, à l'Ouest par la Daïra d'Elhadaïek et à l'Est par la Commune de Beni-Bachir.

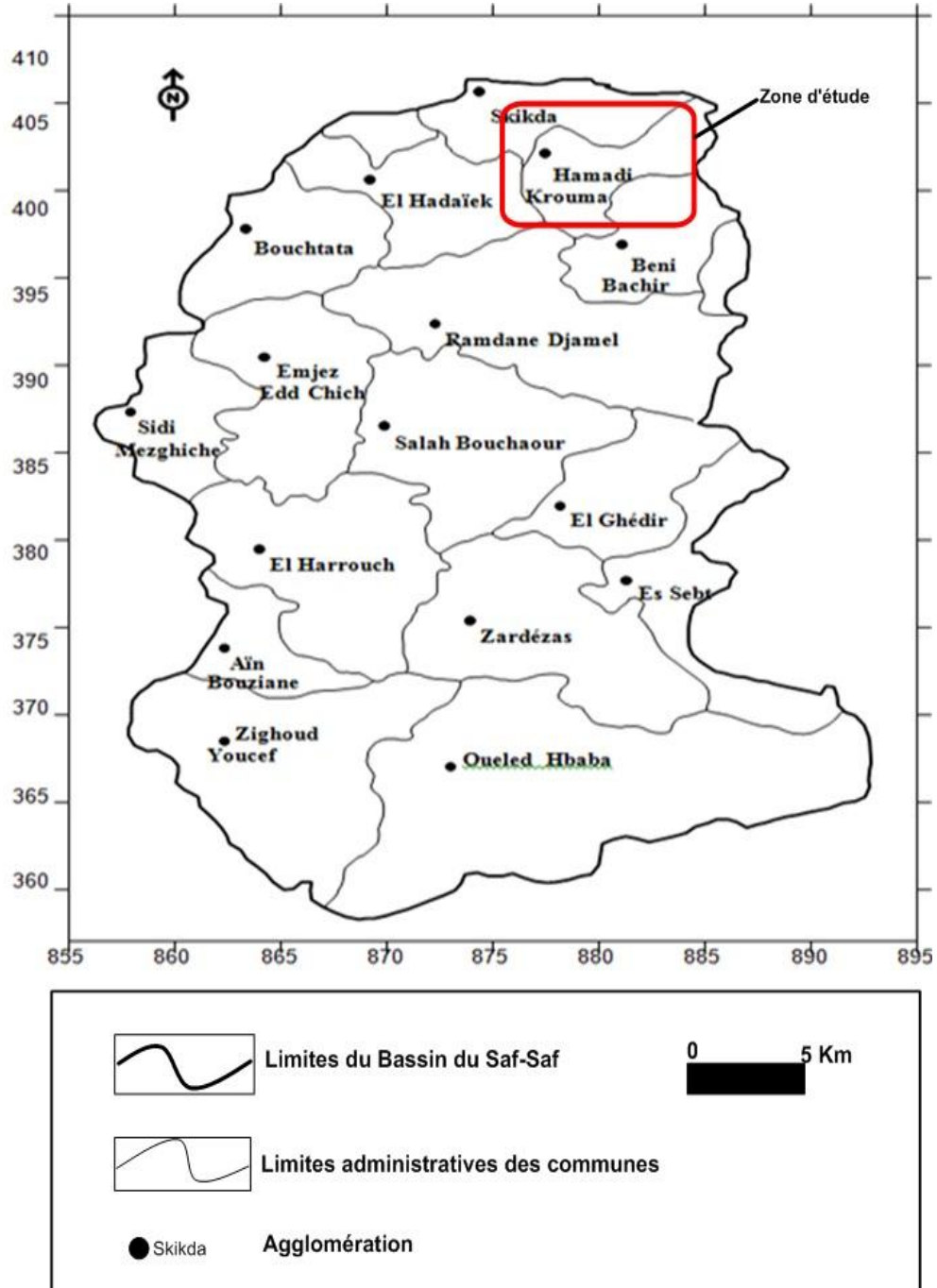


Figure N°02 : Carte du découpage administratif du bassin du Saf-Saf

I.1.1.1. Le contexte agricole :

La wilaya de Skikda est une région à vocation agricole, avec une surface de 193179 ha soit 46,68% de la surface totale de la wilaya. Les grands périmètres sont irrigués par les eaux des barrages, et les périmètres agricoles de moindre importance utilisent les eaux de forages, puits et retenues collinaires.

I.1.1.2. Le contexte industriel :

L'activité industrielle dans la wilaya de Skikda est fortement concentrée autour des grandes agglomérations telles que : Skikda, Azzaba et El-Harouch.

Le secteur d'étude est purement par l'industrie pétrochimique du groupe Sonatrach (la zone industrielle) située 4Km à la ville de Skikda. Contenant les différents complexes :

Le complexe de liquéfaction du gaz naturel (GL1/K) ;

Le complexe de raffinage (RA1/K) ;

Le complexe des matières plastiques (CP1/K) ;

Transport des hydrocarbures, gaz naturel et pétrole brut ;

La centrale thermique ;

Ajoutant à cela la minorité et la production des pates(ERIAD) à Hammadi Krouma.

I.2.Géomorphologie et relief

Autour de la région de Skikda se trouvent quelques reliefs :

- Le Djebel El Alia et le Djebel Filfila à altitudes variant entre 400 et 600 m.
- La chaîne numidique ou Dorsale de l'Atlas tellien, barrière physique Est-Ouest, composée de plusieurs massifs dont le Kef Sidi Driss culminant à 1364 m. La parties septentrionale de la chaîne numidique prend une orientation Sud-Ouest, Nord-Est ; les altitudes diminuent et atteignent 620 m à Kef Moma et 600 m au Kef Sebaroud.

I.3.Climat et végétation

Le climat qui règne sur la région de Skikda est un climat sub-humide à humide tempérérelativement doux, influencé par la mer méditerranée, caractérisé par deux saisons distinctes :

- Une saison un peu froide et humide, qui s'étale du mois d'octobre jusqu'au mois d'avril, elle est caractérisée par une température moyenne de l'ordre de 14°C.
- Une saison chaude et sèche allant du Mai jusqu'à Septembre caractérisée par une température moyenne 22°C. La température moyenne annuelle de l'ordre de 18°C.

Ces conditions climatiques imposent le développement d'une végétation typique dans la région. On trouve surtout des cultures maraîchères et la céréaliculture ainsi que des oranges et des vignes, les montagnes sont couvertes de maquis et des chaînes liégées.

I.4.Le Réseau hydrographique de la région de Skikda

La wilaya de Skikda est traversée par trois principaux cours d'eau à savoir : oued kebir à l'Est, oued Saf-Saf au Centre et oued Guebli à l'Ouest. Sept bassins hydrographiques sont alors identifiés au niveau de la région :

- ❖ A l'Ouest: on identifiés les deux bassins hydrographiques suivant :
 - ✓ le bassin côtier du Cap Bougaroun.
 - ✓ le bassin de l'oued Guebli.
- ❖ Au Centre : ainsi pour le centre, possède deux bassins hydrographiques :
 - ✓ le bassin de l'oued Bibi.
 - ✓ le bassin de l'oued Saf-Saf.
- ❖ A l'Est: trois bassins hydrographiques s'identifiés :
 - ✓ le bassin côtier de Filfila.
 - ✓ le bassin côtier du Kebir Ouest.
 - ✓ le bassin côtier du Kebir Ouest cote Magroun.

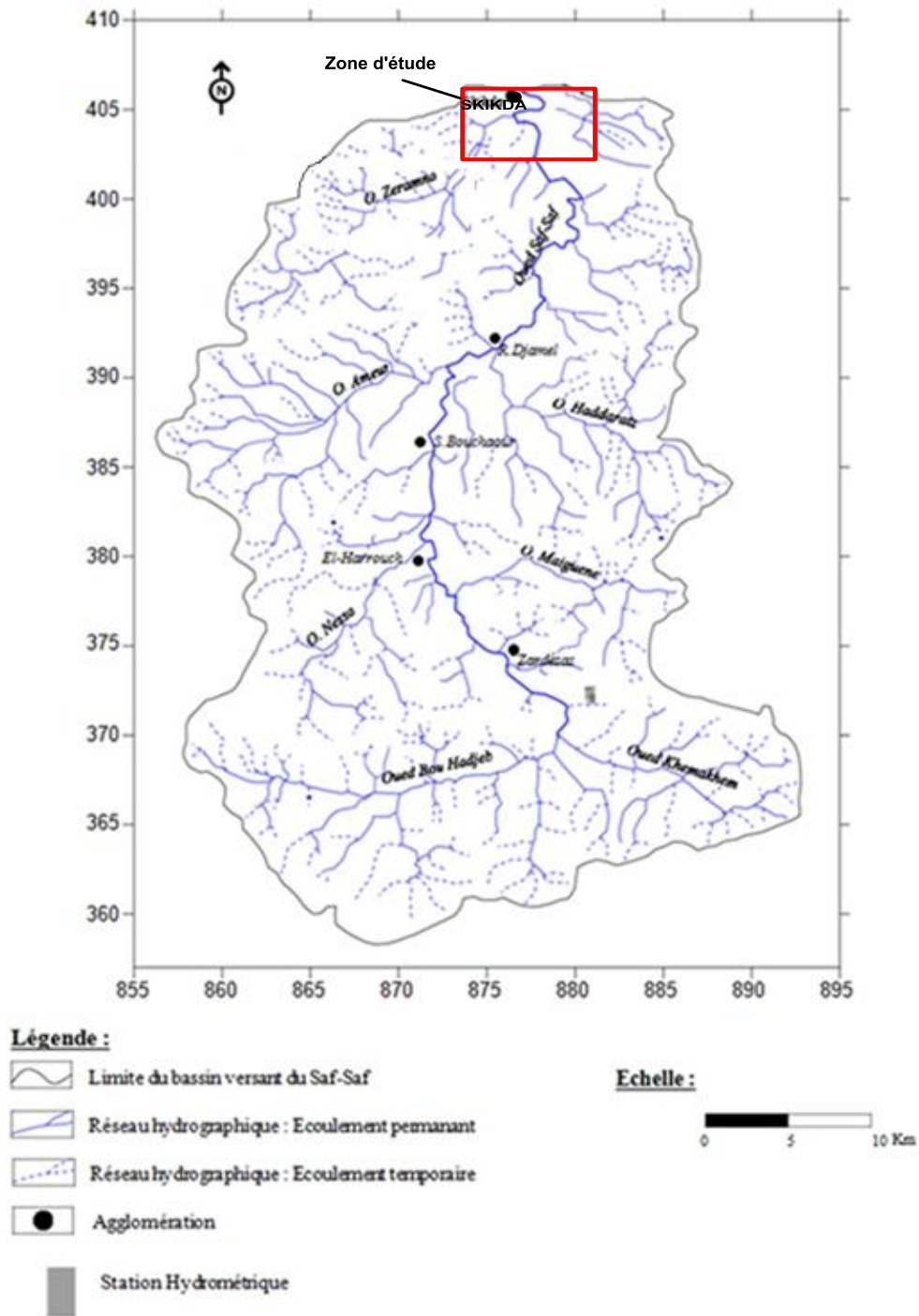


Figure N°03 : Réseau hydrographique de la zone d'étude (khelfaoui Fayçal mémoire magister 2007)

I.5. Caractéristiques climatologiques de la zone d'étude

L'ensemble des caractéristiques climatiques, jouent un rôle très important dans le domaine de l'environnement. Des données climatiques relevées de la station météorologique du port de Skikda sur une période de dix ans (2006 - 2016) illustrent le climat qui caractérise notre zone d'étude.

Notre zone d'étude se caractérise par un climat typiquement méditerranéen. Il est chaud et sec en été, doux et pluvieux en hiver.

Il faut noter que la région de Skikda est l'une des régions les plus importantes du point de vue pluviométrique (ANPE, 1994).

I.6. Caractéristiques géologiques:

I.6.1. Introduction:

L'analyse de l'environnement géologique est fondamentale à l'étude hydrogéologique. La géologie permet d'identifier les matériaux et les structures des formations susceptibles de conduire l'eau des précipitations en profondeur. Elle permet aussi de déterminer le type d'aquifère

I.6.2. Cadre géologique régionale :

Le massif de la petite Kabylie fait partie de la chaîne des Maghrebides (Durand – Delga, 1955 ; 1969 ; 1980, Bouillin, 1971 ; 1977, Wildi, 1983.). La mole néritique Constantinoise s'étend sur plus de 150 Km le long du littoral, limitant la partie sud du bassin versant (Kef Toumiette, Kef Hahouner) est représenté par la chaîne de calcaire massif du Crétacé dirigé d'Est (Edough) en Ouest (Babors), les flancs Ouest et Nord-Est du bassin présentent des terrains anciens métamorphiques.

Le cadre structural étant très complexe, peut être défini par la superposition de plusieurs unités structurales.

I.6.3. Les zones internes :

I.6.3.1. Le socle kabyle :

Le socle de la petite Kabylie est composé d'un ensemble de roches métamorphiques, méso zonales, à cata zonales et d'ensemble de roches peu ou pas métamorphiques.

Sur le plan structural, l'ensemble métamorphique est constitué par la superposition de trois édifices tectoniques (Mahdjoub, 1991) avec de bas en haut :

- ✓ Edifice de Bougaroun,
- ✓ Edifice de Beni-Ferguène,
- ✓ Edifice supérieur.

Les massifs anciens métamorphiques occupent une grande partie du bassin du Saf- Saf. Du côté Ouest, ils s'étendent de Stora jusqu'au col de Staiha, ils affleurent également au Sud d'El-Harrouch et au Nord de Aine Bouziane, ils sont formés de phyllades, de micaschistes et de porphyroïdes.

Dans la partie Nord-Est du bassin (Dj. Filfila), ils sont essentiellement dominés par des schistes et des marbres.

I.6.3.2. La dorsale kabyle :

La dorsale kabyle est constituée essentiellement par des formations épaisses de calcaire. Raoult, (1974) a subdivisé la dorsale Kabyle en trois sous-unités superposées du Nord vers le Sud :

- ✓ Dorsale interne,
- ✓ Dorsale médiane,
- ✓ Dorsale externe.

Elle affleure au Sud-Ouest du bassin versant de l'oued Saf-Saf (Dj. Rhedir, Kef Sebargoude, Kef Toumiette).

I.6.3.3. Le domaine des flyschs :

Il est composé de terrain d'âge Crétacé à Eocène à dominance carbonatée, parmi lesquels on reconnaît deux séries stratigraphiques bien individualisées : la série du flysch Mauretarien et celle du flysch Massilien (Raoult, 1969 ; Bouillin et Al., 1970).

I.6.3.4. L'oligo – miocène kabyle :

C'est une série sédimentaire correspondant à la couverture stratigraphique transgressive initiale du socle Kabyle (Raoult, 1974 ; 1975). Elle est constituée par :

- Un conglomérat à la base,
- Des grés micacés à débris provenant du socle,
- Des selexites à radiolaires.

I.6.3.5. Le Numidien :

La nappe numidienne comporte à sa base des argiles à Tubotomaculum dont le sommet est daté de l'Oligocène supérieur. Ces argiles sont surmontées par des bancs de grés à quartz roulé d'âge Aquitainien à Burdigalien inférieur basal.

Les formations numidiennes occupent les sommets des unités structurées précédentes. Elles affleurent au niveau de Zerdazas, Kef Toumiette et de Dj. Bou Abed, ainsi qu'au niveau de la plus part des koudiets du centre du bassin.

I.6.3.6. Les Olistostromes :

Décrits pour la première fois en Petite Kabylie par Bouillin et Raoult (1971), les Olistostromes sont des formations tectono-sédimentaires à débris de flyschs intercalés avec des passées grés-micacées d'âge Aquitainien et Burdigalien inférieur, faisant suite à l'O.M.K. L'Oligo – Miocène Kabyle.

I.6.4. Les zones externes :

Elles sont constituées par des nappes de flyschs comportant des terrains datés du Crétacé à l'Eocène. Ces formations qui ont subies une tectonique tangentielle majeure d'âge fini-Lutétien ou fini-Oligocène (Bouillin, 1977), reposent particulièrement sur l'autochtone saharien.

I.6.4.1. Les nappes telliennes :

Elles sont composées d'un empilement de nappes pelliculaires d'âge Crétacé à Eocène (Durand-Delga, 1969).

I.6.4.2. Les nappes ultra-telliennes :

Elles sont représentées par des sédiments clairs du Néocomien à l'Eocène. Elles se sont mises en place par des diverticulatons (Lahondère, 1987). Elles affleurent au Sud-Ouest de Kef Toumiette et de Djebel Bou Abed. L'affleurement de la série ultratellienne se localise au Nord de Kef Hahouner. Cette série comporte des marno-calcaires à ammonites, pyrites et des marno-calcaires microbréchiques.

I.6.4.3. Les nappes péni-telliennes :

Elles sont composées essentiellement de formations à tendance néritique d'âge Cénomaniens à Jurassiques. Ce sont les nappes les plus basses structurellement.

I.7. Géologie de la zone d'étude :

Le quaternaire couvre la majeure partie du bassin versant. D'après les coupes géologiques établies dans le terrain d'étude par ALGEO, il est formé par des dunes anciennes et des alluvions.

I.7.1. Les dunes anciennes : Rencontrées au Nord Est de la plaine de Skikda, le long de la côte. Elles sont constituées par trois niveaux : inférieur, moyen et supérieur.

I.7.2. Les alluvions : on distingue trois types :

- Alluvions actuelles : limons du lit majeur de Saf -Saf, de Zeramna et de la plaine formée par le confluent de ces deux Oueds représenté par des sables, des limons du lit moyen et de sables des plages.
- Alluvions récentes : se sont des limons et des cailloux roulés du fond des vallées.
- Alluvions anciennes : se sont des terrasses de limons et de cailloux roulés qui drainent de 15 m à 50 m le lit de l'Oued Saf -Saf et Zeramna jusqu'à El Harrouche.

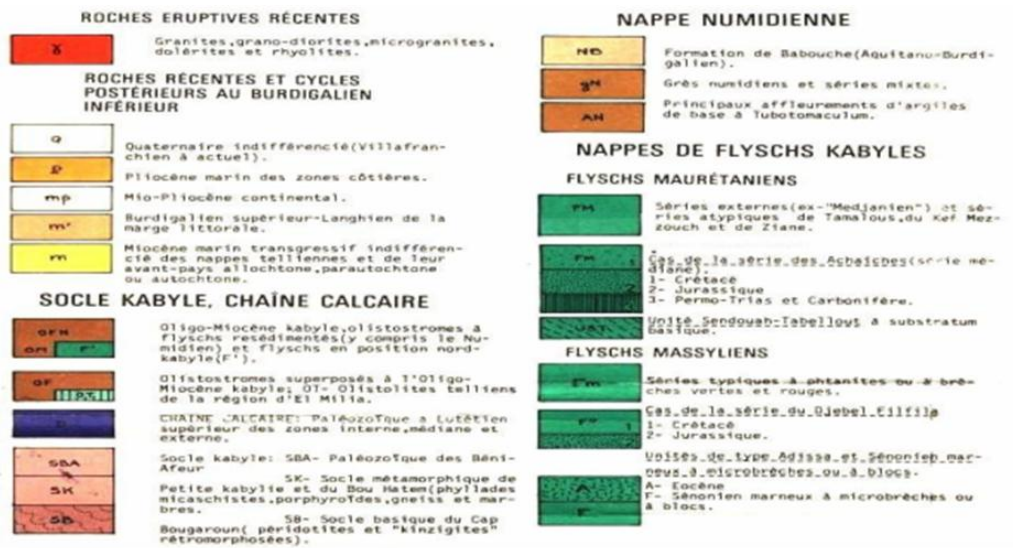
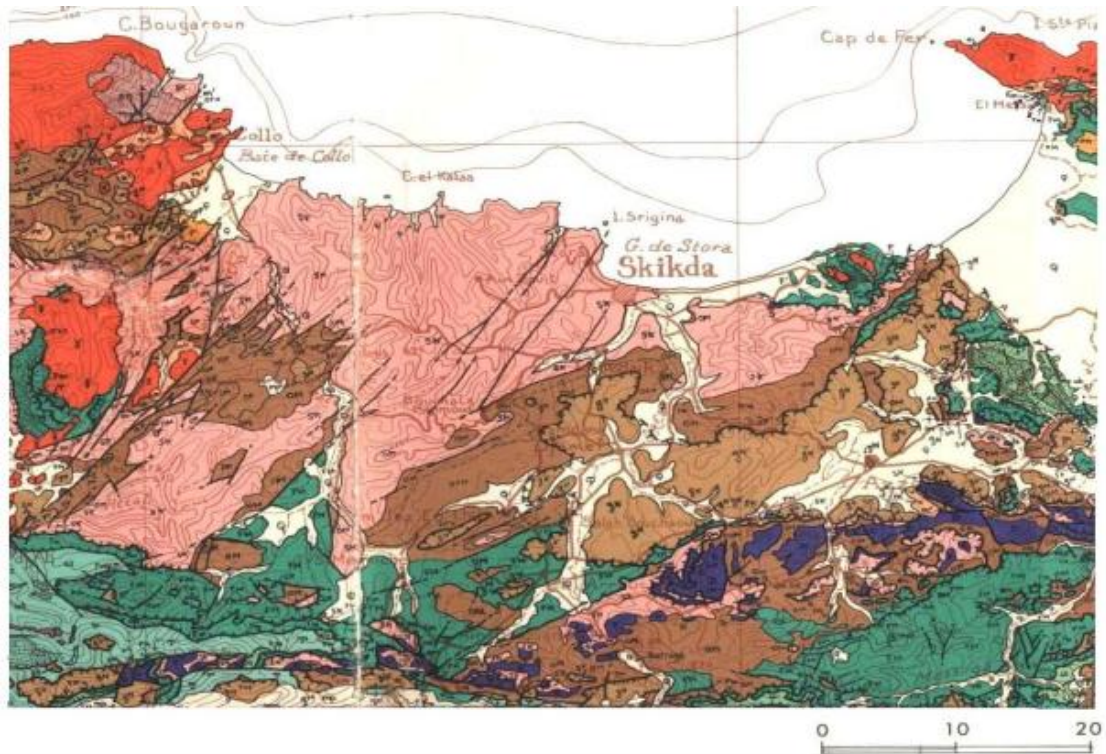


Figure N°04 : Carte géologique de la région de Skikda (J.M.Vila 1977)

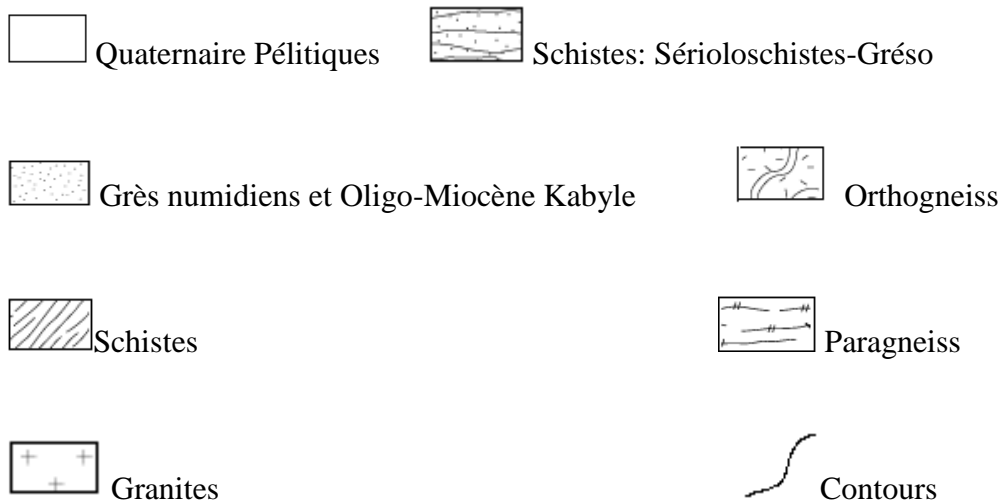
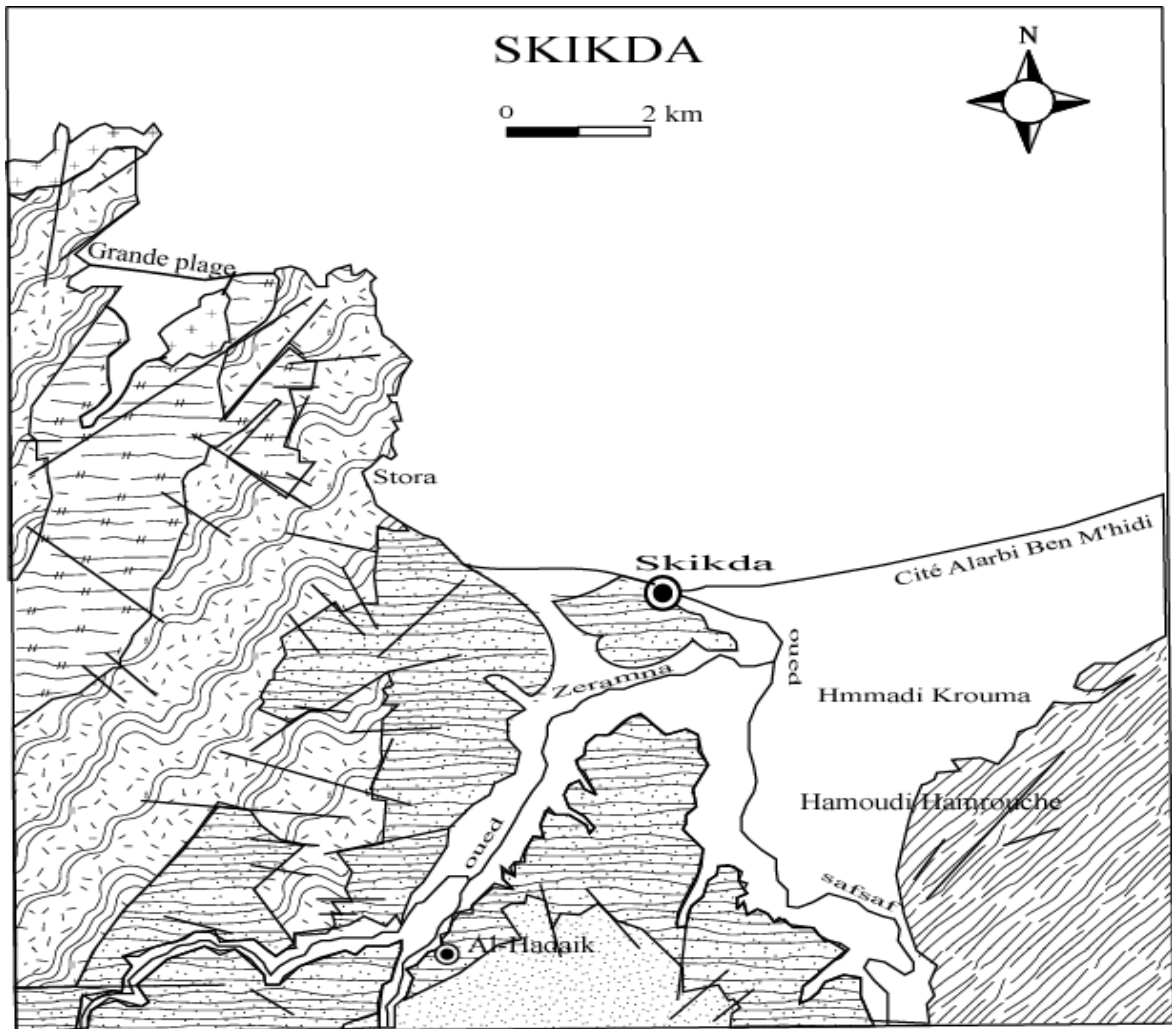


Figure N°05 : Schéma géologique de la région de Skikda (khelfaoui Fayçal mémoire magister 2007)

I.8. Tectonique :

Le bassin versant de l'oued Saf-Saf est affecté par une néotectonique responsable de la structure actuelle. D'après Raoult (1974), les phases tectoniques les plus importantes sont :

✓ **les mouvements tectoniques précoces (Crétacé- Paléocène) :**

La dorsale kabyle est affectée par de nombreuses petites failles durant le Jurassique et la Néocomien – Barrémien. L'action de ces mouvements s'étend aussi au niveau de dorsale médiane (Dj. Bou Abed : Crétacé supérieur). Dj. Bougrina est entouré par le flysch mauretaniens et présente deux importantes failles, l'une d'une grande extension NW-SE. Dans la dorsale externe, la zone de Tengout a été fortement tectonisée pendant le Draconocénomanien. Une partie de la dorsale externe est charriée sur la série du Rhédir.

✓ **La phase fini-Lutétienne (Lutétien supérieur- Priabonien du Dj. Tengout et du Dj. Rhédir) :**

Cette phase est caractérisée par une tectonique tangentielle qui est post – Paléogène.

• **La phase Oligocène et Miocène (Oligocène terminal- Aquitanien) :**

Elle est caractérisée par de nombreux plis et failles, cette phase est responsable de l'accident d'El Kantour et de la position structurale de la série de Filfila.

I.9. Conclusion :

Du point de vue géologique, la région d'étude présente des terrains allant du Paléozoïque au Quaternaire. La diversité lithologique et l'évolution structurale des massifs limitrophes de la région d'étude ont conditionné dans de larges mesures, l'accumulation de matériaux détritiques alluvionnaires qui représente un intérêt hydrogéologique important .

Chapitre II
Hydroclimatologie

II.1. Introduction :

L'étude hydroclimatologique est nécessaire pour mieux comprendre les mécanismes d'échange et de circulation des eaux superficielles. Elle permet également d'identifier les termes du bilan hydrique notamment les précipitations, les températures, l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration.

II.2. Climatologie de la zone d'étude :

La région est soumise à un climat méditerranéen caractérisé par un hiver doux et humide, et par un été chaud et sec.

Pour bien préciser les caractéristiques du climat, il est nécessaire d'étudier les différents facteurs climatiques qui le composent notamment : les précipitations, les températures, et l'évapotranspiration...etc...

II.3. Stations de mesure :

L'étude climatologique est basée sur l'interprétation des données météorologiques enregistrées au niveau de la station de SKIKDA (nouveau port) Dans cette station, on a des observations faites sur une période de 21 ans (1994-2015).

Les coordonnées de cette station sont consignées dans le tableau N°01:

Tableau N°01 : Coordonnées géographiques de la station de mesure.

<i>Station</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>	<i>Altitude</i>	<i>Période d'observation</i>
SKIKDA	06°56'E	36°53'N	10m	1994/ 2015

II.4. Facteurs climatiques :

II.4.1. Les précipitations :

Les précipitations, facteur important du climat, conditionnent le comportement hydraulique des variations des niveaux des nappes souterraines. La pluviométrie est la principale source d'alimentation des bassins. Elle constitue donc l'élément fondamental du bilan hydrologique.

D'après le rapport de la direction de l'environnement (1999), La wilaya de Skikda est l'une des régions les plus arrosées d'Algérie, la pluviométrie annuelle enregistrée est très forte. Les pluies sont généralement torrentielles.

Ces précipitations sont hivernales et ont lieu entre Novembre et Février. Les mois de Jui

II.4.1.1. Répartition des précipitations mensuelles :

Pour caractériser les pluies en une station observée durant une période donnée, il est nécessaire de calculer la hauteur des pluies moyennes mensuelles pour chaque mois de l'année afin de mieux mettre en évidence la répartition des précipitations, Juillet et Août sont particulièrement secs.

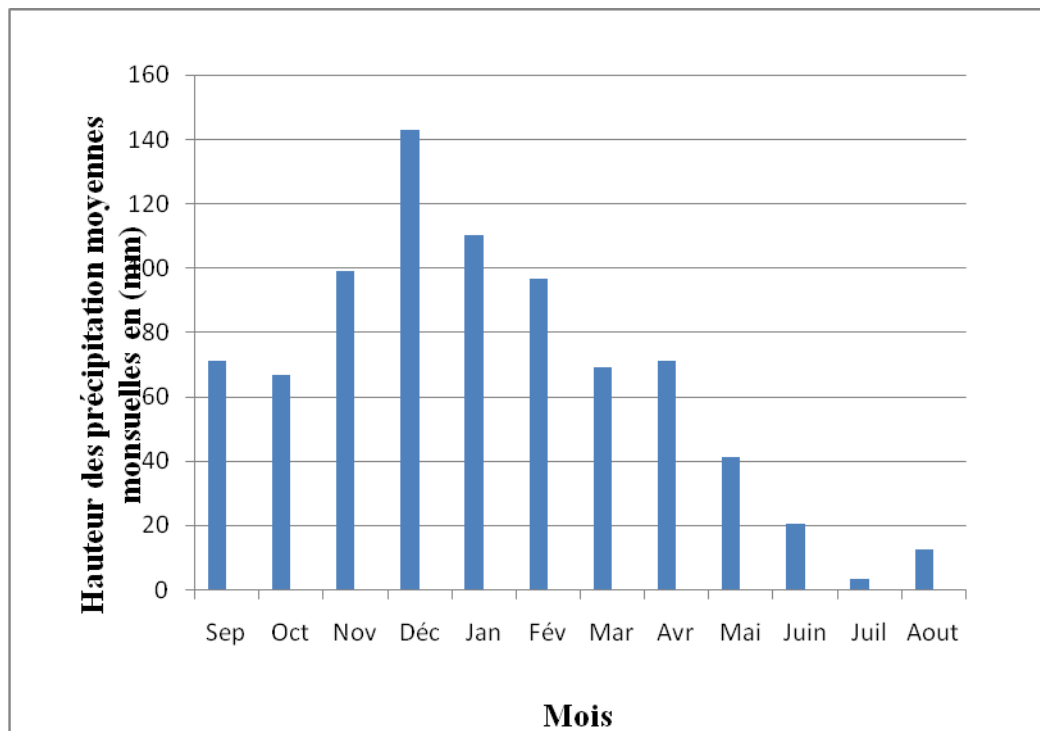
II.4.1.2. Les précipitations moyennes mensuelles :

Le tableau ci-dessous donne les hauteurs moyennes mensuelles des précipitations.

Tableau N°02 : précipitations moyennes mensuelles (mm)

de la Station de SKIKDA (1993/1994 - 2014/2015)

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Total
P(mm)	70.9	66.7	99.0	142.9	110.0	96.5	69.0	70.9	41.2	20.4	3.0	12.5	803.1



FigureN°06 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (en mm) de la station de Skikda (1993/1994-2014/2015).

D'après les résultats du tableauN°2, on a remarqué :

Les précipitations atteignent leur maximum au mois de Décembre avec une hauteur de 142.9 mm et leur minimum au mois de Juillet avec 3.0mm

II.4.1.3. Précipitations moyennes saisonnières :

L'étude des précipitations saisonnières permet de donner une idée sur la distribution de la lame d'eau précipitée durant une année et selon les quatre saisons. Elle se fait de la façon désignée dans le tableau N°03:

Tableau N°03 : Répartition saisonnière des précipitations en (mm) à la station de Skikda (1993/1994 - 2014/2015)

	Automne			Hiver			Printemps			Eté			Total
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
P (mm)	236.6			349.4			181.1			35.95			803.1
P (%)	29.5			43.5			22.5			4.5			100

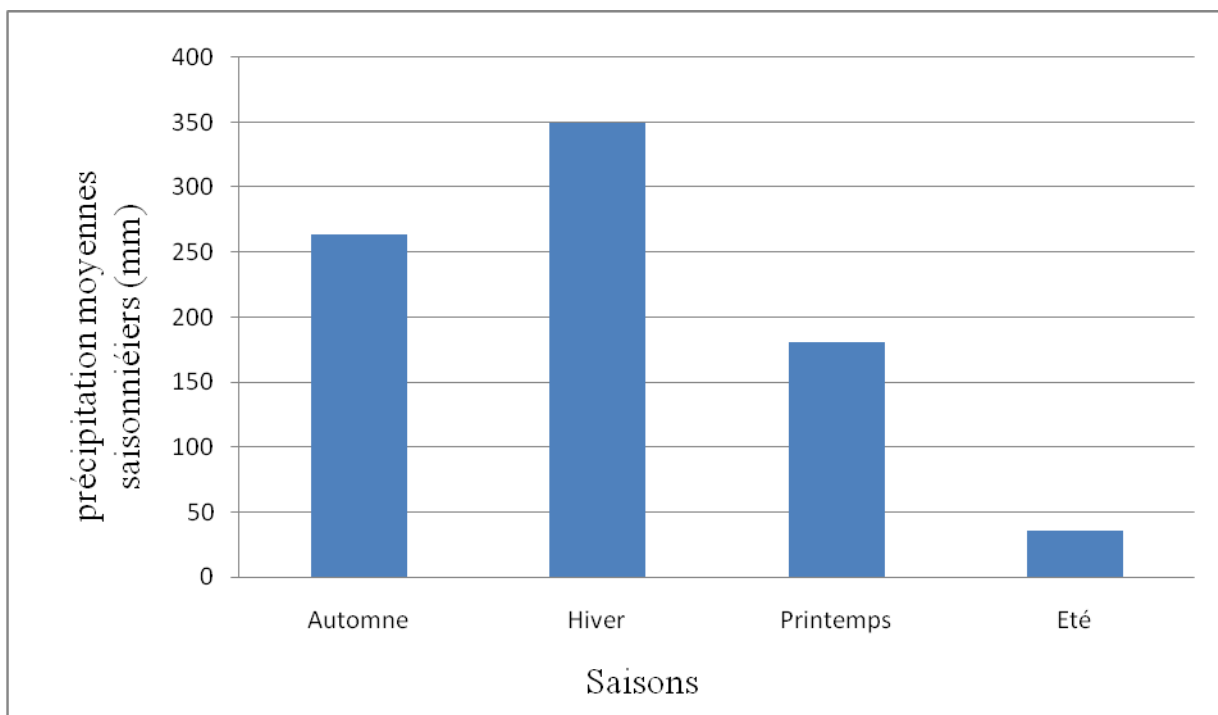


Figure N°07: Histogramme des précipitations moyennes saisonnières en (mm) à la station de Skikda (1993/1994 - 2014/2015).

La représentation saisonnière ci - dessus montre que la saison la plus pluvieuse est l'Hiver par contre l'Eté est la saison la plus sèche.

II.4.1.4. Précipitations annuelles:

L'étude des précipitations annuelles de la station de Skikda montre une grande différence entre l'année la plus arrosée (2004-2005) avec 1119.90 mm et l'année la plus sèche (1998-1999) avec 518.5.70 mm.

Le tableau N°04 représente les variations des précipitations annuelles (1994/1995 2014/2015).

**Tableau N°04 : précipitations annuelles en (mm) de la station de Skikda
(1994/1995 - 2014/2015).**

Année	Precipitations annuelles en (mm)
<i>1994-1995</i>	<i>633,00</i>
<i>1995-1996</i>	<i>692,00</i>
<i>1996-1997</i>	<i>740,50</i>
<i>1997-1998</i>	<i>817.40</i>
<i>1998-1999</i>	<i>518,50</i>
<i>1999-2000</i>	<i>1032,90</i>
<i>2000-2001</i>	<i>746,10</i>
<i>2001-2002</i>	<i>931,10</i>
<i>2002-2003</i>	<i>537,70</i>
<i>2003-2004</i>	<i>578,40</i>
<i>2004-2005</i>	<i>1119,90</i>
<i>2005-2006</i>	<i>943.79</i>
<i>2006-2007</i>	<i>1112.30</i>
<i>2007-2008</i>	<i>620.30</i>
<i>2008-2009</i>	<i>694.40</i>
<i>2009-2010</i>	<i>802.33</i>
<i>2010-2011</i>	<i>978.90</i>
<i>2011-2012</i>	<i>959.20</i>
<i>2012-2013</i>	<i>836.60</i>
<i>2013-2014</i>	<i>841.50</i>
<i>2014-2015</i>	<i>765.60</i>

II.4.1.5. le coefficient pluviométrique (CP)

La variabilité des données des précipitations mensuelles est exprimée par un paramètre permettant de distinguer les années excédentaires de celles déficitaires. C'est le "coefficient Pluviométrique" (CP) obtenu par le rapport de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne de toute la série d'observation. Il est donc en relation proportionnelle avec la pluviométrie et on a :

$$Cp = P/P_{moy} \quad (1)$$

Où : **Cp** : Coefficient pluviométrique. **P** : Pluviométrie annuelle de l'année en (mm).

P_{moy} : Pluviométrie moyenne annuelle en (mm).

- Une année est dite excédentaire (AE) si : $CP > 1$.
- Une année est dite déficitaire (AD) si : $CP < 1$.

Le tableau N°05 : Récapitule les résultats du coefficient pluviométrique (CP).

Année	Precipitations annuelles en (mm)		
<i>1994-1995</i>	<i>633,00</i>	<i>0.78</i>	<i>AD</i>
<i>1995-1996</i>	<i>692,00</i>	<i>0.86</i>	<i>AD</i>
<i>1996-1997</i>	<i>740,50</i>	<i>0.92</i>	<i>AD</i>
<i>1997-1998</i>	<i>817.40</i>	<i>1.01</i>	<i>AE</i>
<i>1998-1999</i>	<i>518,50</i>	<i>0.64</i>	<i>AD</i>
<i>1999-2000</i>	<i>1032,90</i>	<i>1.28</i>	<i>AE</i>
<i>2000-2001</i>	<i>746,10</i>	<i>0.92</i>	<i>AD</i>
<i>2001-2002</i>	<i>931,10</i>	<i>1.15</i>	<i>AE</i>
<i>2002-2003</i>	<i>537,70</i>	<i>0.67</i>	<i>AD</i>
<i>2003-2004</i>	<i>578,40</i>	<i>0.72</i>	<i>AD</i>
<i>2004-2005</i>	<i>1119,90</i>	<i>1.39</i>	<i>AE</i>
<i>2005-2006</i>	<i>943.79</i>	<i>1.17</i>	<i>AE</i>
<i>2006-2007</i>	<i>1112.30</i>	<i>1.38</i>	<i>AE</i>
<i>2007-2008</i>	<i>620.30</i>	<i>0.77</i>	<i>AD</i>
<i>2008-2009</i>	<i>694.40</i>	<i>0.86</i>	<i>AD</i>
<i>2009-2010</i>	<i>802.33</i>	<i>1</i>	<i>AE</i>
<i>2010-2011</i>	<i>978.90</i>	<i>1.21</i>	<i>AE</i>
<i>2011-2012</i>	<i>959.20</i>	<i>1.19</i>	<i>AE</i>
<i>2012-2013</i>	<i>836.60</i>	<i>1.04</i>	<i>AE</i>
<i>2013-2014</i>	<i>841.50</i>	<i>1.05</i>	<i>AE</i>
<i>2014-2015</i>	<i>765.60</i>	<i>0.95</i>	<i>AD</i>

- D'après les résultats ; il y a une alternance entre les années excédentaires (AE) et celles déficitaires (AD), cela est indiqué dans la figure ci-dessous.

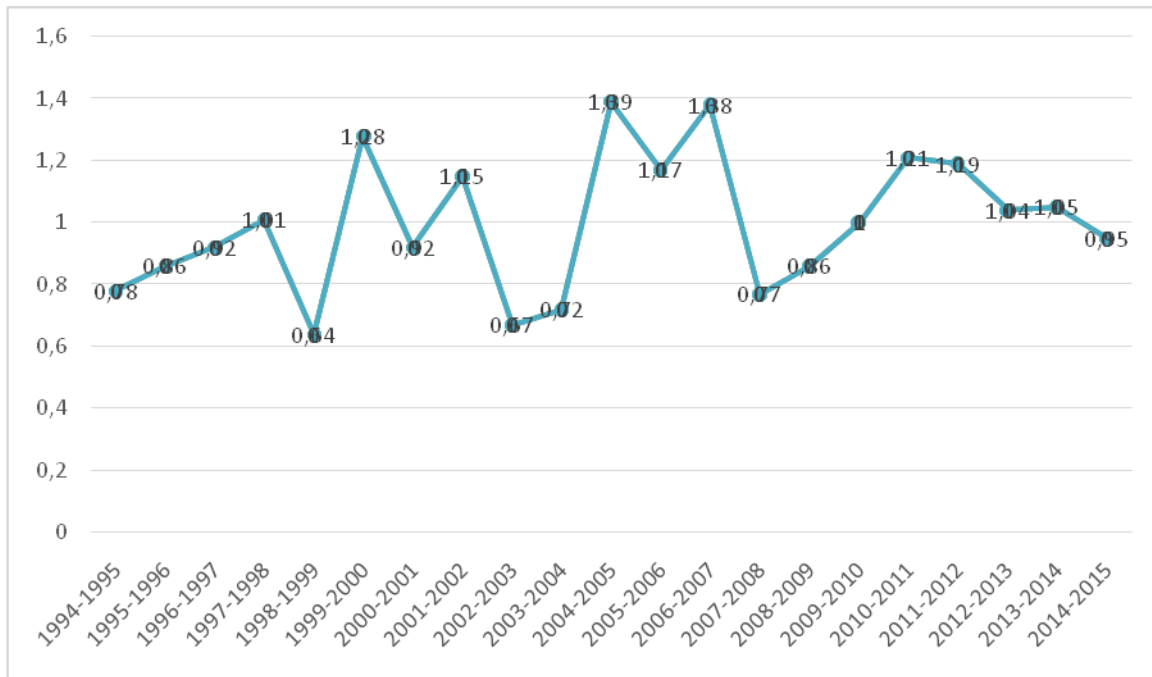


Figure N°08 : Diagramme de CP dans la station du Skikda (1994-2015)

II.4.2. Température :

La température est un facteur climatique influent sur la végétation, et intervient dans l'évaporation et l'évapotranspiration. Elle est très importante dans l'évaluation de l'écoulement qui entre dans l'estimation du bilan hydrique du fait qu'il conditionne l'évaporation.

II.4.2.1. Variation des températures moyennes mensuelles :

Tableau N°06 : températures moyennes mensuelles (°C) à la Station Skikda

(1994-1995/2014-2015)

	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Aout.	Moyenne
T °C	25.2	22.2	17.8	14.8	13.4	13.0	15	17	20.4	23.7	26.4	27.2	19.7

Les températures enregistrées sont représentatives du climat méditerranéen de la région .le mois le plus chaud est le mois d'aout avec une température moyenne de 27,2 °C, alors que le mois le plus froid est le mois de janvier avec une température moyenne de 13,4 °C.

Les résultats du tableau sont représentés dans le diagramme (Figure N°07) :

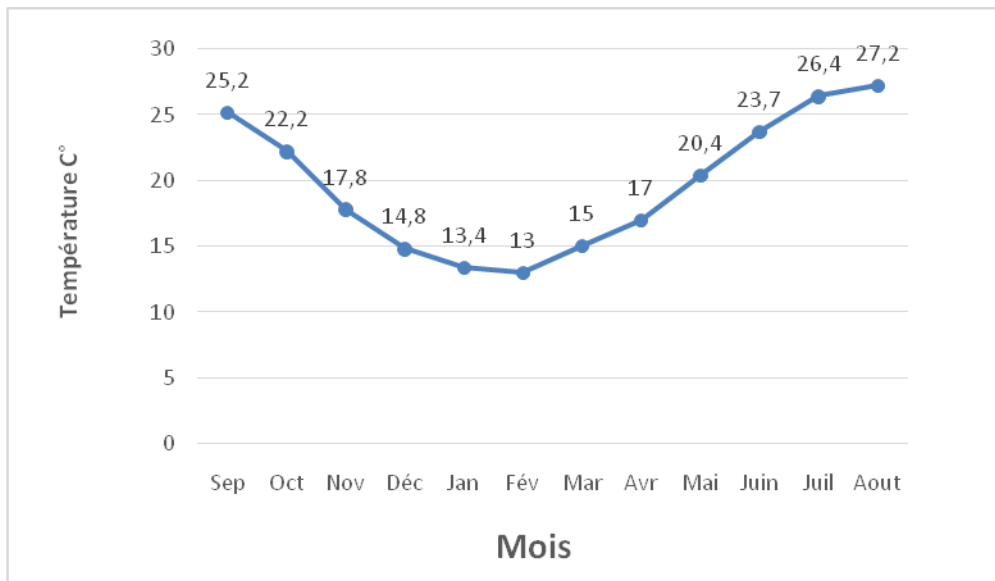
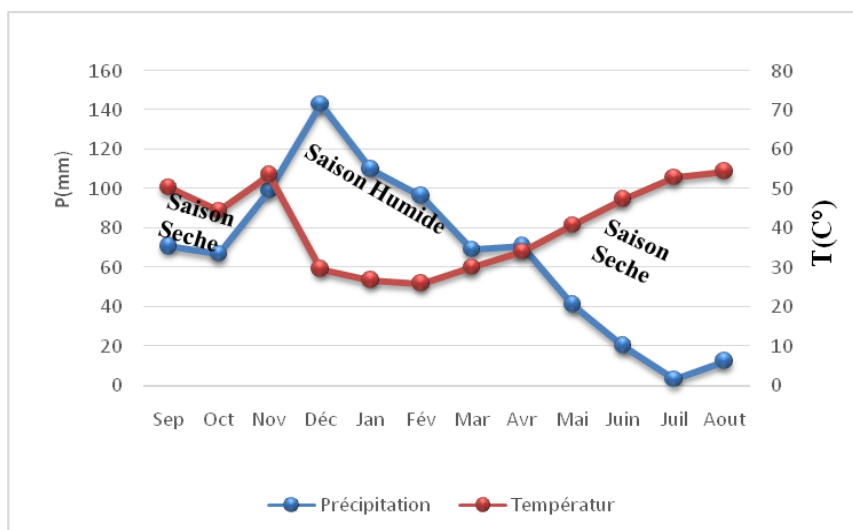


Figure N°09 : Température moyenne mensuelle de la station Skikda (1994-1995/2014-2015).

II.4.2.2. Diagramme ombro - thermique (pluvio - thermique):

On établit ce diagramme en combinant les températures et les précipitations moyennes mensuelles correspondantes à la même période d'observation à condition que P soit égal à 2T (P=2T). Il permet de déterminer les saisons sèches et humides, tel qu'il est mentionné.



FigureN°10 : Le diagramme ombro-thermique de la station de Skikda (1994-1995/2014-2015)

Le diagramme ombro-thermique établi montre l'existence de deux saisons bien distinctes :

Une saison sèche : s'étalent du mois de mai à novembre.

Une saison humide : ou $P > 2T$ et qui s'étale du mois de novembre à avril.

II.4.3. L'humidité relative de l'air :

L'humidité relative de l'air correspond au rapport de la tension de la vapeur réelle observée à la tension de valeur saturante à la même température. Le tableau N°07 contient les valeurs moyennes mensuelles mesurées à la station de Skikda durant la période d'observation allant de l'année 1994/1995 à 2014/2015.

Tableau N°07: Humidités moyennes mensuelles en (%) à la station de Skikda

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Aout.	Moyenne
H _m (%)	67,9	70,9	71,2	71,8	74,2	72,4	71,4	71,4	71,8	72,2	70,5	70,6	19,9

L'humidité maximale à la station de Skikda est de l'ordre de 74.2% enregistrée en hiver (Janvier), et l'humidité minimale atteint la valeur 67.9% en été (Septembre).

II.4.4. Les vents :

Le vent et l'un des facteurs climatiques déterminant le régime pluvieux et l'évapotranspiration. Nous disposons des données de la station de Skikda pour la période (1994/1995-2014/2015).

Tableau N°08 : Vitesses moyennes mensuelles du vent en m/s station de Skikda

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jun.	Jut.	Aout.	Moy.
vent(m/s)	15.8	16.1	19.50	21.8	18.7	20.1	20.4	19.4	16.2	15.7	14.2	16.7	17.9

II.4.5. Insolation :

Le tableau N°09 montre la durée de l'ensoleillement en heures :

-Le maximum d'insolation est observé au mois de juillet pendant 350 heures.

-Le minimum au mois de décembre avec 137 heures.

Tableau N°09 : Durée d'insolation en heures (Ig) à la station de Skikda

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Aout.	Moy.
Ig (heurs)	239	214	152	133	145	162	217	234	282	307	349	315	229

II.5. Le bilan hydrique :

Le bilan hydrique permet de connaître les deux périodes ; la période sèche ou le déficit en eau se fait sentir, c'est-à-dire durant la période où les précipitations sont inférieures aux quantités d'eau évapotranspirée et où la réserve facilement utilisable (RFU) est la période humide pendant laquelle les précipitations augmentent et interviennent dans la reconstitution des réserves.

II.5.1. L'évapotranspiration :

Le phénomène d'évapotranspiration intervient dans le cycle hydrogéologique dès le moment où les précipitations, sous forme liquide ou solide, atteignent la surface du sol.

De plus, l'humidité du sol, soit qu'elle provienne des pluies récentes infiltrées à faible profondeur, soit qu'elle remonte par capillarité de la nappe phréatique constituée directement ou par l'intermédiaire de la couverture végétale un élément important pour l'évaporation.

En hydrologie, on désigne par évaporation l'ensemble des phénomènes .

Qui par un processus spécifiquement physique, transforment l'eau en vapeur.

✓ On distingue, en fait, deux types d'évapotranspiration

-L'évapotranspiration potentielle (ETP) employée lorsque la surface évaporante est convenablement alimentée.

- L'évapotranspiration réelle (ETR) qui représente une fracture de l'ETP, et ne tient compte de l'abondance de l'eau qu'à la surface évaporant.

- L'évapotranspiration est donc fonction de :
 - ✓ Facteurs physiques (T° de l'air, degré d'insolation)
 - ✓ Facteurs géographiques (état de surface évaporant du sol, l'humidité relative de l'air)
 - ✓ Facteurs biologiques (espèces végétales, profondeur des racines)

II.5.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle est la quantité maximale de vapeur d'eau susceptible d'être reprise par l'atmosphère ; si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

L'ETP est évaluée par plusieurs formules empiriques, et exprimée par la hauteur d'eau en mm. Nous utiliserons la formule de C-W-THORNTHWAITE :

$$ETP = 16 \left\{ 10 \frac{t}{I} \right\}^a * K \quad (2)$$

$$a = \frac{1.6}{100} * I + 0.5 \quad (3)$$

ETP : Evapotranspiration potentielle corrigée (mm)

I : Indice thermique annuel qui représente la somme des indices mensuels i

$$I = \sum i \quad (4) \quad \text{avec} \quad i = (t/5)^{1.5} \quad (5)$$

a : Exposant climatique

K : Coefficient de corrélation

Tableau N°10: Résultats de l'ETP obtenus par la formule de « C.W.Thornthwaite » à la station de Skikda (1994/1995-2014/2015).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Aout.	Totale
I	11,6	9,5	6,8	5,2	4,4	4,2	5,3	6,4	8,4	10,5	12,4	13	97.8
ETP (mm)	116,3	84,3	47,4	30,5	26,6	24,5	39,8	55,1	88,3	121,4	154,1	153,4	941,6

I=97.8 a=2.0

II.5.3. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

C'est la somme de l'évapotranspiration et de la transpiration réelle pour une surface donnée et une période définie. On l'estime par la formule de (TURC) qui est basée sur la température et la précipitation moyenne annuelle.

$$\text{ETR (mm/an)} = P / (0,9 + P^2/L^2)^{1/2} \quad (6)$$

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle en (mm)

$$L = 0,05T^3 + 25 T + 300(\text{Pouvoir évaporant}) \quad (7)$$

P = Précipitations en (mm)

T = température en °C

Les valeurs de l'évapotranspiration réelle ETR, calculées par la formule de (TURC) sont inscrites dans Tableau N°11 :

Tableau N°11 : Résultats de l'ETR obtenus par la formule de (TURC) (1994/2015)

Facteurs	P(mm)	T (C°)	L	ETR (mm)
Station de Skikda	803.1	19.7	1166	685

L'estimation de l'évapotranspiration réelle ETR en (mm) est liée au volume de précipitation.

Trois cas peuvent se présenter :

$$1^{\text{er}} \text{ cas : } P \geq \text{ETP} \implies \text{ETR} = \text{ETP}$$

Il Ya une reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation, le surplus va représenter l'écoulement superficiel.

$$2^{\text{ème}} \text{ cas : } P < \implies \text{ETP} \quad \text{ETR} = P \pm \text{RFU}$$

Dans ce cas la RFU (réserve facilement utilisable) va s'épuiser jusqu'à satisfaction de l'ETP.

$$3^{\text{ème}} \text{ cas : } P \leq \text{ETP et RFU}$$

Il aura un déficit agricole (DA) représenté par la quantité d'eau qui doit être apportée pour l'irrigation.

II.5.4. Ruissellement (R) :

Le ruissellement de surface est la quantité d'eau, qui au cours d'une précipitation échappe à l'infiltration et l'évapotranspiration. Il est calculé par la formule de « Tixeront Berkaloff

$$\text{R} = \frac{P^3}{3(\text{ETP})^2} \quad (8)$$

Avec :

- **R** : Ruissellement en (mm).
- **P** : Précipitation moyenne annuelle en (mm).
- **ETP** : Evapotranspiration potentielle en (mm).

Les résultats obtenus par cette formule sont enregistrés dans le tableau suivant :

Tableau N°12 : Résultats du ruissellement par la formule de «Tixeront Berkaloff» pour la station de Skikda (1994/1995-2014/2015).

Paramètres	P (mm)	R (mm)
SKIKDA	803.1	194,7

II.5.5. Infiltration (I) :

C'est la quantité d'eau franchissant la surface du sol. Elle renouvelle les réserves d'eaux souterraines et entretient le débit de l'écoulement souterrain des sorties après circulation dans les formations hydrogéologiques perméables du sous - sol (G. Castany 1982). Elle est déduite de l'équation fondamentale du bilan hydrique :

$$P = ETR + R + I \Rightarrow I = P - (R + ETR) \quad (9)$$

Avec :

- **I** : L'infiltration en (mm).
- **P** : Précipitation moyenne annuelle en (mm).
- **R** : Ruissellement en (mm).
- **ETR** : Evapotranspiration annuelle en (mm) selon la méthode de C.W.Thornthwaite.

Tableau N°13 : Estimation de l'infiltration par l'équation fondamentale du bilan hydrique.

Paramètres	P (mm)	R (mm)	ETR (mm)	I (mm)
SKIKDA	803.1	194.7	538.6	69.8

En admettant que la réserve facilement utilisable (RFU) est égale à 100 mm (saturation), les Résultats précédemment obtenus nous ont permis d'établir le bilan hydrique, la synthèse finale de l'étude climatique. Le tableau suivant résume le bilan de C.W.Thornthwaite de la station de SKIKDA (1994/1995-2014/2015)

II.5.6. Analyse du bilan hydrique :

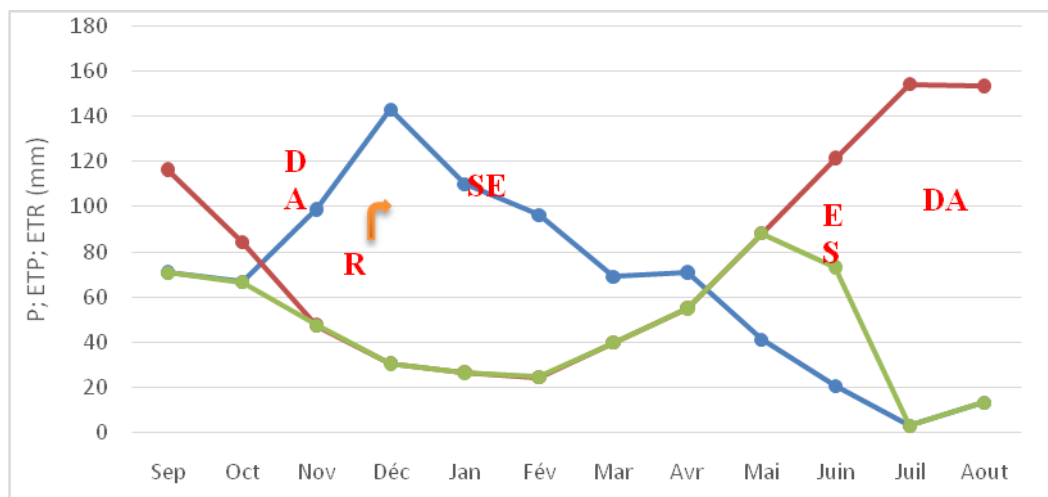
Lorsque les quantités d'eau provenant des pluies dépassent celles perdues par l'évapotranspiration, le surplus est stocker constituant ce qu'on appelle la réserve facilement utilisable (RFU). Si après le remplissage du stock, il reste un surplus qui s'écoulera (Excédent : $EXC = P - ETR$).

Dès que les pluies sont inférieures à l'ETP, il y a épuisement du stock.

Une fois la RFU est épuisée, c'est le déficit agricole ($DA = ETP - ETR$).

Tableau N°14 : le bilan d'eau de C.W THORONTHWAITE–station de Skikda (1994-2015)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
P (mm)	70.9	66.7	99.0	143.0	110.0	96.5	69.0	70.9	41.2	20.4	3.0	12.5	803.1
T(C°)	25.2	22.2	17.8	14.8	13.4	13.0	15.0	17	20.4	23.7	26.4	27.2	19.7
K	1.03	0.97	0.86	0.81	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	/
I	11.6	9.6	6.8	5.2	4.4	4.2	5.3	6.4	8.4	10.5	12.4	13.0	97.8
ETP (mm)	116.3	84.3	47.4	30.5	26.6	24.5	39.8	55.1	88.3	121.4	154.1	153.4	941.6
ETR (mm)	70.9	66.7	47.4	30.5	26.6	24.5	39.8	55.1	88.3	73.3	3	12.5	538.6
RFU (mm)	00	00	51.6	100	100	100	100	100	52.9	00	00	00	/
Exc (mm)	00	00	00	64.2	83.4	72.0	29.2	15.8	00	00	00	00	264.6
Def (mm)	45.4	17.6	00	00	00	00	00	00	00	48.1	151.1	140.2	402.4



Légende : **SE** : Surplus d'eau ; **DA** : Déficit agricole
ES : Epuisement de stock ; **R** : Recharge du sol.

Figure N°11 : Représentation graphique du bilan de THORNTWAIT, station de Skikda (1994-2015)

II.5.7. Interprétation du bilan hydrique :

Les résultats obtenus du bilan hydrique de la station de Skikda respectivement illustrés dans les tableaux et les graphiques précédents ,nous ont permis de tirer les observations suivantes :

- ✓ La région d'étude reçoit des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de (803.1mm) et une température moyenne annuelle de l'ordre de (19.70 C°).
- ✓ L'évapotranspiration potentielle (ETP) atteint son maximum au mois de Juillet (154.1 mm) et son minimum au mois de Février (24.5 mm). L'ETP total est de l'ordre de (941.6) mm.
- ✓ L'Evapotranspiration réelle (ETR) totale est de (538.6 mm).
- ✓ Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est pleine, il y a un surplus d'eau accompagné d'un ruissellement et quand elle a la tendance à se diminuer et au point qu'il sera carrément vide, il y aura un épuisement du stock et par conséquent un déficit agricole s'étalant du mois de Juin jusqu'au mois d'Octobre.
- ✓ La reconstitution de la RFU atteint son maximum (saturation : 100 mm) au mois de Décembre et reste ainsi jusqu'au mois d'Avril puis elle commence à s'épuiser pour se vider complètement au mois de Juin.
- ✓ L'excédent annuel est égal à 264.6 mm

II.6. Conclusion :

L'ensemble des données climatiques ainsi les résultats obtenus Permettent d'attribuer à la région étudiée un climat de type méditerranéen caractérisé par deux périodes distinctes :

- Une période pluvieuse est humide s'étalant du mois de Septembre à Mai.
- Une période sèche est chaude allant de Mai à septembre.

L'analyse du bilan hydrique fait ressortir les remarques suivantes :

Dans la région de Skikda, le déficit intervient durant la période de juin jusqu'au mois d'octobre.

Le mois de novembre correspond au début de la période de reconstitution de la réserve facilement utilisable qui atteint son maximum durant la période qui s'étale du mois de Décembre au mois d'avril.

L'écoulement intervient avec un maximum au mois de janvier.

Chapitre III

Les caractéristiques hydrogéologiques

III. Les caractéristiques hydrogéologiques du bassin

III.1.Introduction :

L'étude hydrogéologique permet de compléter et de confirmer ce qui a été précédemment énoncé par la géologie. Donc cette étude s'avère nécessaire pourrai vers à une bonne connaissance des horizons aquifères, ainsi que leurs caractéristiques hydrodynamiques.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la basse vallée de l'oued Saf-Saf (en aval du barrage du Zardézas);c'est dans cette partie du bassin où l'oued Saf-Saf débouche dans une série de dépressions: El Harrouch, Salah Bouchaour, Emjez Edd Chich, Ramdane Djamel, puis la plaine de Skikda.

Cette étude se base sur les données des mesures du niveau piézométriques des forages, fournies par la DHW de Skikda et l'ANRH de Constantine.

III.2. Les horizons aquifères

L'étude géologique et géophysique menées dans la zone d'étude ont décelé l'existence de trois différents aquifères; un aquifère poreux (du Quaternaire et du Tertiaire), aquifère Karstique et nature à système binaire. La superposition de ces trois horizons nous donne plusieurs nappes qui représentent les différents types d'aquifères existants dans la région.

III.2.1. L'aquifère poreux :

Il est caractérisé par des roches meubles non consolidées: graviers, sables, grés, poudingues...etc. Ces formations laissent passer de l'eau. Dans notre cas, il existe deux aquifères poreux: celui du Quaternaire et du Tertiaire, chacun d'eux peut former un aquifère important en prenant les roches métamorphiques ou les argiles noires du Numidie en comme substratum.

L'épaisseur des alluvions varie d'un sous bassin à un autre, dans les sous bassin d'ElHarrouch, l'épaisseur des alluvions est de 5à10 m (études Géophysique dans la zone);la même épaisseur est observée à Salah Bouchaour. A Ramdane Djamel, elle estde15 à 30 m, par contre dans le sous bassin de Zeramna (ElHadaeïk), l'épaisseur varie de 5à 15m.dans la plaine de Skikda (Hammadi Krouma);les niveaux de galets sont très peu épais (Nappe libre).

III.2.2. L'aquifère Karstique :

Il est constitué par des roches compactes, telles roches carbonatées (calcaires, calcaires dolomitiques, dolomies...etc), cet aquifère peut être fissuré et fracturé à cause des phases

tectoniques affectant la région .Les aquifères karstique dans la zone d'étude se trouvent à Kef M'Souna, Djebel Tasselment et Djebel El Ghédir.

L'aquifère karstique peut être libre en l'absence des formations Tertiaires ; sinon, il est captif. Kef M'Souna est un aquifère karstique captif en prés en ce des argiles noires formant son toit.

III.3. La coupe hydrogéologique :

III.3.1. Inventaire des forages et puits pour la réalisation de la coupe hydrogéologique:

Les forages existant dans notre secteur d'étude totalisent quatre ouvrages, réalisés le long de l'oued Zeramna. Ces forages sont destinés soit à l'exploitation AEP, soit à l'utilisation industrielle.

Tableau N°15: Inventaire des forages.

Nom et numéro de forage	Année réalisée	Profondeur (m)	Altitude Z (m)	NS (m)	ND (m)	Rabatement « S » (m)	Débit « Q » (l/s)	Distance Entre les forages (km)
F1 Skikda F-SM sicele	2002	85	7.50	4.25	41.13	36.88	15	1.075
F2 Zef-Zef	2001	50	7.10	3	25	22	10	1.5
F3 Cite universitaire	1991	35	38.5	4	6.20	2.1	15	2.2
F4 Zenat El Hadaik	1989	30	20.51	3.6	8.0	4.4	15	

III.3.2. Etablissement de la coupe hydrogéologique :

L'étude de la nature de la nappe aquifère nécessite l'établissement des coupes hydrogéologiques afin de représenter toutes les couches traversées par les forages. Cette coupe est établie à partir de 4 forages (F1, F2, F3, F4), implantés dans la plaine,

D'après les colonnes stratigraphiques des forages, leurs profondeurs, l'altitude topographique et les distances entre eux, on a établi une coupe hydrogéologique, afin de comprendre la structure hydrogéologique du secteur étudié .Par la suite, on a fait une corrélation entre les couches géologiques traversées par les forages. Les formations de la même nature lithologique sont reliées entre elles, pour mieux constituer la géométrie de l'aquifère. Sur la coupe, on a représenté les altitudes des forages par rapport au niveau du NGF. Cette coupe est dressée à partir de 4 forages exécutés dans la zone d'étude (Figure N°12). Elle est tracée suivant la plus longue diagonale de la zone d'étude du Sud-ouest vers le Nord-est.

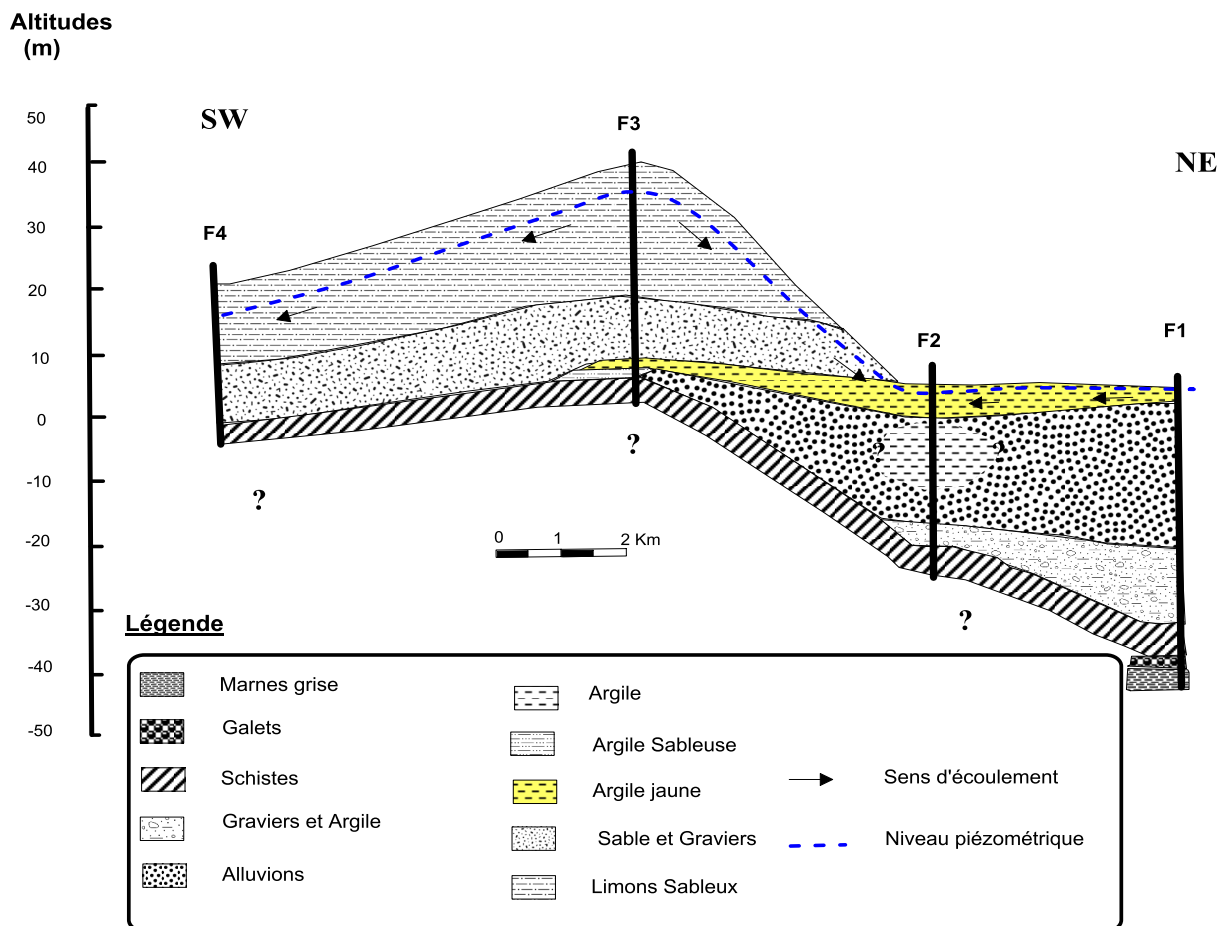


Figure N° 12 : Coupe hydrogéologique dans la plaine de Skikda (Attoui Barda modifiée 2016)

III.3.3. Interprétation de la coupe hydrogéologique :

Cette coupe a été établie à partir d'un profil qui passe par les quatre forages existants le long de l'oued Zeramna on constate une couche aquifère superficielle composée par des sables, des galets et des graviers.

L'épaisseur de cette couche est variable, elle atteint son minimum au niveau du forage F4 et son maximum au niveau du forage F3, elle s'amincit jusqu'à disparaître au niveau du forage F2. Elle repose sur un substratum schisteux et argileux.

Vers le Nord-est, l'aquifère est constitué par des formations alluvionnaires composées de graviers, d'argile sableuse, de schistes ...etc.

L'épaisseur de cette couche est plus importante du côté de l'oued (40 m) et elle tend à disparaître au niveau du forage F3. A ce niveau, le substratum de la couche est représenté par les schistes.

III.3.4. Les conditions aux limites :

La nappe alluvionnaire de la région d'étude est limitée par :

- Les grés numidiens au Sud - Est.
- Les formations métamorphiques au Nord-Ouest.

III.4. La piézomètre :

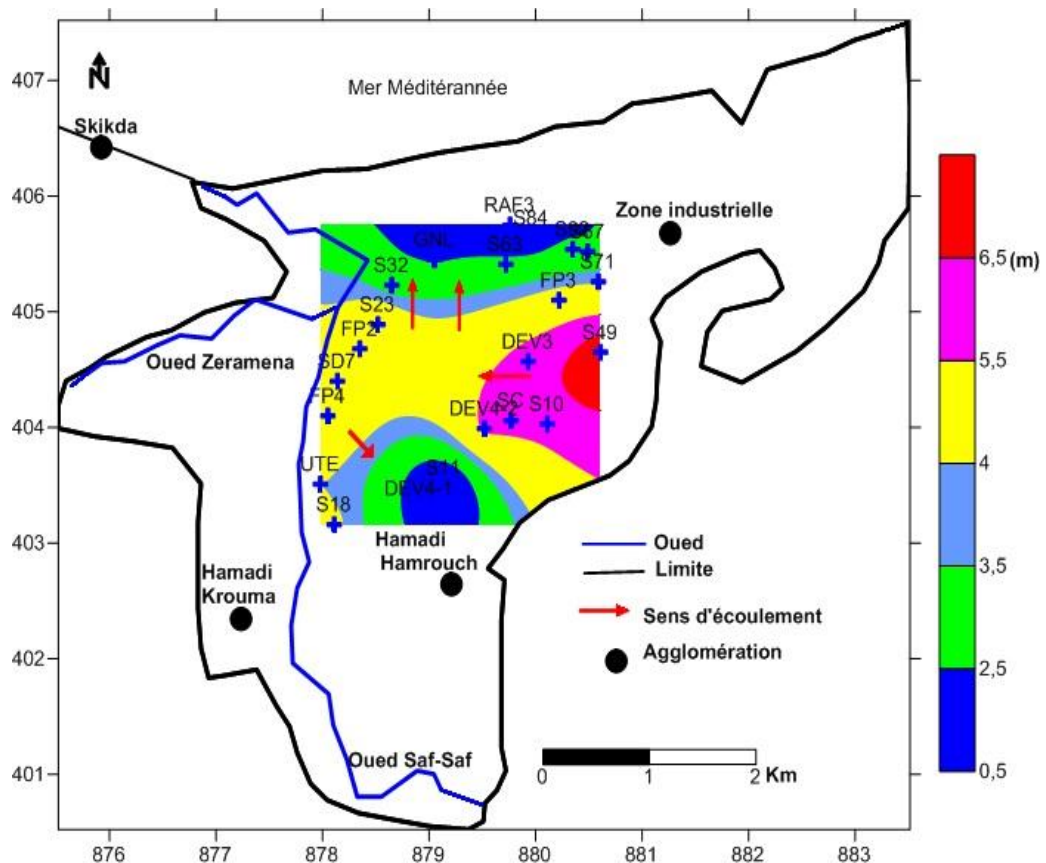
III.4.1. Les limites de l'aquifère superficiel :

La nappe du Quaternaire de la plaine alluviale de Skikda ,est constituée essentiellement des alluvions ,des dunes anciennes et des grés numidiens ,avec une puissance de 30 à 60 m. Cette nappe est bordée au Nord-Ouest par le massif de Aïn Zouit, Staiha jusqu'à Sidi Mezghiche, et au Nord-Est par les formations cristallophylliennes du socle kabyle à l'Ouest et au Sud-Ouest, elle est limitée par la série des flyschs .A l'Est, la nappe alluviale est entourée par les flyschs de Bissy, les grés numidiens et la chaîne calcaire du Djebel Ghédir ;au Sud ,par la chaîne calcaire des Kefs M'Souna et Sebergoud et en fin au Nord par la mer méditerranéenne.

Les mesures piézométriques réalisées au mois d'Aout2015 par la DHW de Skikda et l'ANRH de Constantine, nous ont permis de dresser la carte piézométrique (Figure N°14) pour bien visualiser l'écoulement des eaux souterraines de la plaine de Skikda. L'écoulement dans son ensemble se fait du Sud vers le Nord de la plaine, avec quelques particularités.

L'écoulement dans son ensemble se fait du sud vers le nord de la plaine, avec quelques Particularités, des courbes piézométriques espacées dans la plupart de la plaine avec un gradient hydraulique très faible indiquet un écoulement lent dû à la topographie plane de la région. Les lignes des courants pour l'ensemble de la plaine sont dirigées vers l'oued Saf-Saf, ce qui nous laisse dire que la nappe alimente l'oued.

L'écoulement des eaux s'effectue des zones de recharge ou les aires d'alimentation, constituées par les reliefs) dômespiézométriques) vers les zones de décharge qui sont occupées par l'oued Saf-Saf et ses affluents.



FigureN°14 : Carte piézométrique de la nappe alluviale de Skikda(Aout2015)

III.4.3. L'alimentation de l'aquifère superficiel :

L'alimentation de l'aquifère superficiel du Quaternaire est assurée par l'infiltration des précipitations efficaces; la nappe reçoit les eaux qui ruissellent sur les flancs internes des massifs qui limitent le bassin versant.

Une alimentation souterraine par les eaux de la nappe des grés numidiens, ainsi que par les eaux des calcaires des Kefs M'Souna, Sebaroud et Djebel El Ghédir est très probable. Ainsi qu'une alimentation à partir des bassins avoisinants n'est pas à exclure. (Bassin du Saf-Saf est de type Hyperplèthe, recevant des eaux souterraines des bassins voisins; de Guebli à l'Ouest et du Kébir ouest à l'Est).

III.5. Bilan du système aquifère :

a- Entrée = alimentation du système aquifère :

Compte tenu de sa situation géographique et climatique, la nappe libre est alimentée par des précipitations efficaces (PE) qui égalent la différence entre les précipitations tombées (P) et l'ETR.

Dans la région d'Elhadaiek, avec 803,1 mm de hauteur de précipitations annuelle, soit 3937,78 hm³/an, les précipitations efficaces moyennes annuelles sont de 1296,9 hm³/an.

Précipitations efficaces = précipitations – évapotranspiration réelle

$$1296,9 \text{ hm}^3/\text{an} = 3937,78 \text{ hm}^3/\text{an} - 2640,87 \text{ hm}^3/\text{an}.$$

b. Sortie : fuites du système aquifère

La précipitation efficace sera répartie, à la surface du sol, en deux fractions, fixes, conventionnelles inégales.

- Le ruissellement (R) qui alimente l'écoulement de surface Qs collecté par le réseau hydrographique du bassin versant. Dans la région d'étude Qs=954,65 hm³/an.
- l'infiltration (I), quantité d'eau franchissant la surface du sol et qui entretient l'écoulement souterrain (Qw) ; soit pour la zone d'étude I=342,24 hm³/an.
- le pompage. Selon l'organisme qui gère la distribution de l'eau potable aux citoyens (DHW de Skikda), le débit d'exploitation est de 2,69 hm³/an.

Le total des entrées et sorties est respectivement ; 1296,9 hm³/an et 1299,58 hm³/an ; il en résulte donc une différence négative de l'ordre de 2,69 hm³/an.

III.6. Conclusion :

L'étude hydrogéologique menée dans la plaine alluviale de Skikda a pu nous montrer l'existence de trois types d'aquifères. Un aquifère superficiel poreux avec des formations du Quaternaire et du Tertiaire reposent sur les formations imperméables (argiles et roches métamorphiques). Le second est un aquifère karstique, constitué par des roches carbonatées. Le dernier est un aquifère à système binaire, constitué par la superposition des roches poreuses sur des roches compactes avec un enter communication des deux réservoirs.

L'alimentation de ces horizons est assurée par l'infiltration des précipitations efficaces, ainsi qu'une alimentation souterraine à partir des bassins avoisinants.

Chapitre IV

Vulnérabilité à la pollution de la plaine de Skikda

IV.1. Introduction :

L'intérêt principal de cette étude, est de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines de la plaine de Skikda, ces variations dans l'espace et dans le temps, afin de contribuer à la connaissance du système de point de vue pollution Anthropique et naturelle.

Vingt-deux échantillons ont été prélevés durant la campagne de mesures terrain (Aout 2015).

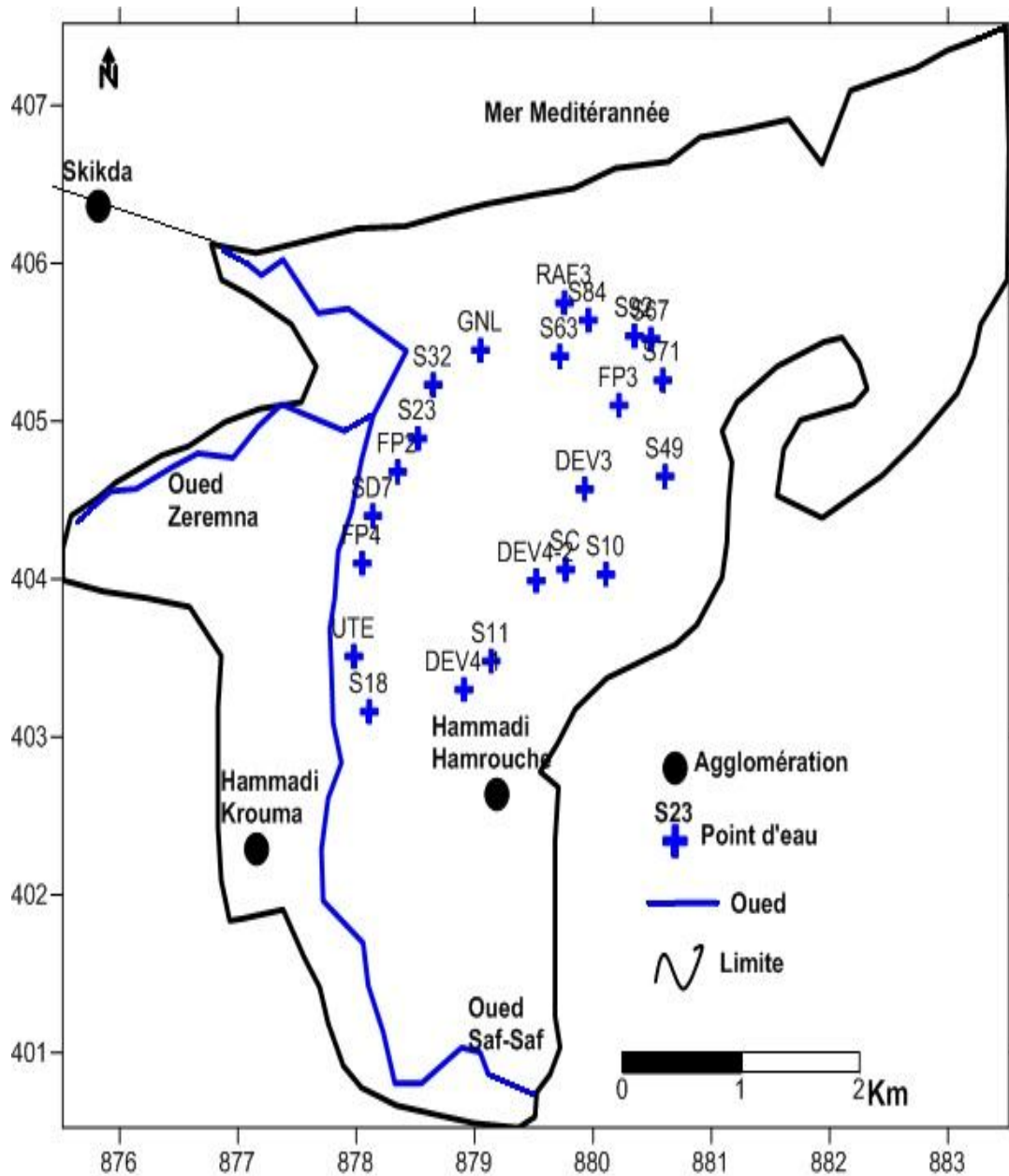


Figure N°15 : position des points de prélèvements (souterrains) (Aout 2015)

IV.2. Paramètres physiques:

IV.2.1. pH :

Le pH est une mesure de la concentration en proton en solution. Les valeurs de pH ont été mesurées sur terrain.

Les eaux de la région d'étude montrent deux zones principales:

Une zone où le pH est légèrement basique variant entre 7.14 et 7.44 dans la région Nord et Est de la plaine (S63, S49, S10 et DEV3, FP3) liée probablement au faciès lithologique (Alluvions et des marnes du Pliocène marin).

Et une zone où le pH est relativement assez fort (varie entre 7.4 et 7.7) au centre et à l'Ouest de la plaine.

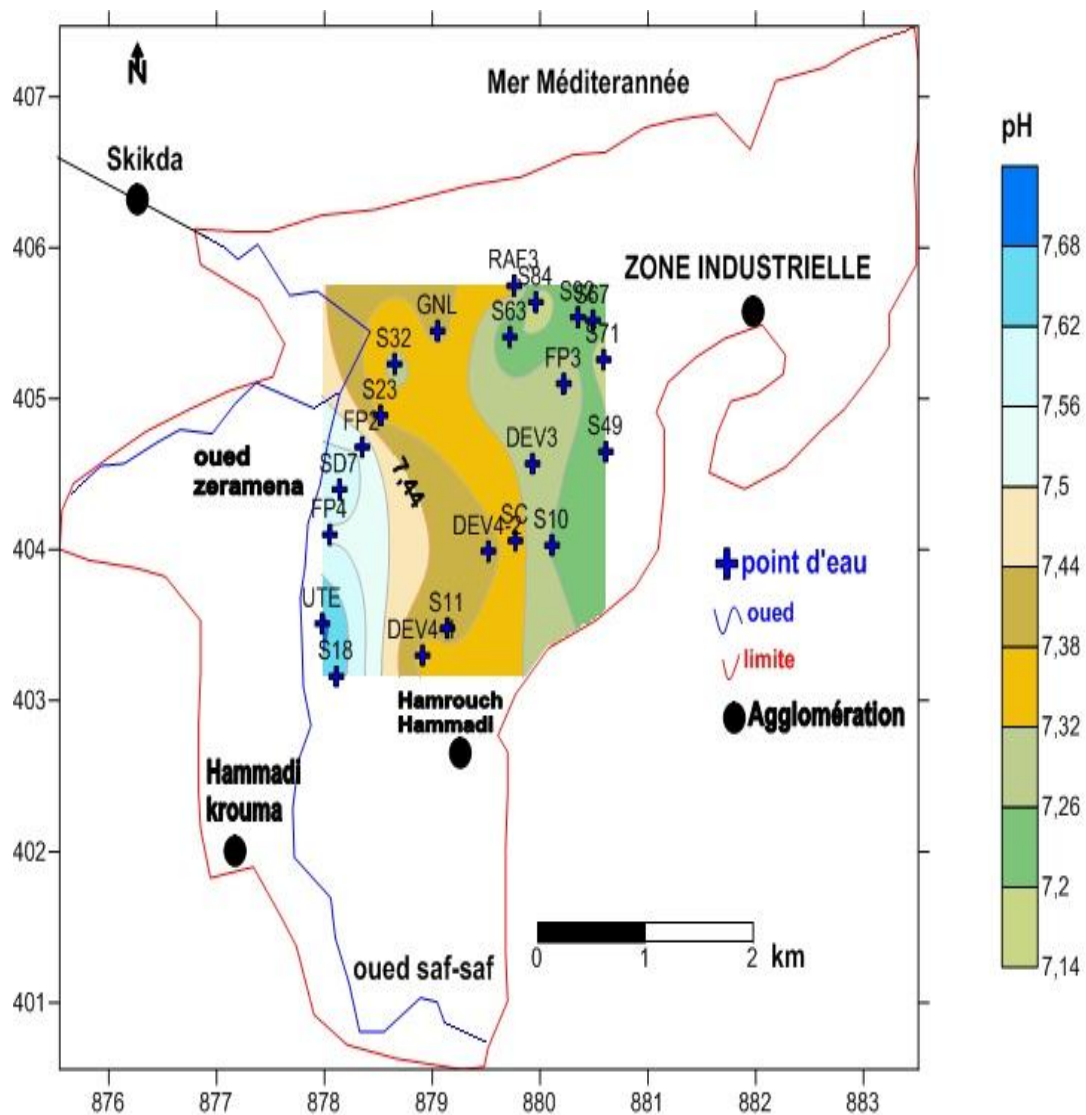


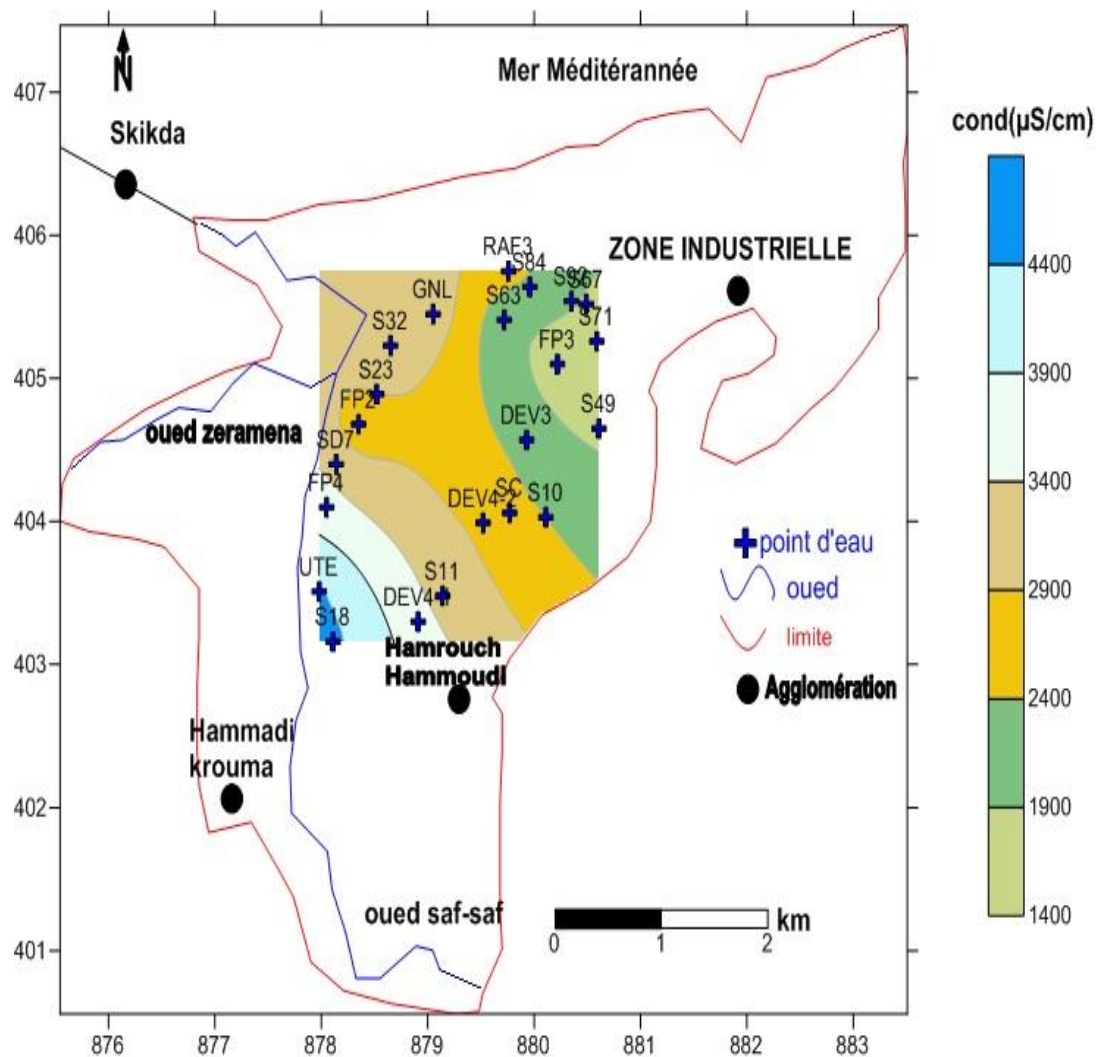
Figure N°16 : Carte de répartition spatiale des teneurs de pH (Aout 2015)

IV.2.2. Conductivité électrique (CD) :

Les valeurs de la conductivité électrique des eaux souterraines de la zone d'étude ont été mesurées sur terrain et sont exprimés en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les mesures sont effectuées pendant deux périodes Aout 2015.

La conductivité variée de 1000 à 5500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la plupart des échantillons présentent des valeurs relativement fortes. Les valeurs sont localisées en général aux rives de l'oued Saf-Saf (S18 et UTE), les valeurs sont respectivement 3990 et 4360 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

D'une façon générale la conductivité électrique au niveau des oueds Saf-Saf et Zeremna diminue dans l'espace de l'amont vers l'aval en raison de l'invasion marine surtout au période des marées.



FigureN°17: Carte de répartition spatiale de Conductivité électrique (Aout 2015)

IV.2.3. La dureté total TH (°F) :

Elle exprime la teneur de l'eau en sels de calcium et de magnésium. Dans le secteur d'étude, la dureté totale est très variable allant de 25 à 46°F.

37 % des puits analysés représentent une dureté < 30°F, ils sont localisé à l'Est de la plaine due à la pauvreté des sols en formations carbonatées. Tandis que les eaux qui ont une dureté comprise entre 30 et 50°F sont dures elles sont représentées par 11 échantillons soit 50% des puits analysés, localisées au Sud et à l'ouest de la plaine, cette région est connue par l'abondance des formations Gypseuses.

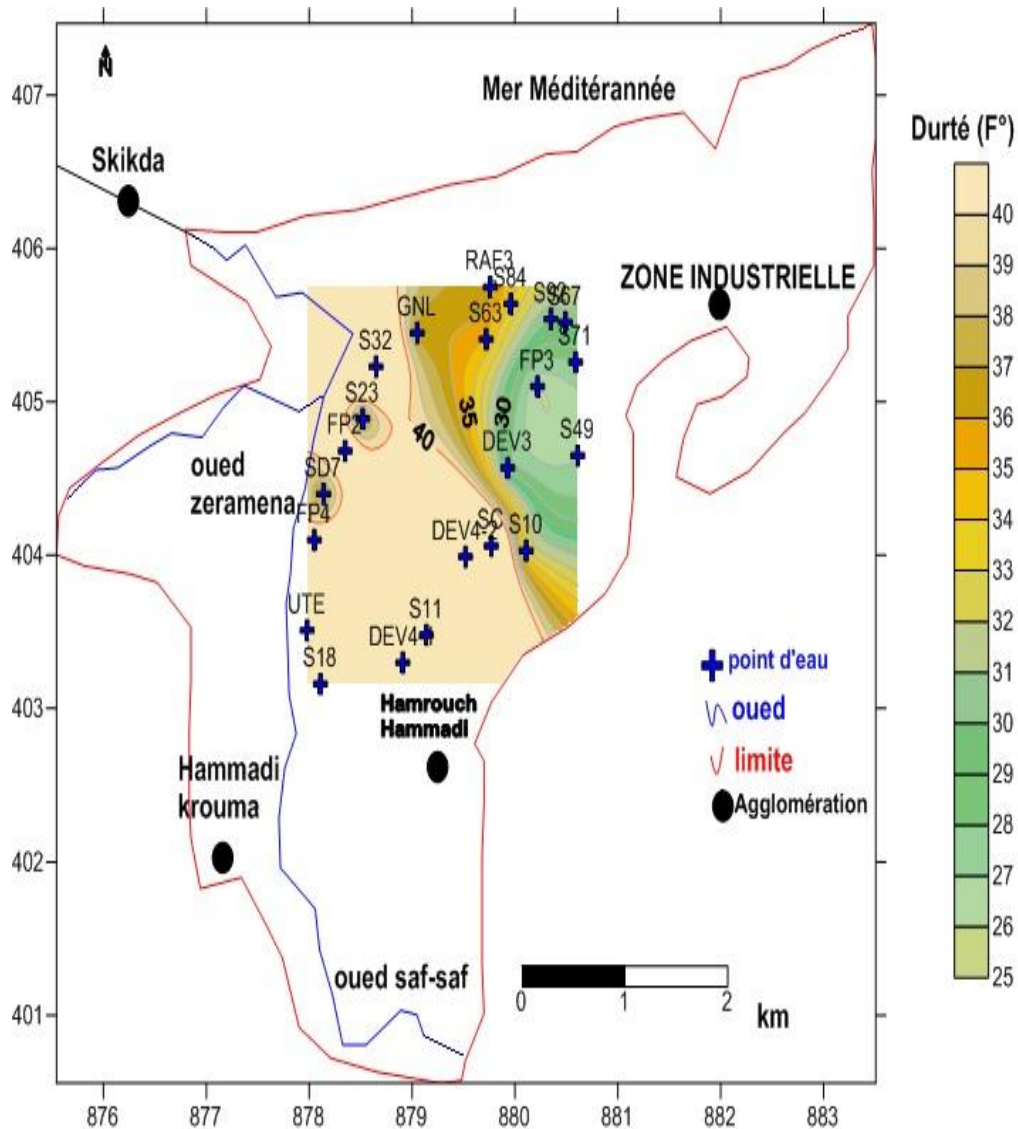


Figure N°18 : Carte de répartition spatiale de dureté totale (Aout 2015)

IV.3. paramètres chimiques :

IV.3.1. Le couple $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$:

L'observation des deux cartes de sodium et de chlorures montre que les teneurs varient entre 180 à 600 mg/l et 230 et 2500 mg/l respectivement.

Les deux cartes ne représentent que les fortes concentrations près de la rive d'oued Saf-Saf. L'origine du Na et Cl provient d'une part de la dissolution de l'halite et d'autre part à l'influence marine. (Figure N°19,20).

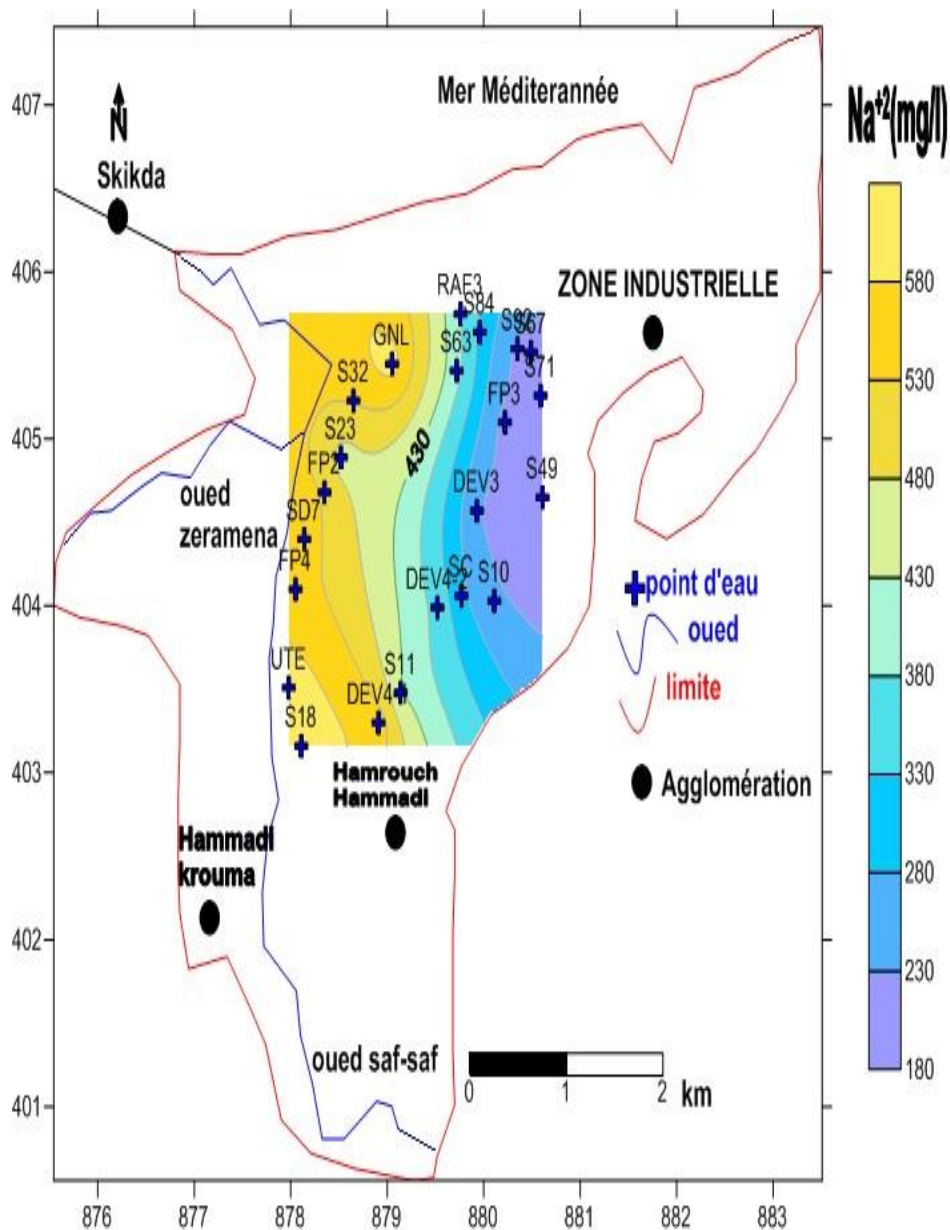


Figure N°19: Carte de répartition spatiale de teneurs de Na^{+2} (Aout 2015)

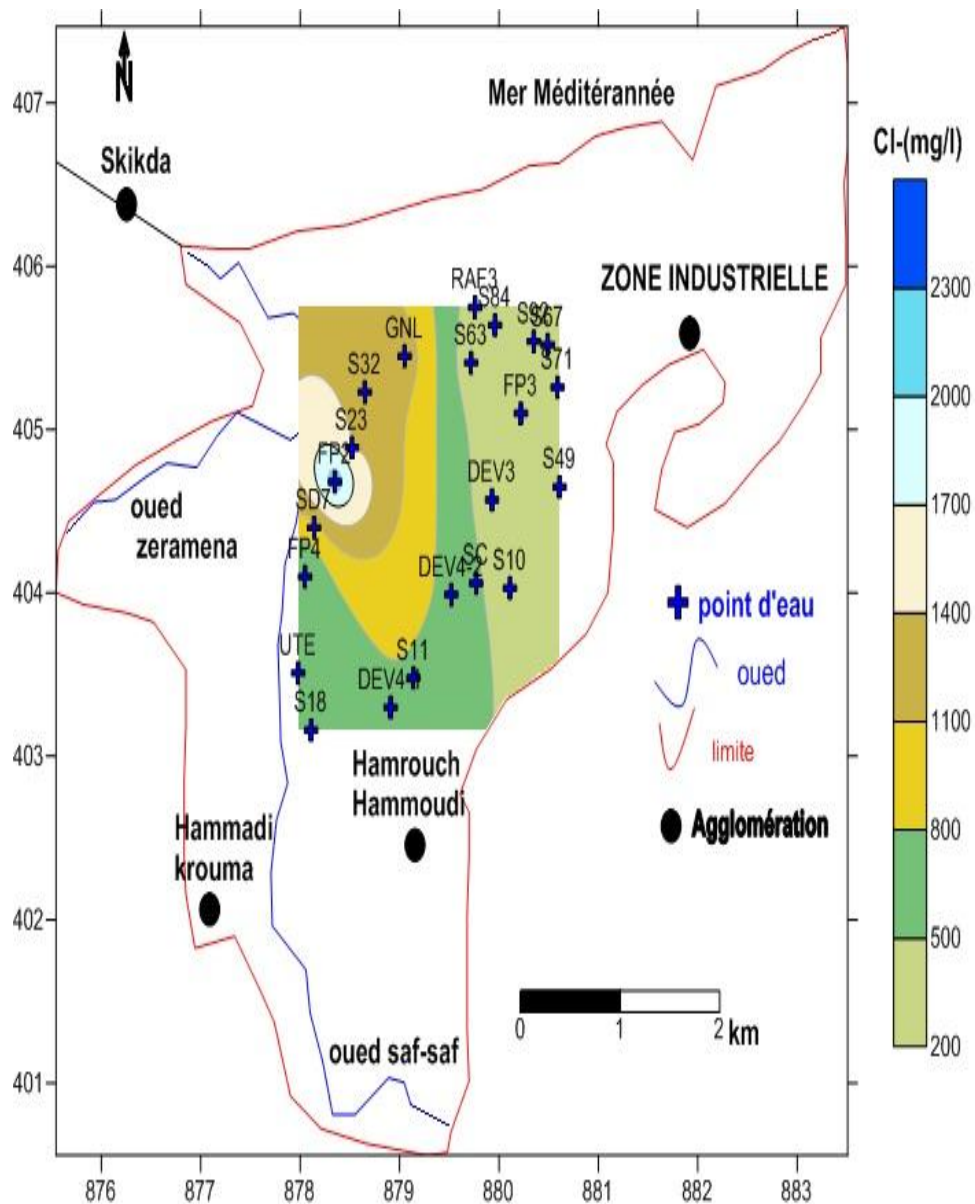


Figure N°20: Carte de répartition spatiale de teneurs de Cl⁻ (Aout 2015)

IV.3.2. Le couple Ca⁺⁺ - SO₄²⁻ :

On remarque les fortes teneurs de calcium se localise au sud-ouest de la zone d'étude au niveau du point S18 et UTE, due au lessivage des formations carbonatée, et l'autre en sulfate (vers le sud de la plaine) qui résulte probablement par le lessivage des niveaux gypseux.

La carte de sulfate montre que les teneurs les plus élevées se trouvent à l'Est de la zone d'étude près de la zone industrielle ce qui peut s'expliquer par les rejets de l'acide sulfurique (H₂S) par les hydrocarbures de la zone industrielle.

IV.3.3. Le couple HCO_3^- :

Les valeurs des bicarbonates dans la plaine varient de 200 à 600 mg/l. les valeurs les plus importants sont observées dans la partie sud-ouest de la zone d'étude (S18, UTE, DVE).

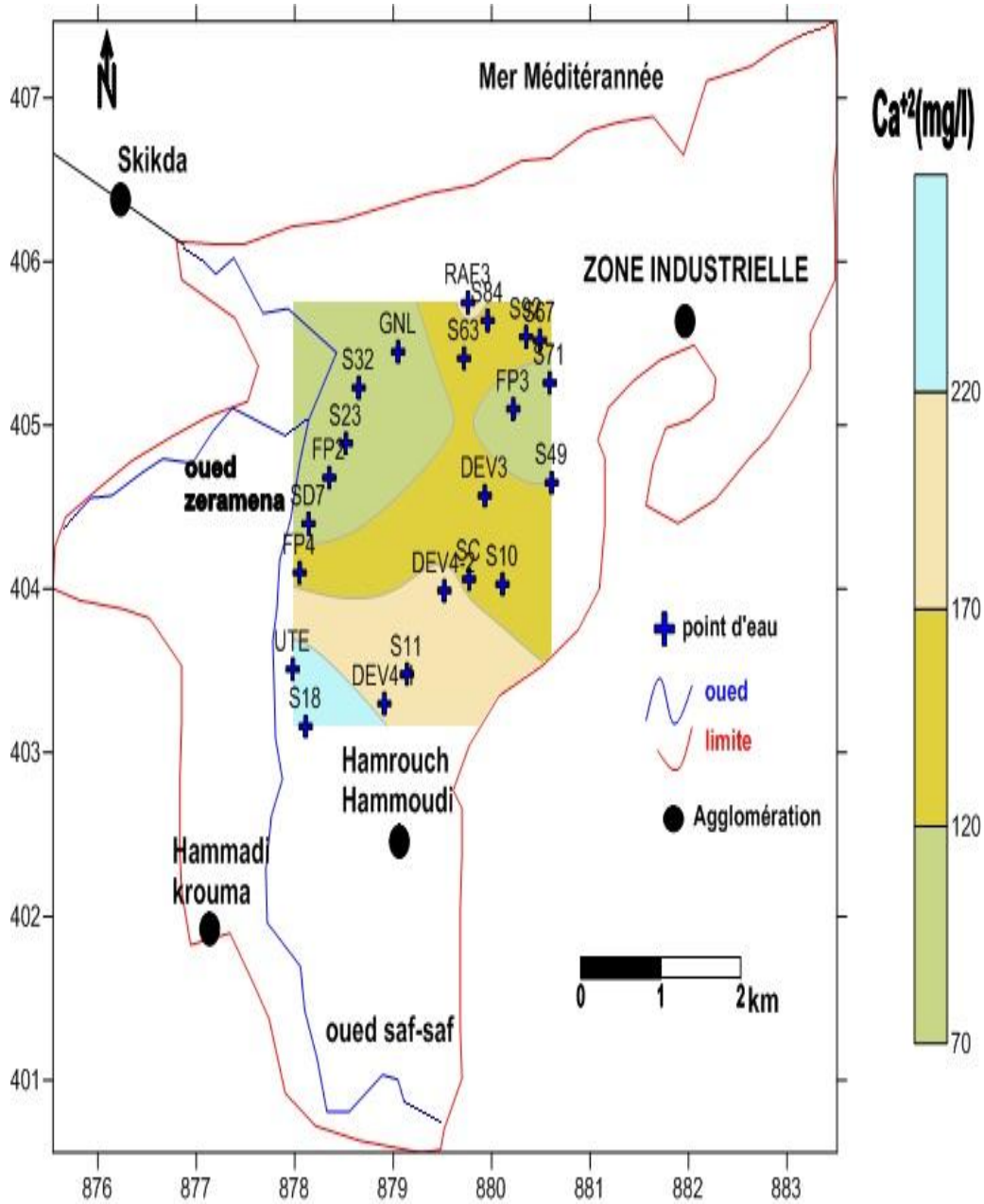


Figure N°21: Carte de répartition spatiale de teneurs de Ca^{+2} (Aout 2015)

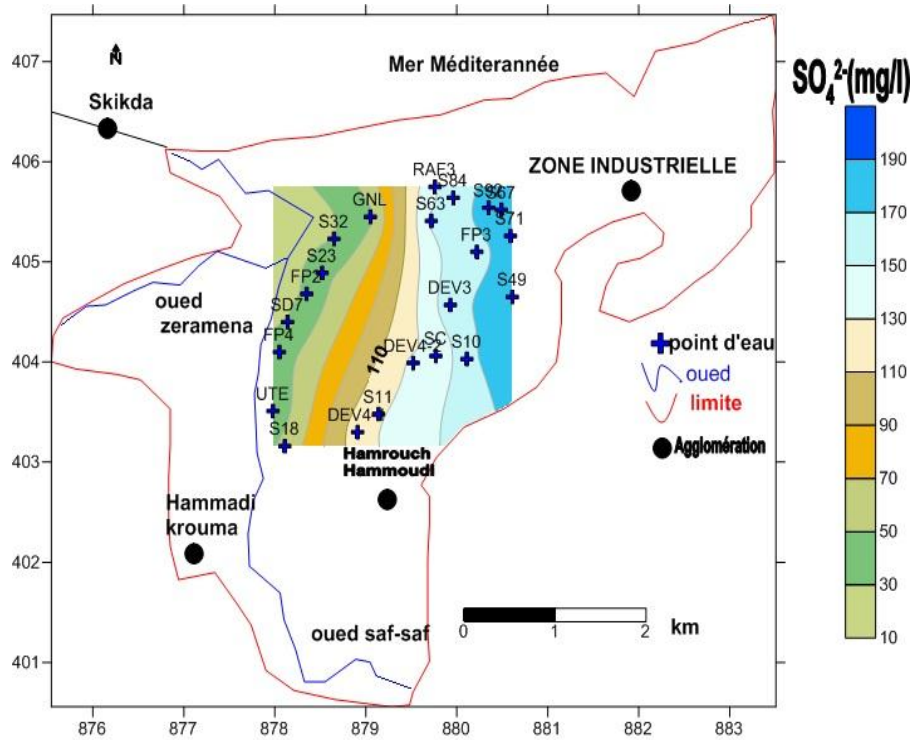


Figure N°22: Carte de répartition spatiale de teneurs de SO_4^{2-} (Aout 2015)

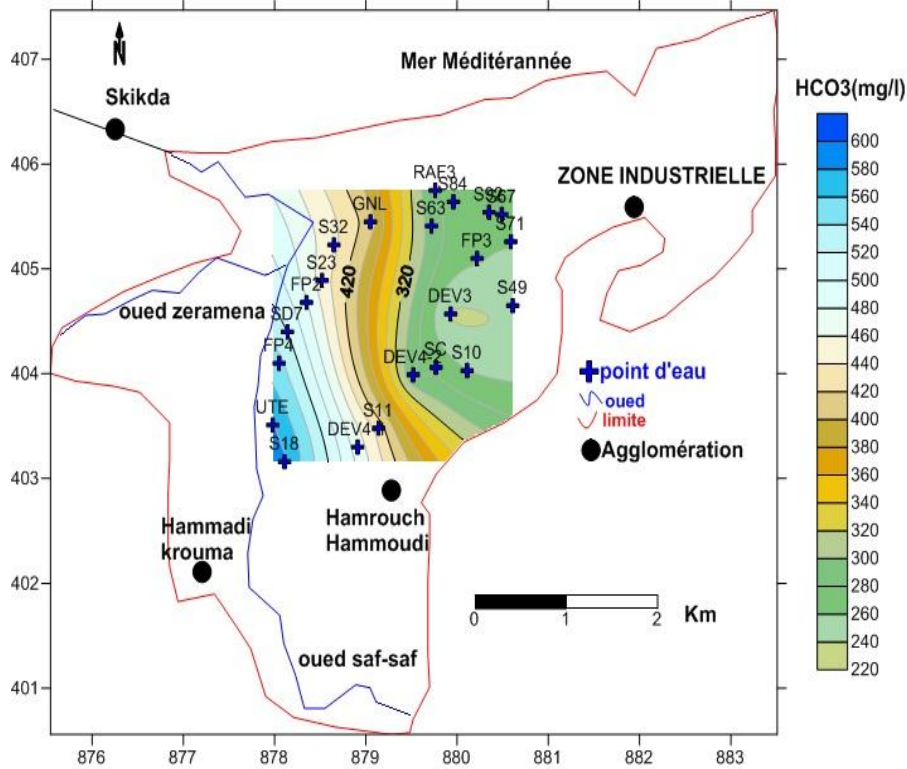


Figure N°23: Carte de répartition spatiale de teneurs de HCO_3^- (Aout 2015)

IV.4. Détermination des faciès hydrochimiques :

La représentation des données physico chimiques sur le diagramme de PIPER

(Figure N°24) montre une variabilité du faciès chimique des eaux. Ces derniers sont positionnés entre deux pôles :

Le pôle salifère qui se caractérise par un faciès chloruré sodique et chloruré calcique. Ils sont positionnés au Nord Est et au Sud Est de la plaine, cela est sûrement dû à l'existence des lentilles évaporitiques et à l'intrusion marine (pour le cas des puits GNL).

Le pôle des carbonates représentés par un faciès bicarbonaté calcique dû à la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit là à la dissolution des formations gypseuses (CaSO_4). La majorité des points caractéristiques de ce pôle sont positionnés à l'intérieur de la plaine.

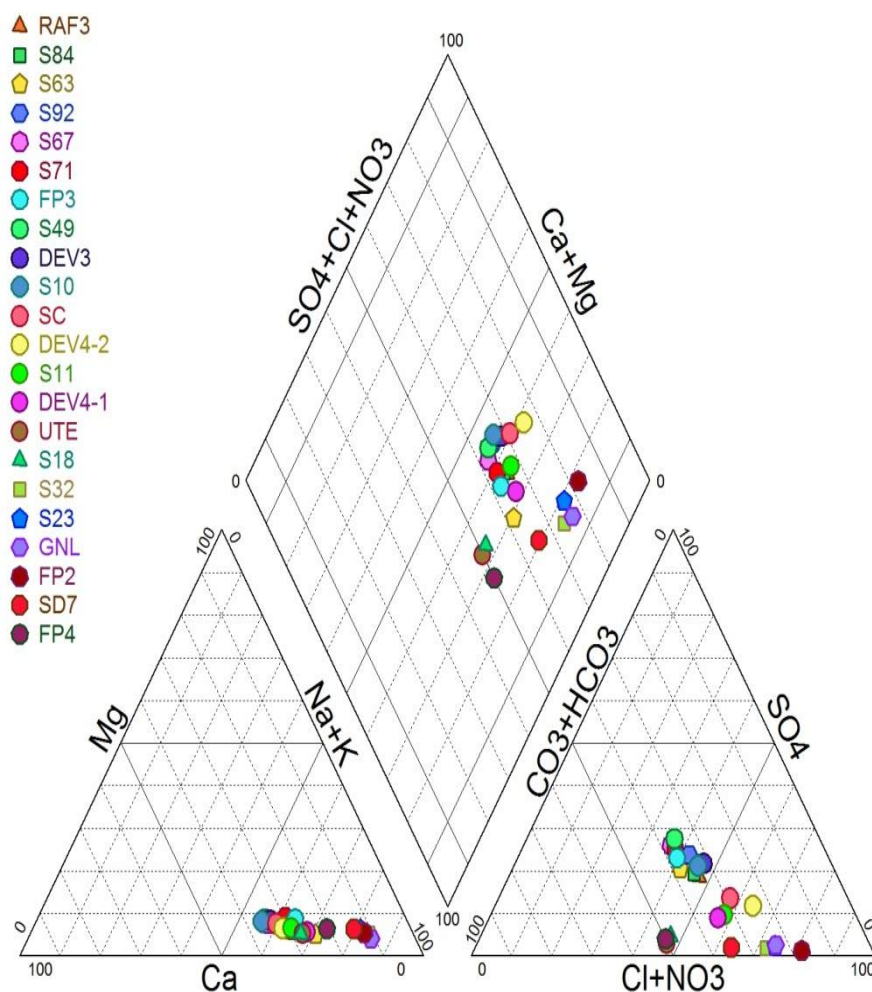


Figure N°24 : diagramme de Piper (Aout 2015) de la plaine de Skikda

IV.5. Evaluation de risque de la plaine à la pollution :

IV.5.1. Introduction :

L'accroissement de la population entraîne le développement des industries, de l'agriculture et des activités touristiques. Il en résulte une augmentation des volumes d'eau consommée et plus encore une détérioration de la qualité de l'eau et de l'environnement. Plusieurs apports de contamination ont été détectés : l'un d'origine anthropique dû aux rejets directs d'eaux usées, au stockage des produits industriels et à l'utilisation des produits chimiques dans l'agriculture, l'autre a une origine naturelle, c'est l'effet de la salinité due à l'intrusion marine et à la nature géologique des terrains. Les chapitres précédents ont montrés l'existence d'une forte salinité des eaux. Ses origines sont males définies vu la proximité de la mer, et la nature des formations géologiques.

IV.5.2. Origine de la salinité :

L'augmentation de la salinité des eaux souterraines dans les zones littorales pose un grand problème, vu l'augmentation de la salinité et la détérioration de la qualité des eaux. Plusieurs travaux internationaux ont été réalisés sur ce sujet (Yuqun et al., 2000; Mohcen et al., 1999 ; Louche et al., 1998 ; Morell et al., 1996).

La détermination de l'origine de la salinité des eaux dans la nappe est difficile en raison de l'existence de plusieurs processus qui interviennent dans l'augmentation de la concentration des éléments chimiques.

IV.5.3. Détermination de la salinité par les rapports caractéristiques :

Dans cette étude, on a utilisé des données de la campagne du mois de Aout 2015, on a utilisé deux rapports caractéristiques ($\text{HCO}_3^-/(\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-})\text{-CE}$) et $(\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-})\text{-CE}$ permettant de voir l'évolution des éléments chimiques en fonction de la conductivité (FigureN°25,26)

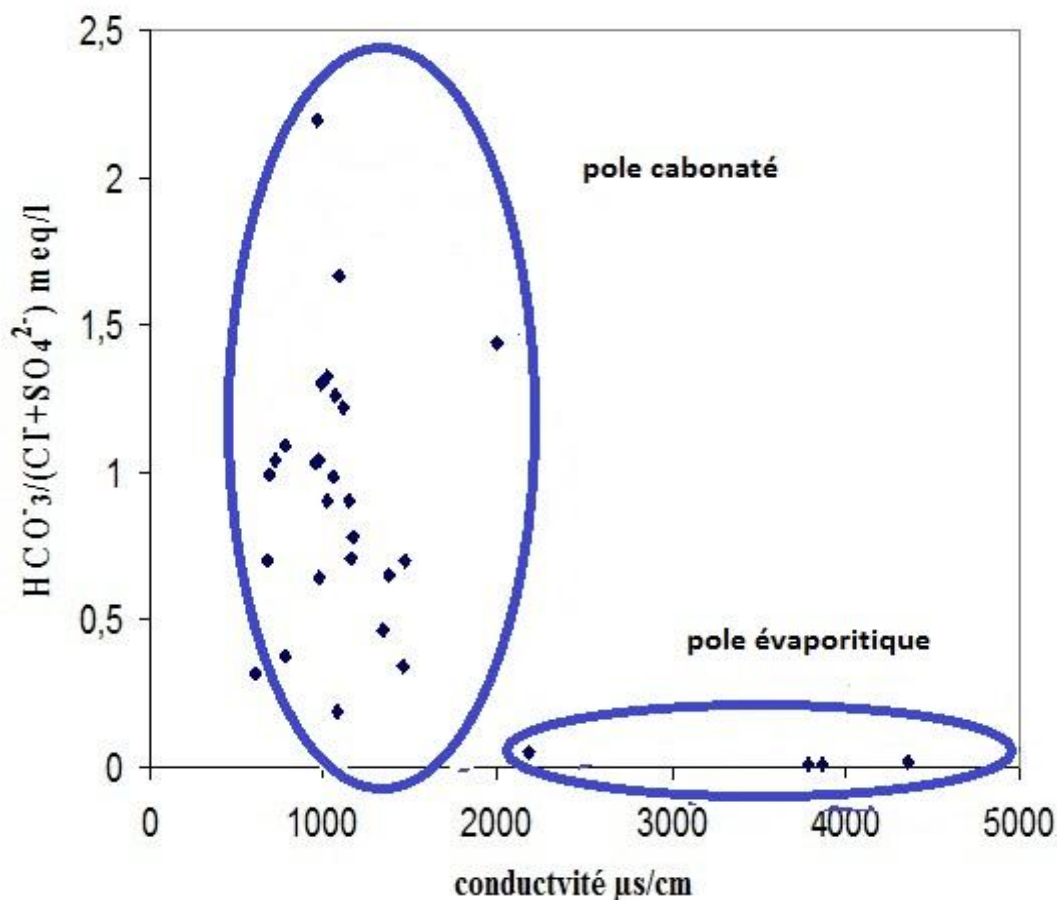
IV.5.3.1. Rapport caractéristique $r\text{HCO}_3^-/r(\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-})$ en fonction de la CE :

Figure N°25 :la relation $r\text{HCO}_3^-/r(\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-})$ conductivite (Aout 2015)

La (Figure N°25) montre une diminution logarithmique du rapport en fonction de la conductivité, deux pôles sont observés, L'un bicarbonaté caractérisés par une dominance des ions HCO_3^- et des conductivités inférieurs à $2000 \mu\text{s/cm}$. Il englobe 83% des points d'eau. L'autre représente le pole évaporitique et affirme une dominance des ions Cl^- et SO_4^{2-} . Ce pôle apparaît pour les fortes conductivités ($> 2000 \mu\text{s/cm}$) et rassemblent 17% des points Le dernier graphe (Figure N°25) nous permet de dire que la conductivité est liées aux ions bicarbonates pour des valeurs faibles ($< 2000 \mu\text{s/cm}$) ou il n y a pas de formation évaporitique. Par contre lorsqu'elle dépasse $2000 \mu\text{s/cm}$, la conductivité devient liée beaucoup plus aux ions évaporitiques Cl^- et SO_4^{2-} .

IV.5.3.2. Rapport rCl/rSO_4^{2-} en fonction de la conductivité électrique :

Ce rapport permet de déterminer la manière selon laquelle évolue la dissolution des ions évaporitiques (Na^+ marqueur de l'halite et SO_4^{2-} marqueur du gypse) en fonction de la conductivité. Le report des points sur le graphique (Figure N°26) nous montre que 70% des points d'eau présentent un rapport supérieur à 1, indiquant une dominance des ions salifères par rapport à ceux des gypses. Les deux rapports caractéristiques utilisés démontrent que la conductivité est portée essentiellement par les chlorures et secondairement par les sulfates, cependant la proximité de la mer, nous laisse penser à l'origine marine de la salinité.

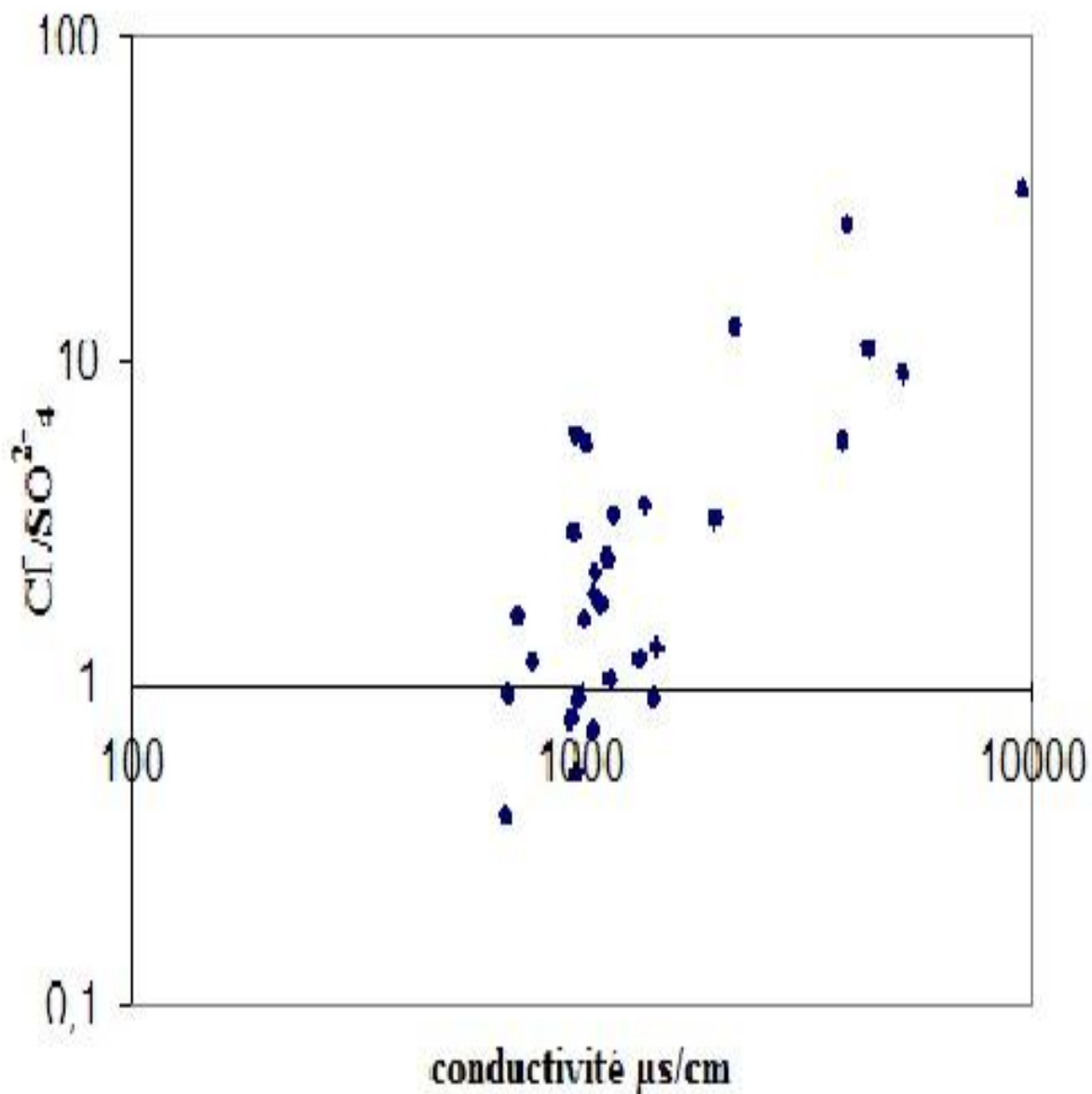


Figure N°26 : la relation Cl^-/SO_4^{2-} conductivite (Aout 2015)

IV.6. Aptitude des eaux à l'irrigation :

IV.6.1. Classification des eaux par la méthode de Wilcox :

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau exprimée en pourcentage. La représentation des différents échantillons sur ce diagramme permet la caractérisation des eaux pour leur aptitude à l'irrigation (Figures N°27). Le %Na⁺ est défini par la relation :

$$Na^+ \% = (Na^+ + K^+) / (Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na^+ + K^+) \tag{10}$$

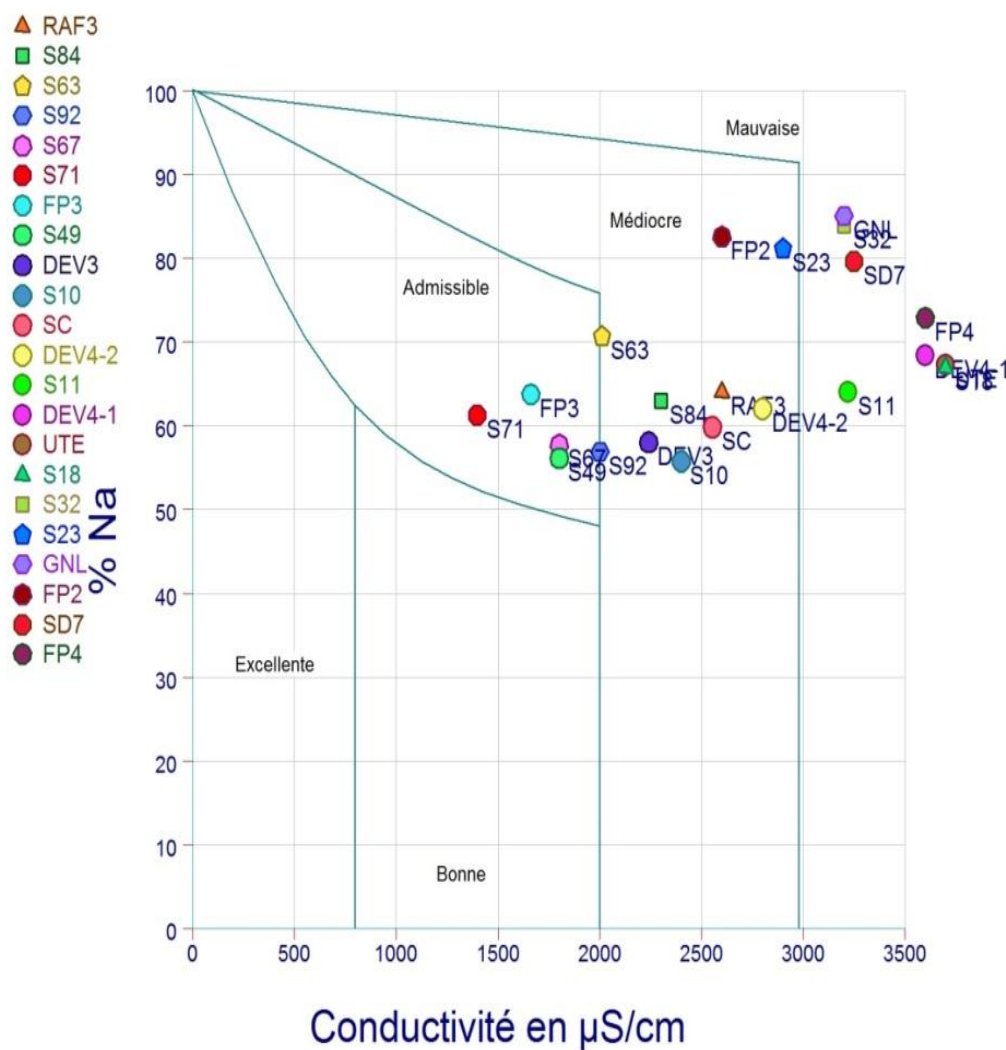


Figure N°27 : Diagramme de Wilcox pour l'année 2015.

Les diagrammes couvrant toute la période d'observation montrent que les eaux souterraines de la nappe de Skikda selon la classification de Wilcox, appartiennent aux trois classes : Admissible, Médiocre et Mauvaise (Tableau N°16).

Tableau N° 16 : Evolution des classes d'irrigation selon Wilcox.

Classe	Aout 2015
Admissible	18,18%
Médiocre	50%
Mauvaise	31,81%

La classe admissible regroupe les eaux qui sont faiblement minéralisées et se rencontre dans la région Est de la zone d'étude;

La classe Médiocre regroupe les eaux plus minéralisées que celles des classes précédentes, elle se manifeste au centre et à l'Est de Skikda.

La classe Mauvaise regroupe les eaux qui se situent au Nord-ouest et la partie sud-ouest de la plaine (près de la rive d'oued Saf-Saf). Elle est la plus répandue dans la nappe (50 %).

Nous constatons que les eaux souterraines subissent une dégradation selon le sens de l'écoulement, montrant ainsi l'effet de la lithologie sur leur qualité et l'influence de l'interaction entre l'oued, la mer et la nappe.

D'après la classification de Wilcox ont prouvé la dégradation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation.

IV.7. Pollution anthropique :

Le développement urbain, agricole, et industriel entraîne souvent une pollution rapide des eaux souterraines par les formes chimiques de l'azote, surtout celle de nitrate, en raison de leur grande solubilité et leur faible affinité aux échanges ioniques (Macko et Ostrom, 1994 Stumm et Morgan, 1996). Les autres formes de l'azote apparaissent seulement dans des conditions réductrices.

IV.7.1. Cas des nitrates :

Les nitrates NO_3^- représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. Sa présence dans les eaux souterraines est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques. Dans le cas de la nappe de Skikda les teneurs maximales en nitrates sont observées au Nord de la plaine (30 mg/l au puitsRAF3) (Figure N°28)

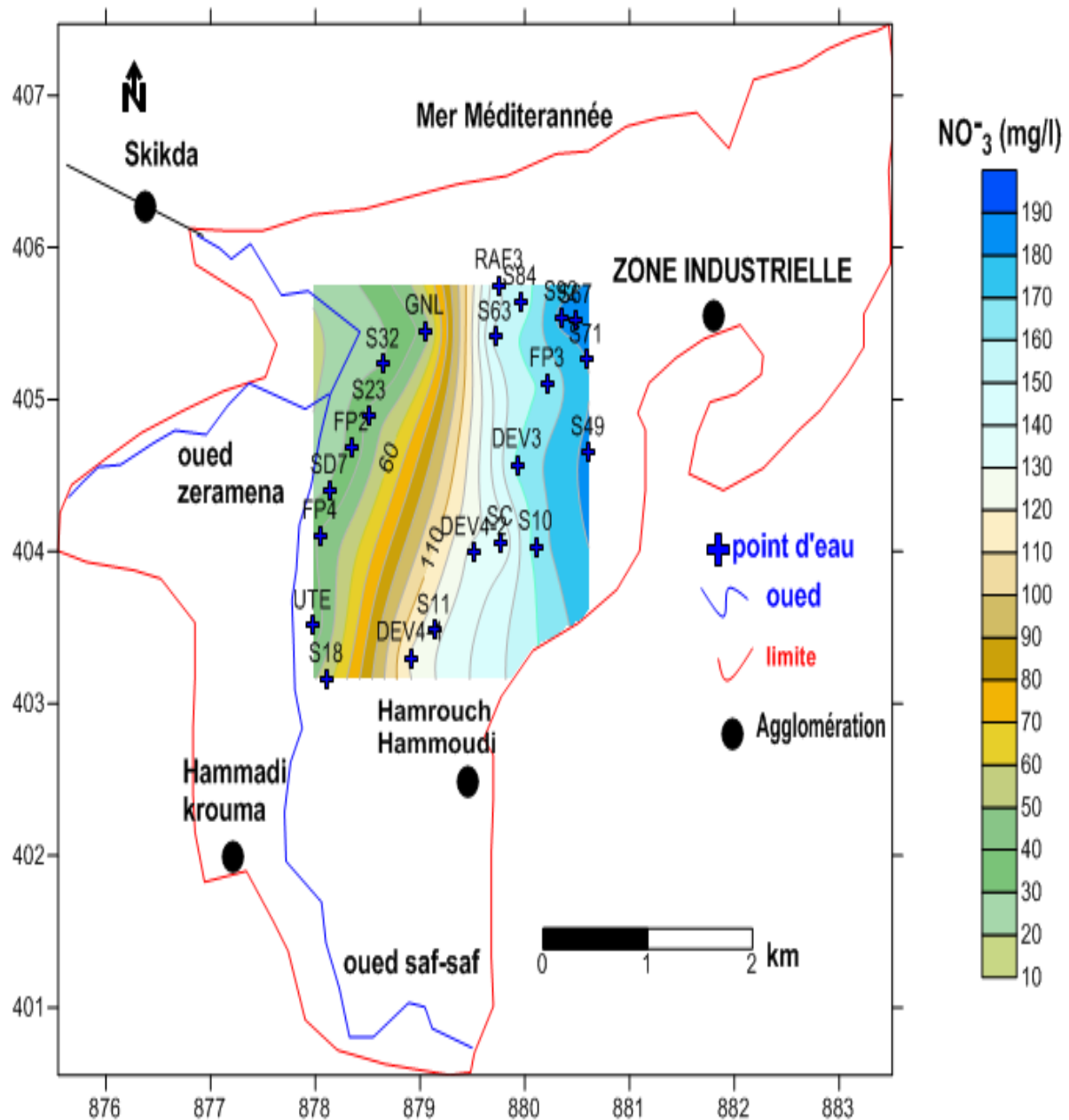


Figure N°28 : Carte de Nitrates de la plaine de Skikda (Aout 2015)

IV.7.2. Cas des nitrites :

Les nitrites ou l'azote nitreux, représentent une forme moins oxygénée et moins stable, elle représente la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium, c'est une forme toxique. Plus de 18% des échantillons ayant des concentrations supérieures à la norme (0.1 mg/l selon OSEC Suisse) les valeurs les plus élevées sont observées au Sud-Ouest de la zone d'étude. 0.2 mg/l au puits S11 elles sont dues à l'effet de réduction de la forme de nitrate (Figure N°29).

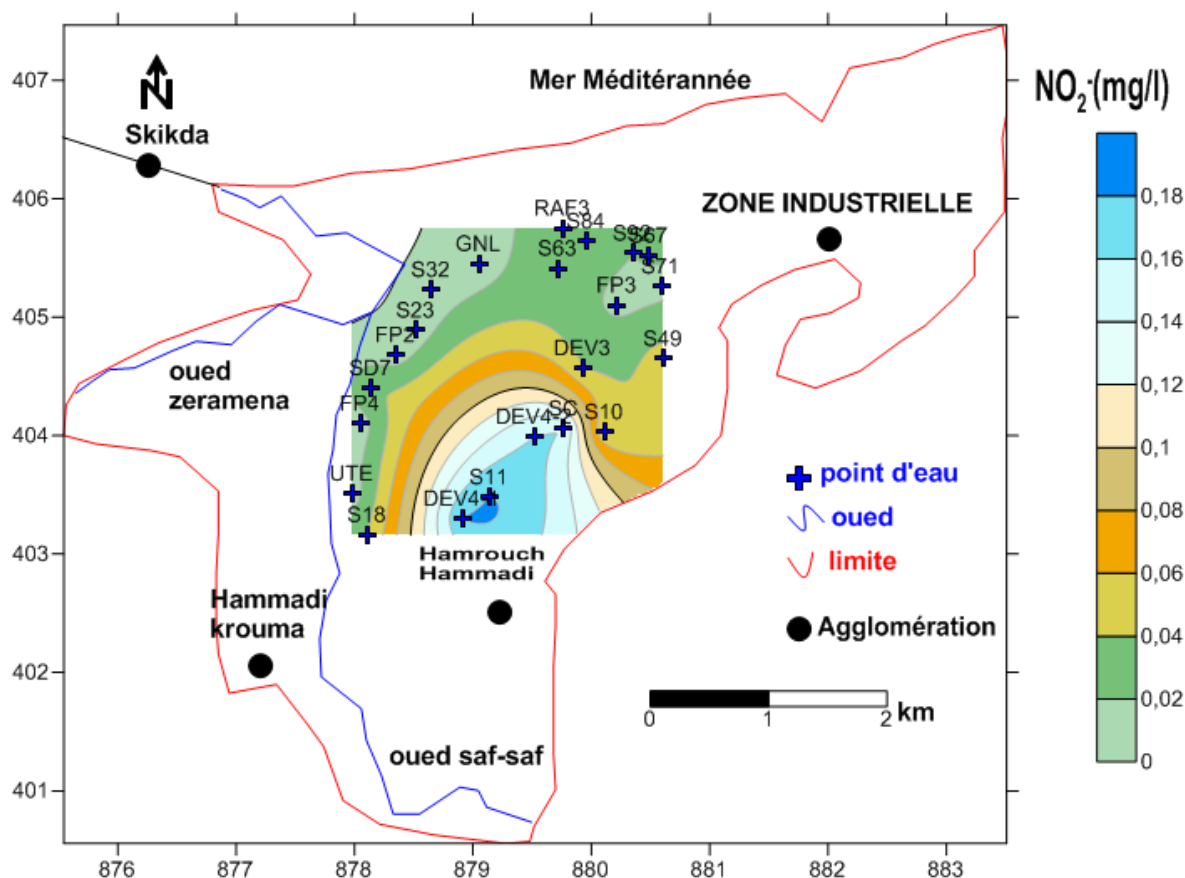


Figure N°29 : Carte de Nitrites de la plaine de Skikda (Aout 2015)

IV.7.3. Cas des phosphates (PO_4^{3-}) :

Les fortes concentrations en phosphates sont liées à l'effet des rejets urbains directement sur la plaine, ces rejets contiennent tout genre de produits soit métallique, plastiques ou organiques. Le lessivage des sols pollués contenant ces rejets par les eaux de pluie entraîne une infiltration de ces produits dans les eaux superficielles et souterraines.

Les fortes concentrations sont observées au puits S11 (0.9 mg/l en PO_4^{3-}) et au niveau des puits DVE4-2 (0.8 mg/l PO_4^{3-}) et DVE4-1 (0.55 mg/l PO_4^{3-}) situé à l'intérieur de l'agglomération de Hammrouche Hammoudi (Figure N°30).

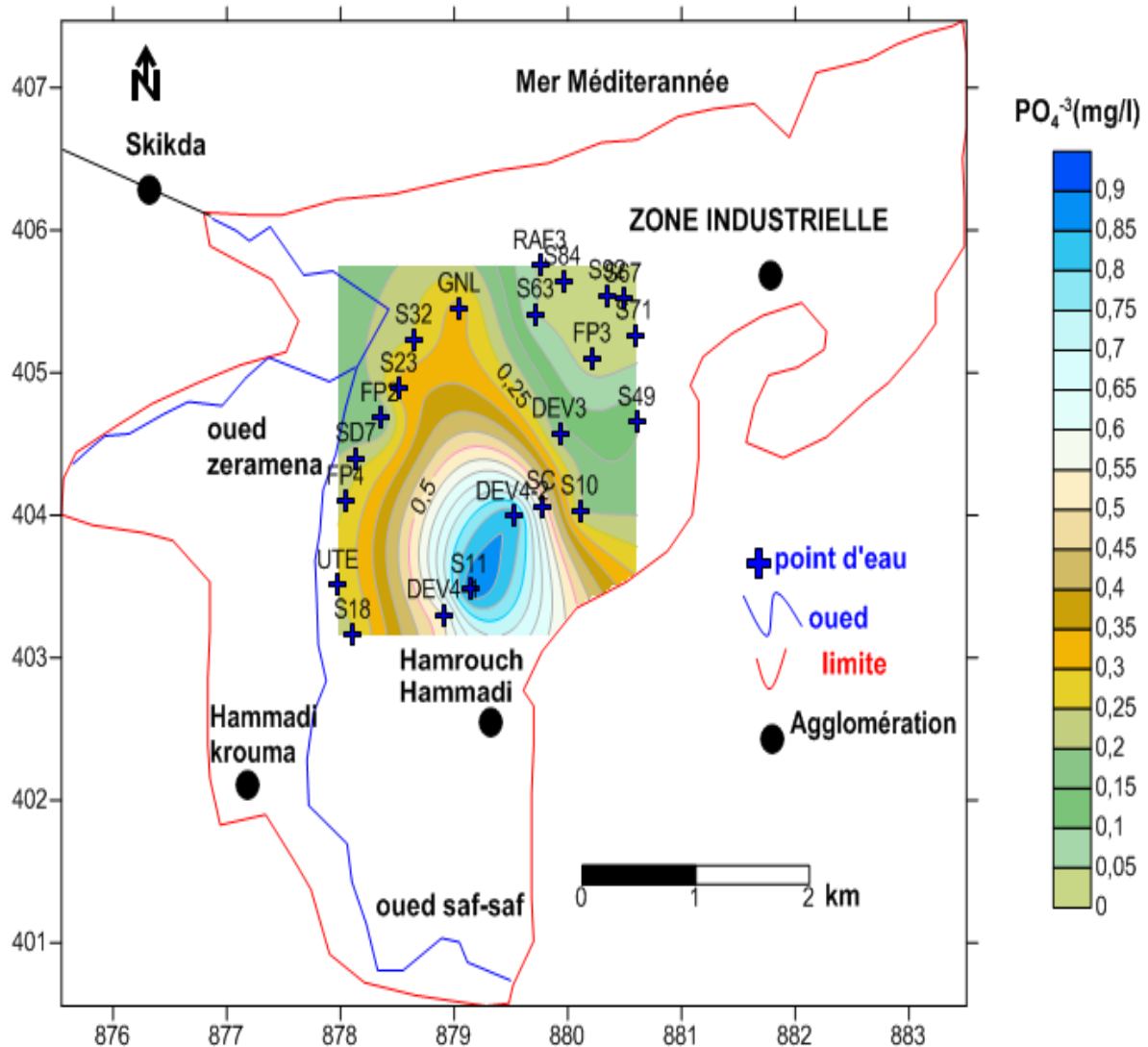


Figure N°30 : Carte de phosphate de la plaine de Skikda (Aout 2015)

IV.7.4. Eléments métalliques en traces :

IV.7.4.1. Fer (Fe) :

Cet élément chimique est souvent rencontré dans la nature. La présence de fer dans l'eau peut avoir diverses origines : naturelle par le lessivage des terrains argileux, artificielle par les industries (métallurgiques, sidérurgique). Dans le cas de la plaine de Skikda les

concentrations en fer dans les eaux souterraines sont souvent forte, elles varient entre 2 mg/l à 12,5 mg/l (compagne de Aout 2015).

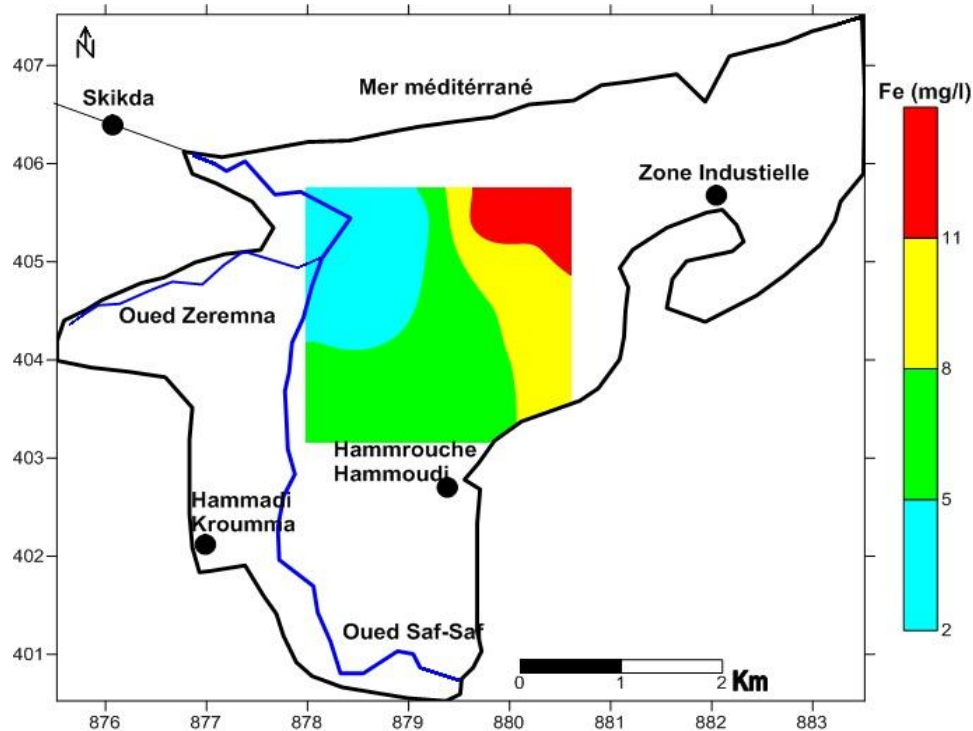


Figure N°31 : Carte de Fer de la plaine de Skikda (Aout 2015)

IV.8. Etude d'approche de la vulnérabilité de la plaine de Skikda :

IV.8.1. Introduction :

Après avoir achevé la partie précédente, qui a montré l'état de contamination de la nappe de Skikda, d'où l'intérêt de cartographier les zones vulnérables à la pollution. Cette cartographie pourrait aider les gestionnaires du secteur de l'hydraulique pour mieux gérer cette ressource hydrique en la protégeant contre la pollution et également les aider à implanter les ouvrages de captage loin des zones contaminées.

L'objectif visé par l'établissement de la cartographie de la vulnérabilité est de faire apparaître les possibilités de pénétration et de circulation des polluants dans la nappe. On peut aussi évaluer la sensibilité des ouvrages de captage au risque de pollution.

IV.8.2. Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines :

La vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine à la pollution chimique matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution chronique ou accidentelle, diffuse ou ponctuelle. L'estimation de cette vulnérabilité tient compte de certains facteurs qui sont :

- Les conditions de pénétration des polluants dans la nappe, c'est-à-dire le transit, selon un trajet vertical de corps polluants, entraînés par les eaux d'infiltration depuis la surface du sol jusqu'à une nappe souterraine, à travers la zone non saturée (couche vadose).
- La propagation des polluants dans la nappe, qui est matérialisée par l'écoulement de l'eau polluée. Elle dépend des conditions hydrodynamiques de la nappe.
- Le séjour du polluant dans la nappe, c'est-à-dire sa persistance plus ou moins prolongée, après l'élimination de la source de contamination. La durée de ce séjour est régie par le renouvellement naturel de l'eau dans la nappe aquifère.

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses. Chacun élabore sa propre méthode selon ses objectifs, dans notre approche, nous avons utilisé les méthodes DRASTIC et GOD, qui s'adapte avec les caractéristiques de notre terrain.

IV.8.3. Présentation les deux méthodes :

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

La méthode DRASTIC de Aller et al. (1985) exige la détermination de sept paramètres :

1 Profondeur de la nappe libre (D) ; 2 Net Recharge (R) ; 3 Aquifère médias (A) ; 4 Type de sol (S) ; 5 Topographie (T) ; 6 Impact de la zone vadose (I) et 7 conductivité hydraulique (C) .

La méthode GOD de Foster (1987) et Foster et al. (2006), cependant, ne tient pas compte du type de polluant. Il est basé sur la désignation des indices entre 0 et 1 avec : Ground water occurrence (G); Overall aquifer class (O); and Depth to groundwater table (D) des paramètres, respectivement.

Ces paramètres sont considérés pour établir une carte de la vulnérabilité des eaux souterraines. Les indices DRASTIC et GOD sont calculés et développés par Foster (1987). L'indice de vulnérabilité DRASTIC est calculé comme la somme des produits de chaque poids de paramètre et sa note correspondant affecté. Le poids (w) de chaque paramètre reflète son importance par rapport aux autres paramètres qui peuvent varier entre 1 et 5.

La note (r) varie de 1 à 10 pour tous les paramètres. De cette façon, l'indice de vulnérabilité DRASTIC (DVI) est calculé par l'équation suivante (Amharref et al, 2007 ; Bezelgues et al., 2002).

$$\text{DVI} = (\text{Dr} \times \text{Dw}) + (\text{Rr} \times \text{Rw}) + (\text{Ar} \times \text{Aw}) + (\text{Sr} \times \text{Sw}) + (\text{Tr} \times \text{Tw}) + (\text{Ir} \times \text{Iw}) + (\text{Cr} \times \text{Cw}) \quad (11)$$

L'indice de vulnérabilité calculée (DVI) définit la vulnérabilité des aquifères en fonction de la valeur de la classe proposée par la méthode DRASTIC (Tableau N°17).

L'indice de vulnérabilité GOD (GODI) est calculée selon l'expression suivante (Bezalgues et al, 2002; Hamza 2008 et al.) :

$$\text{GODI} = \text{Gc} \times \text{Oc} \times \text{Dc} \quad (12)$$

L'indice C a varié entre 0 et 1, pour chaque paramètre utilisé.

L'indice calculé (GODI) définit la vulnérabilité des aquifères en fonction des valeurs de classe présentées dans le tableau N°17 :

Tableau N°17: Valeurs des indices et des classes de vulnérabilité DRASTIC et GOD

Indice de vulnérabilité de méthode DRASTIC	Indice de vulnérabilité de méthode GOD	Type de vulnérabilité
48 to 84	0 to 0.1	Négligeable
84 to 114	0.1 to 0.3	Faible
114 to 145	0.3 to 0.5	Moyenne
145 to 185	0.5 to 0.7	Elevée
> 185	0.7 to 1	Extrême

IV.8.4. Etablissement la carte de vulnérabilité :

IV.8.4.1. Etablissement la carte de vulnérabilité par méthode DRASTIC:

Paramètre (D), qui correspond à la profondeur de la nappe d'eau, a été mesurée en 2015 et varie entre 2,2 m et 11 m. Cela représente l'épaisseur du matériau polluant passera par avant d'atteindre l'aquifère. Cette épaisseur est convertie ensuite dans un indice de vulnérabilité (Figure N°32).

Paramètre (R) représente la recharge annuelle nette de l'aquifère déterminée par la méthode de Thornthwaite empirique. La précipitation moyenne et l'évapotranspiration, calculée à partir des données météorologiques sur une période de 21 ans (1994-2015), ont été interpolées par krigeage ordinaire.

La recharge nette de la zone d'étude est estimée à partir de 69,8 mm / an en moyenne (Figure N°33).

Nature de la zone saturée (A) représente le matériau de l'aquifère à travers laquelle l'écoulement des eaux souterraines se produit. La gamme et la distribution spatiale de la lithologie de l'aquifère (A) sont représentées respectivement sur la (Figure N°34)

Nature du sol (S) est considéré comme la première ligne pour faire face à la pollution des eaux souterraines. La nature du sol est caractérisée par la porosité et la perméabilité, et ces deux facteurs peut contrôler le processus d'infiltration (Prasad et al ., 2010) . Le matériau dans la nature du sol est composé de graviers grossiers, sables limoneux, de sable fins, argile et de limons. (Figure N°35).

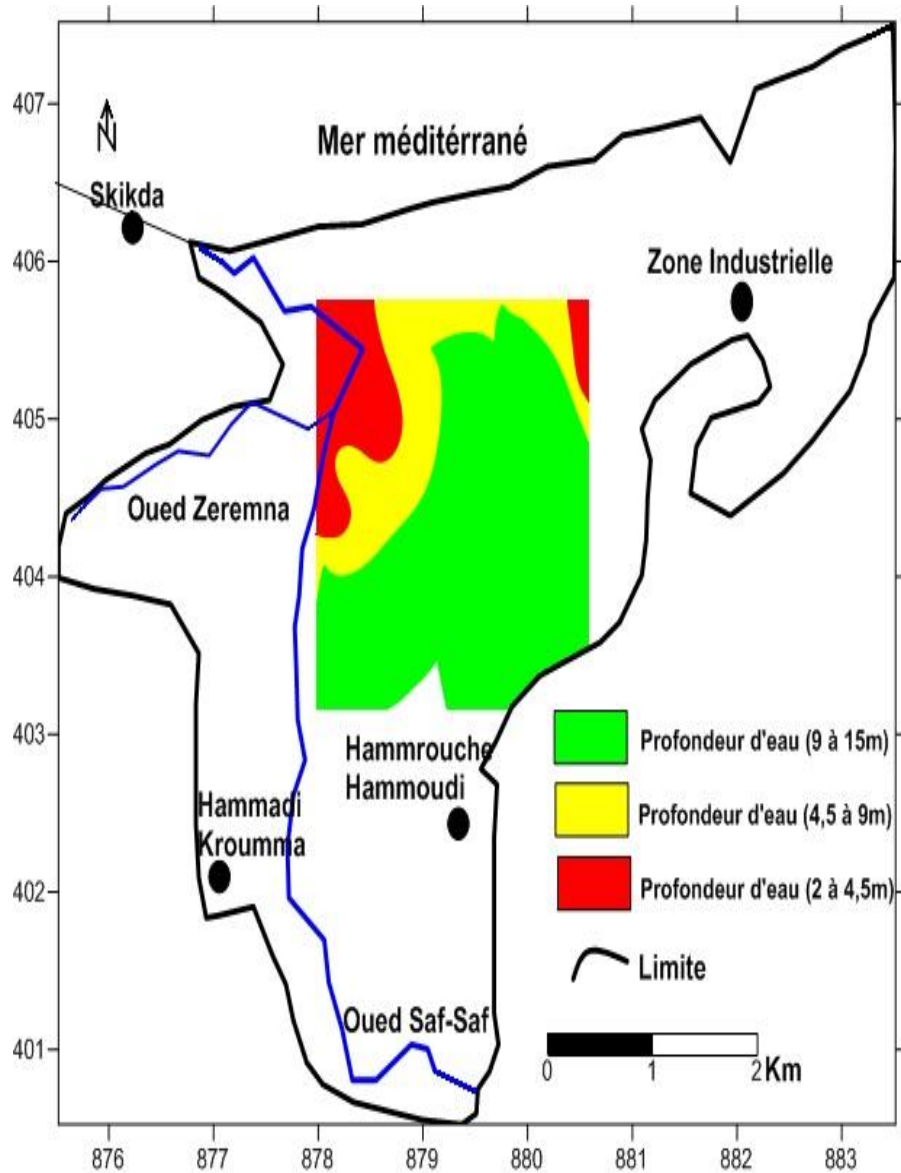


Figure N°32: Carte de profondeur du niveau d'eau dans la plaine de Skikda (Aout 2015)

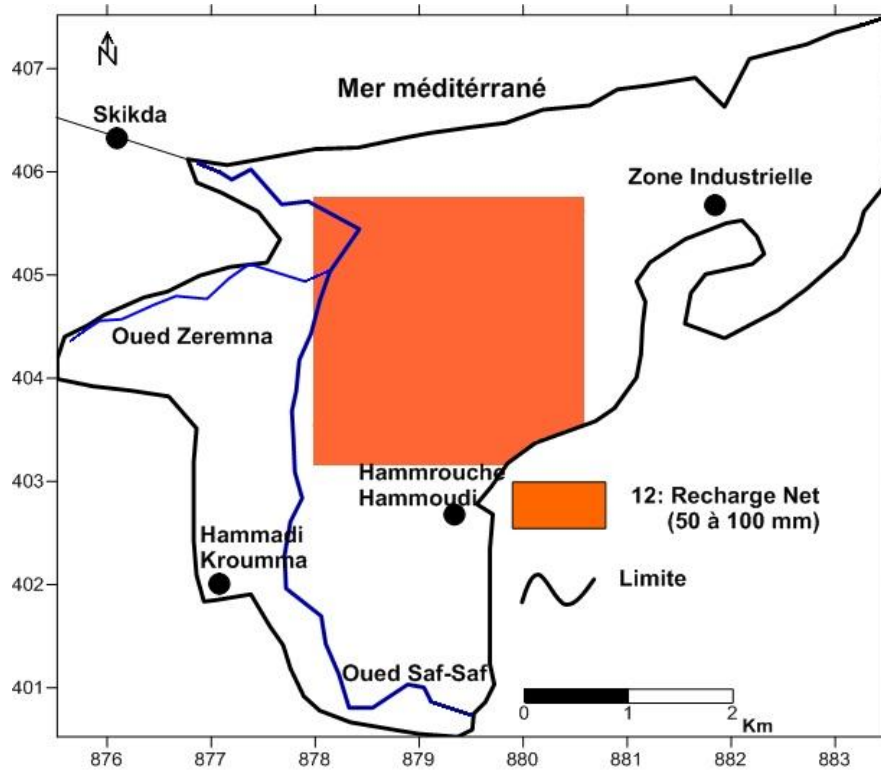


Figure N°33: Carte de la recharge d'eau dans la plaine de Skikda

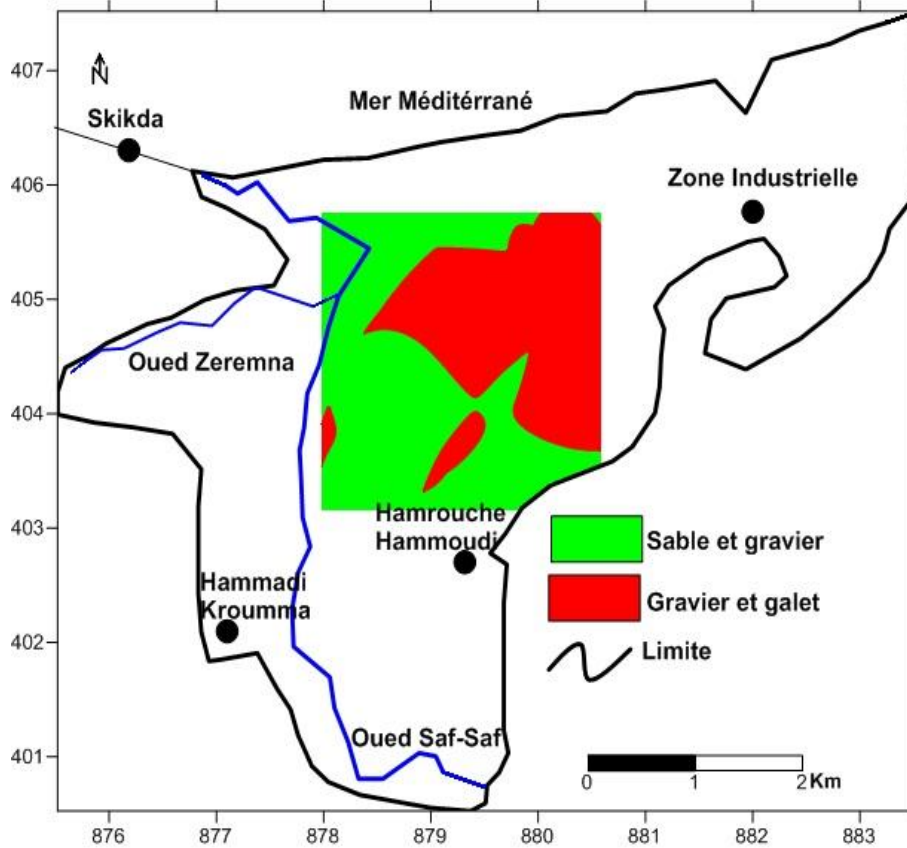


Figure N°34 : Carte des matériaux de l'aquifère de la plaine de Skikda

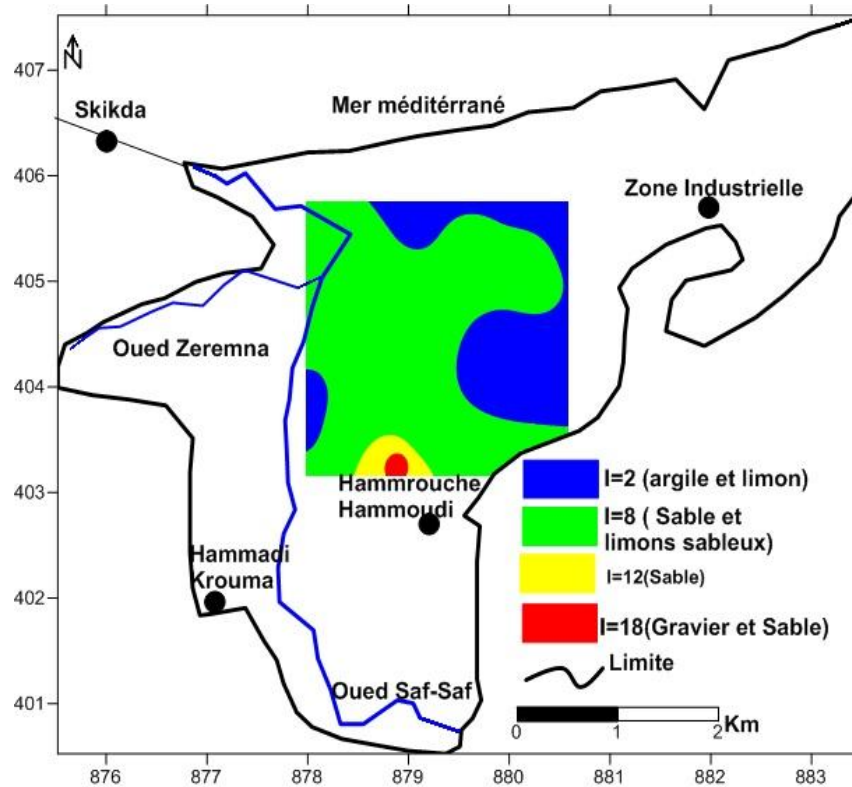


Figure N°35: Carte de nature de sol de la plaine de Skikda (Aout 2015)

Le paramètre Topographie (T) évalue l'influence du relief sur le sort des polluants déversés sur la plaine. Ce paramètre est déterminé directement à partir de la carte topographique de la région d'étude (échelle 1 : 200000). Les pentes ayant des valeurs comprises entre 0 et 3 %, couvrent toute la région (Figure N°36)

La couche sédimentaire dans l'impact de la zone vadose est composé de trois types de lithologies : argile, limons, sable et gravier avec des notations respectifs de 2, 3, 5, et 8. Lorsque une valeur de 5 est attribuée à l'impact de la zone vadose, c'est une indication d'une percolation importante et, par conséquent, un risque élevé de pollution de l'aquifère. La valeur de 5 observée, est due à l'impact de la zone vadose qui est composé de sable, graviers et galet (Figure N°37).

Il est bien connu que le risque de pollution est liée à la conductivité hydraulique de l'aquifère qui augmente la capacité de l'aquifère à transmettre l'eau. Par conséquent, des valeurs élevées de la conductivité hydraulique induisent fort potentiel de pollution (Aller et al 1985).

La zone de l'aquifère est divisée en quatre catégories en fonction de valeurs de conductivité hydraulique, qui dépend, bien entendu, de la nature lithologique des couches sédimentaires. Comme nous pouvons le voir sur la (Figure N°38). Les valeurs de l'indice de conductivité

hydraulique sont dans la catégorie élevée (entre 12 et 32). Ils reflètent donc le potentiel de pollution fort.

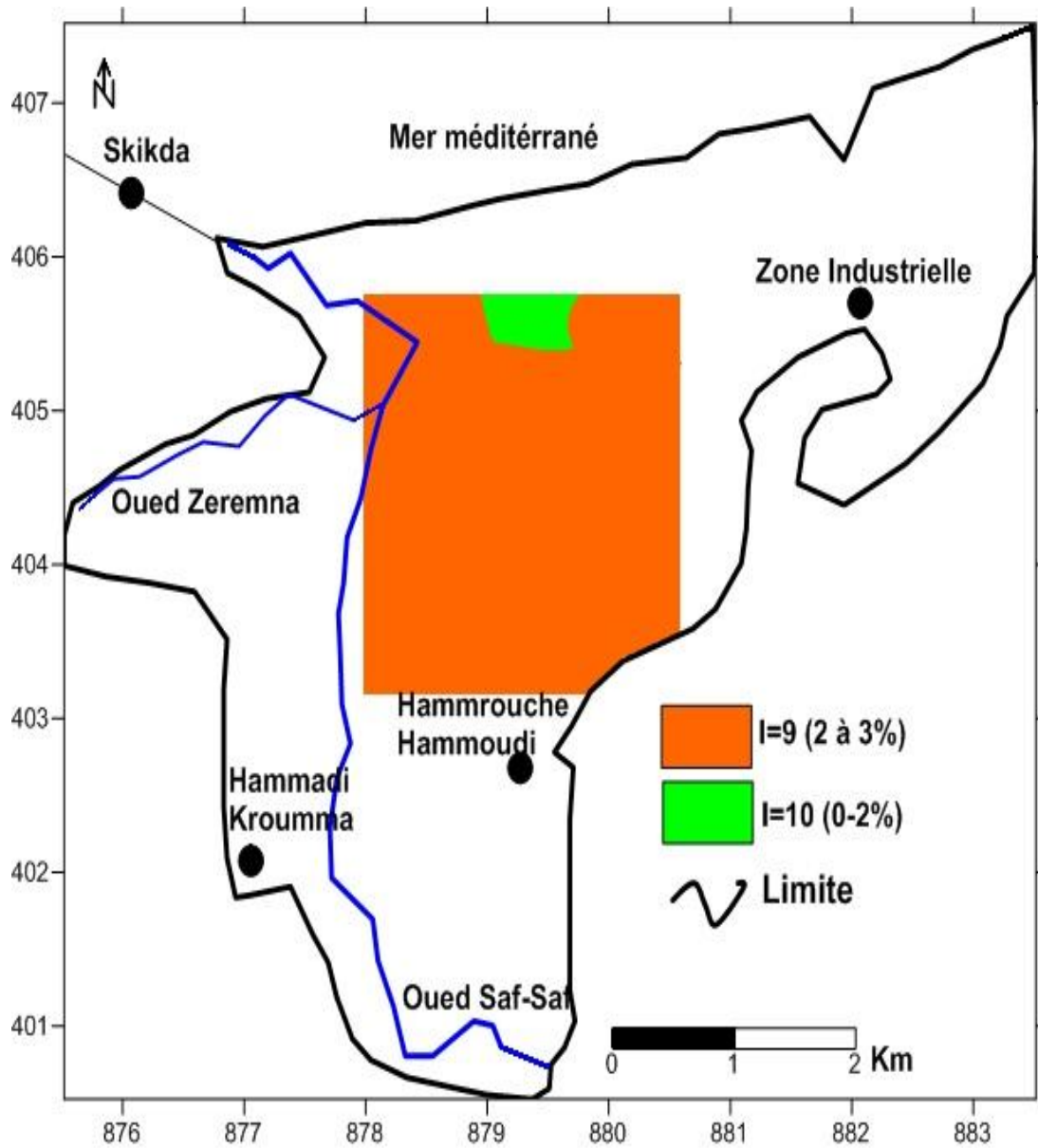


Figure N°36: Carte de l'indice de pentede la plaine de Skikda (Aout 2015)

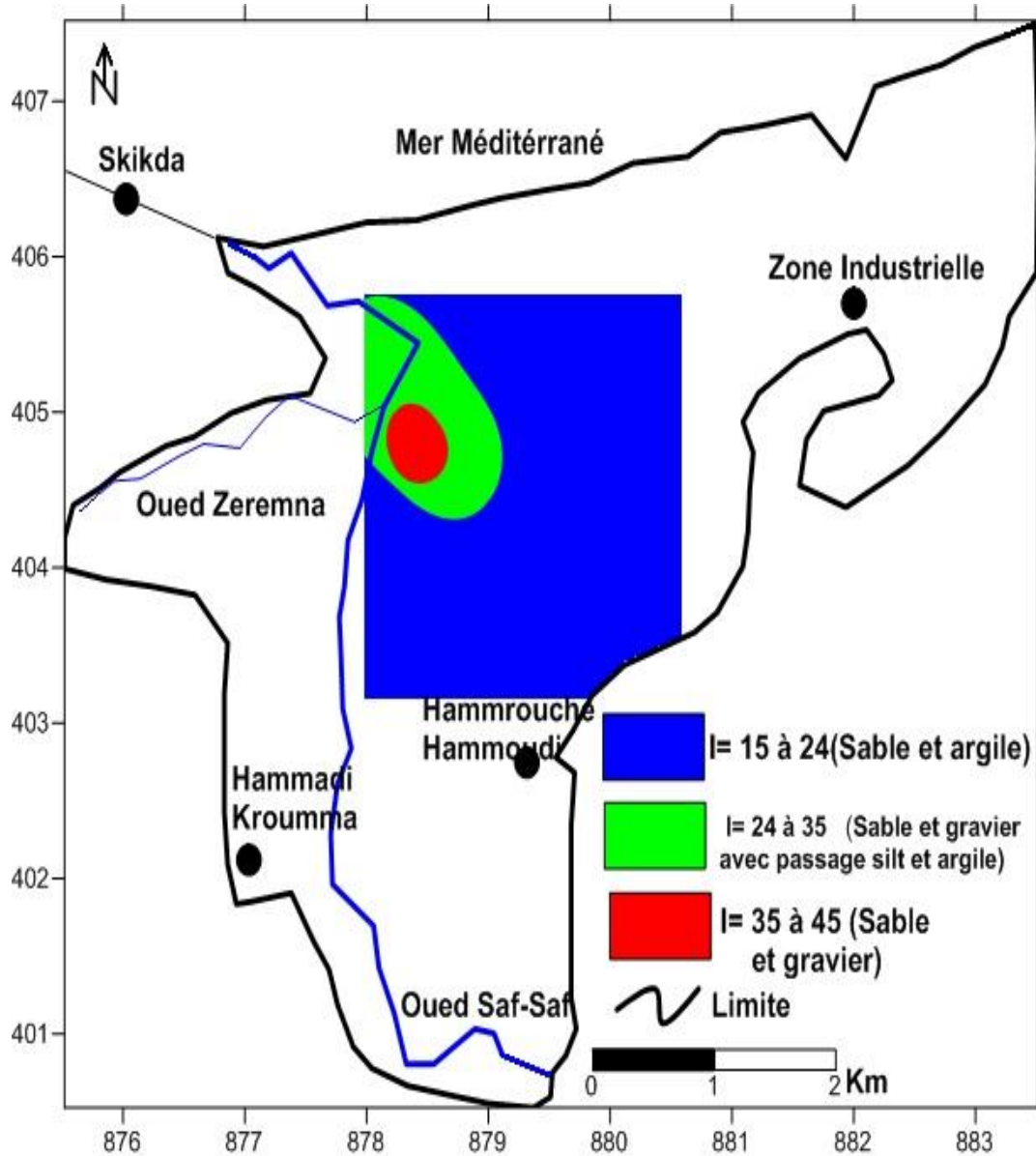


Figure N°37: Carte de l'impact de vadose zone de la plaine de Skikda (Aout 2015)

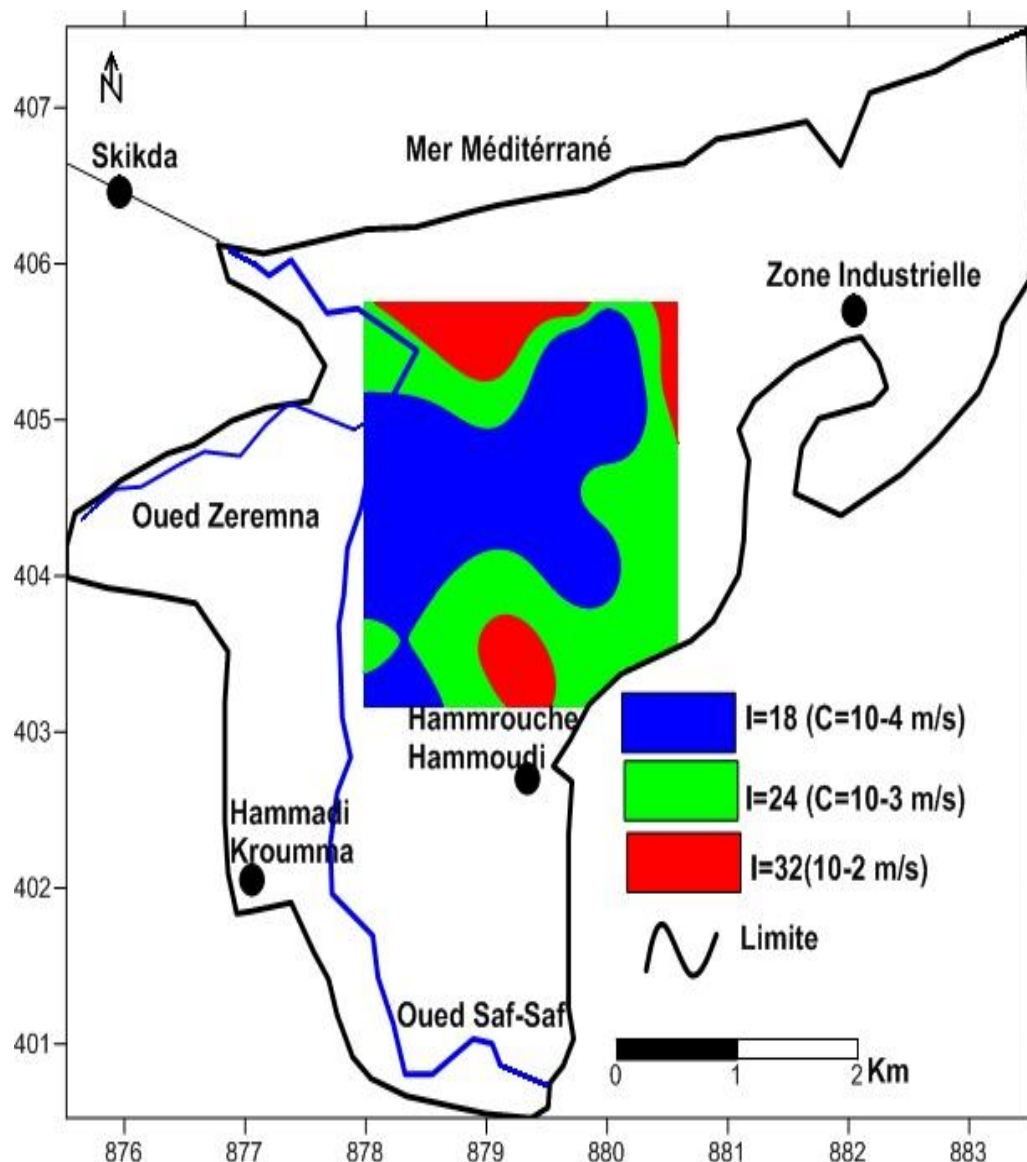


Figure N°38: Carte de perméabilité de la plaine de Skikda (Aout 2015)

IV.8.4.2. Etablissement de la carte de la vulnérabilité à la pollution par la méthode GOD:

La lithologie des couches sédimentaires de la zone saturée de l'aquifère est caractérisé par des valeurs variant entre 0,5 et 1 (voir Figure N°39).

En ce qui concerne le paramètre O, on peut observer que la zone de l'aquifère se compose de seulement trois groupes lithologiques (voir la Figure N°40), qui ont toutes les valeurs comprises entre 0,7 et 0,9.

Le paramètre D (Figure N°41), évaluée par la profondeur de l'eau souterraine est représenté par seulement trois gammes de profondeur : profondeur inférieure à 5 m, entre 5 et 10 m, et entre 10 et 15 m. Pour chaque gamme, les valeurs de l'indice sont 0,9, 0,8 et 0,7, respectivement.

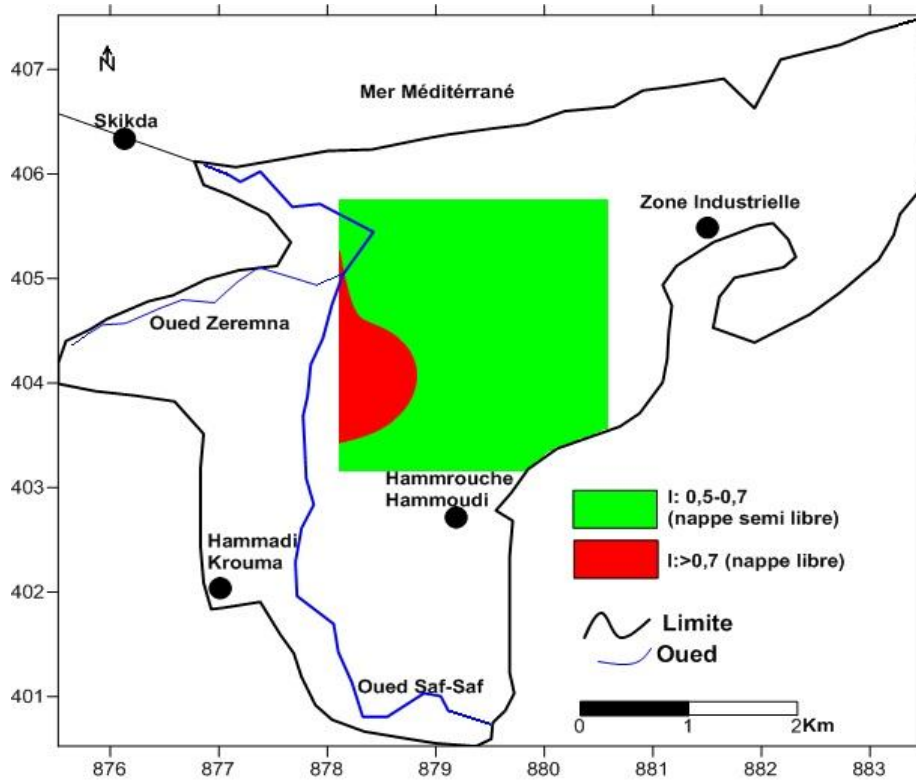


Figure N°39: Carte de type d'aquifer de la plaine de Skikda (Aout 2015)

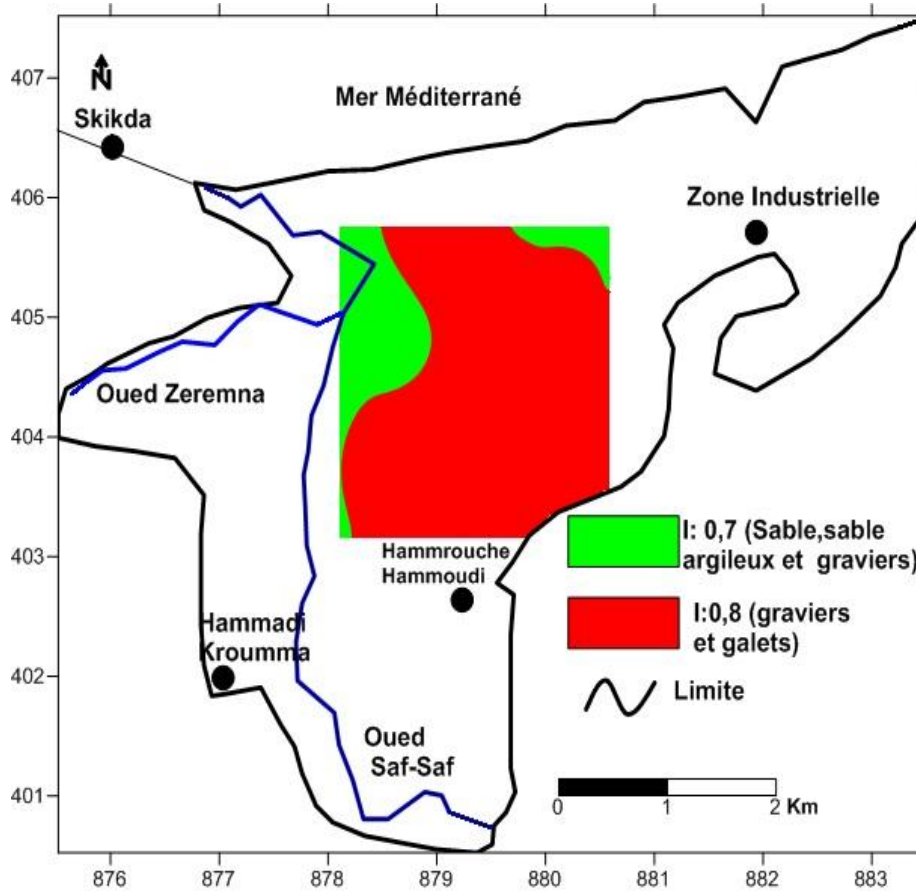


Figure N°40: Carte d'impact de la zone non saturée de la plaine de Skikda (Aout 2015)

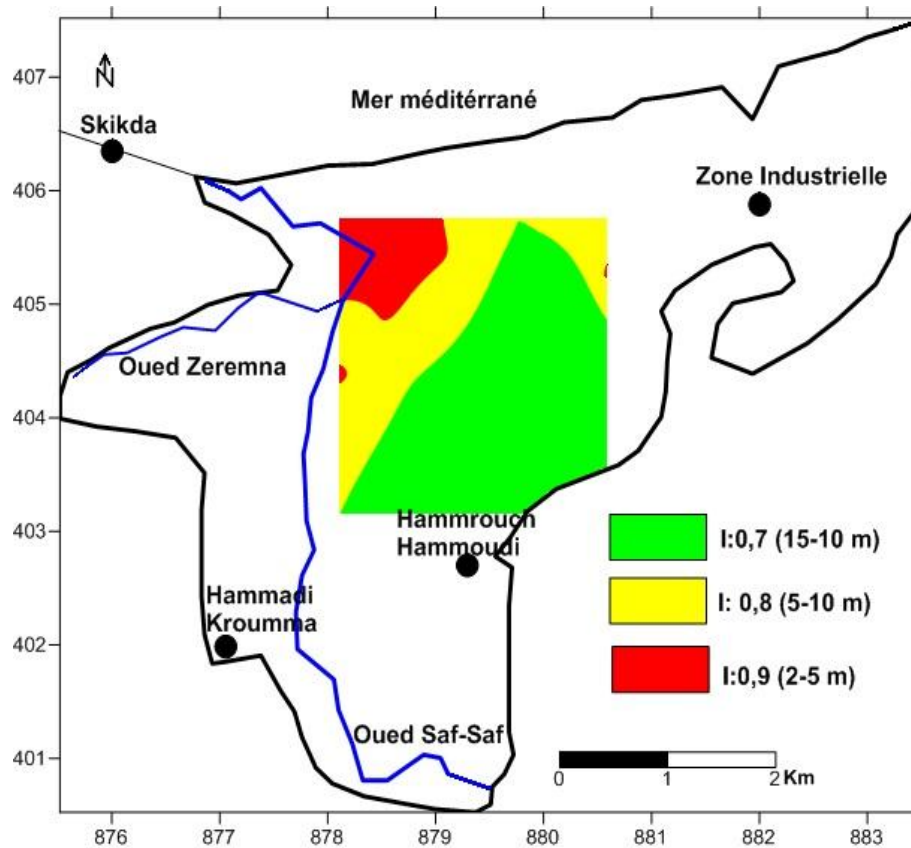


Figure N°41: Carte de profondeur d'eau de la plaine de Skikda (Aout 2015)

IV.8.5. Cartes de synthèse :

En utilisant les équations (23) et (24), la compilation des données géospatiales de tous les paramètres, utilisés dans les modèles DRASTIC et GOD, permet de calculer les indices de vulnérabilité DRASTIC et GOD, qui indiquent la distribution de la vulnérabilité et d'établir, ainsi, la carte finale de la vulnérabilité à la pollution.

IV.8.5.1. Méthode statistique :

Un test de sensibilité a été effectué: l'analyse de sensibilité unique paramètre (Napolitano et Fabbri, 1996).

Le test est le paramètre unique de sensibilité, obtenu en identifiant l'impact de la vulnérabilité de chaque paramètre dans le modèle DRASTIC sur l'indice de vulnérabilité. Il compare le poids «efficace» ou «réel» de chaque paramètre d'entrée dans chaque polygone avec le poids «théorique» attribué par le modèle analytique (Kazakis et al. 2015). Le poids «effectif» de chaque polygone a été obtenu selon la formule suivante:

$$W = (Pr \times Pw / V) \times 100 \quad (13)$$

Où W est la pondération effectif de chaque paramètre, Pr est la valeur de note, Pw est la valeur de pondération de chaque paramètre, et V est la valeur globale de l'indice appliqué.

IV.8.5.2.méthode DRASTIC :

La carte de la vulnérabilité de l'indice DRASTIC, calculé, montre que l'indice varie entre 115 et 160. Selon le tableau 27, deux classes de vulnérabilité se distinguent: moyenne et élevée, d'où la déduction suivante:

- La classe de la vulnérabilité moyenne, située dans le centre et à l'Est de l'aquifère, représente 58,82% de la zone d'étude (Figure N°42). Cet indice de vulnérabilité est dû à la profondeur de la nappe libre, la lithologie de la zone non saturée, la lithologie de l'aquifère et la conductivité hydraulique. La lithologie de la zone non saturée est constituée d'argile, de gravier et de sable, où la conductivité hydraulique est égale à 10^{-3} m/s.
- La classe de la vulnérabilité élevée couvre 41,17 % de la superficie de l'aquifère et s'étend du Sud-Est et au Nord-ouest de la région d'étude. La vulnérabilité de la pollution est élevée parce que (1) la conductivité hydraulique a une valeur de 10^{-2} m/s, aquifère considéré comme perméable, (2) la lithologie de l'impact de la zone vadose est composé de gravier et de sable, (3) la profondeur d'eau varie entre 2,2 m et 10 m (Figure N°42) et (4) la lithologie d'aquifère (A) est formée de sable, de gravier et de galet.

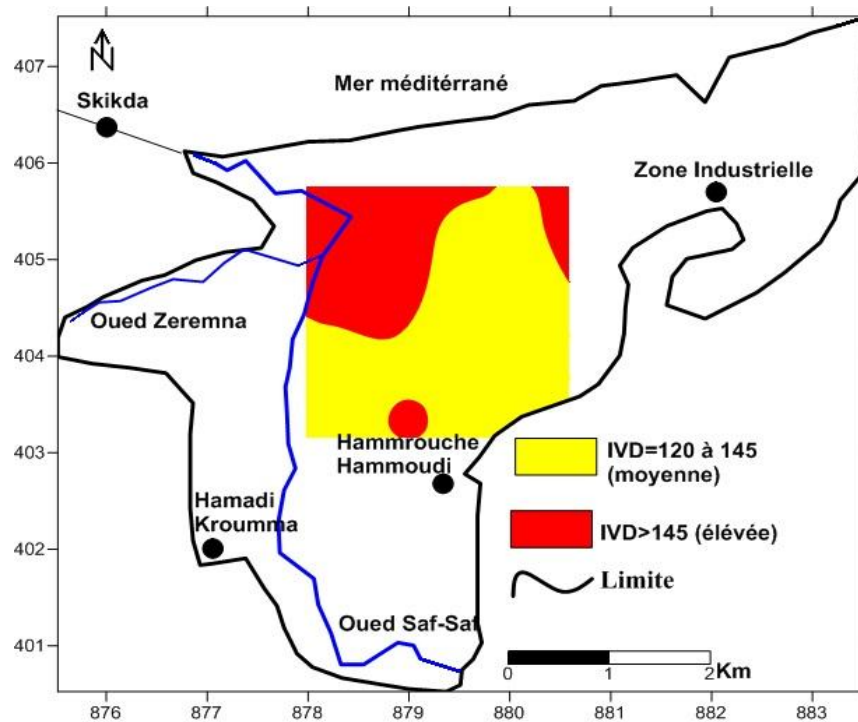


Figure N°42: Carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC de la plaine de Skikda (Aout 2015)

IV.8.5.3. méthode GOD :

La carte de vulnérabilité de GOD calculée montre que l'indice fluctue entre 0,2 et 0,7 également trois classes peuvent être distinguées: faible, moyen et élevée

(Figure N°43) :

- La classe moyenne est principalement dispersée dans l'extrême et une petite zone dans le Nord de la plaine ; il représente environ 83,33 % de toute la surface (Figure N°43).

L'indice de vulnérabilité moyenne est lié à la profondeur d'eau de la nappe qui varie de 5 à 10 m dans cette région.

- La classe élevée, occupe seulement 16,66% de la plaine et se trouve dans le Sud-Ouest (Figure N°43). Le degré élevé de vulnérabilité est expliquée par (1) la présence d'une faible profondeur de la nappe libre (inférieure à 5 m) et (2) la nature lithologique (gravier et sable argileux) de la zone non saturée.

Les cartes DRASTIC et GOD montrent que l'Ouest de l'aquifère sont les plus vulnérables

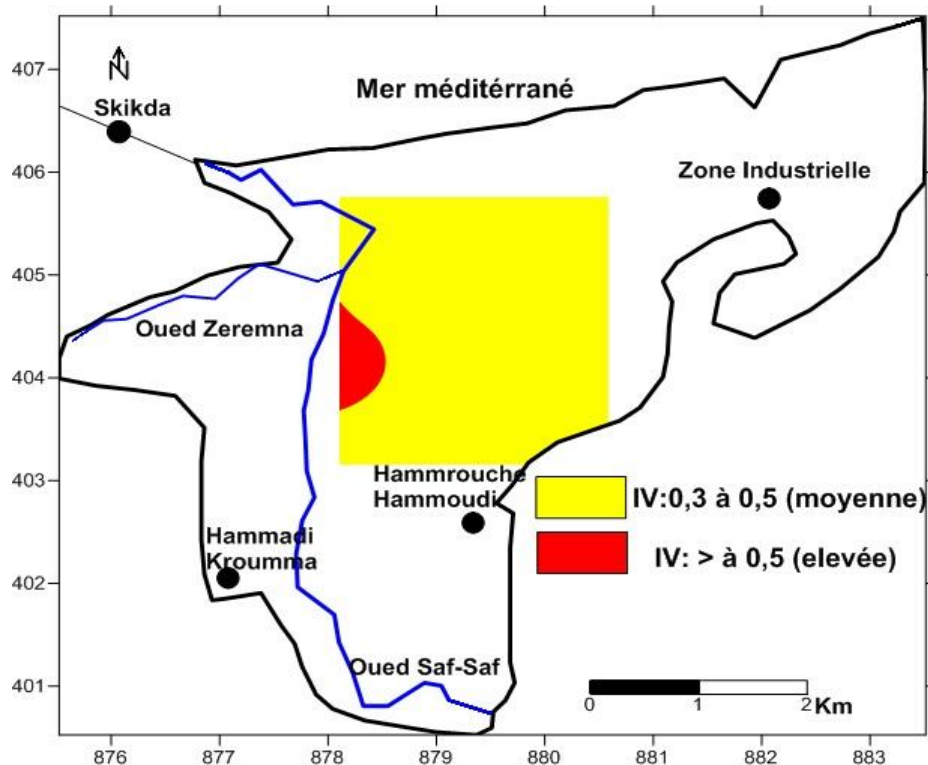


Figure N°43 : Carte de vulnérabilité selon la méthode GOD de la plaine de Skikda (Aout 2015)

IV.8.6. Analyse de sensibilité de paramètre unique:

Dans la section d'analyse de sensibilité de paramètre unique, le poids théorique et la masse effective des sept paramètres sont comparés, et ils vérifient l'effet de paramètre individuel sur l'indice de vulnérabilité. Poids théorique représente le poids de l'indice DRASTIC de chaque paramètre et le poids des valeurs efficaces assignées par le modèle analytique (Kazakis et al , 2015; . Martinez- Bastida et al ., 2010) .

Les poids effectifs des paramètres DRASTIC présentaient un certain écart par rapport à leurs poids théoriques (Tableau N°18).

Tableau N°18 : Statistique de paramètre unique sensibilité.

Indice	Poids théorique (%)	Poids effectif (%)				CV (%)
		Min	Max	Moy	Standard Deviation	
Profondeur de la nappe(D)	21,7	16,67	31,03	23,85	4,46	70,6
Recharge de la nappe (R)	17.4	7,5	9,52	8,69	0,69	13,34
	13	15	19,05	17,36	1,37	32,2
Nature lithologique de l'aquifère (A)	8.7	1,49	12,68	4,43	3,31	59
Nature du sol (S)	4.3	5,63	7,94	6,72	0,61	28,4
Topographie (T)	21,7	17,24	29,8	22,61	2,93	41,9
Impact de la zone non saturée (I)	13	9,16	22,86	16,34	4,32	41,9
Conductivité hydraulique (C)						

L'étude montre que la profondeur d'eau de la nappe, l'impact de la zone non saturée et la lithologie de l'aquifère possèdent un degré élevé de poids efficace dans l'évaluation de la vulnérabilité, avec une valeur moyenne de 23,85%,22,61% et 17,36%, respectivement. Le poids effectif observé de la lithologie de l'aquifère montre des valeurs plus élevées que celles du poids théorique utilisé dans le modèle DRASTIC. Le poids effectif est de 23,85% pour l'impact de la zone non saturée est légèrement plus élevé par rapport à un poids théorique de 21,7%.

La topographie révèle un poids effectif de 6,72%, par rapport à une valeur faible de 4,30% pour le poids théorique. Cependant, la recharge et la nature du sol, possèdent tous un poids théorique élevé à l'égard du poids effectif. Le poids effectif de 16,34% pour la conductivité hydraulique converge par rapport au poids théorique de 13%.

IV.8.7. Validation la carte de vulnérabilité à la pollution par le Fer:

IV.8.7.1. Distribution spatiale de Fer:

Pour soutenir les cartes de vulnérabilité obtenus, l'analyse chimique des eaux souterraines était nécessaire (Ake et al, 2009. Saidi et al, 2009;. Schijven et al, 2010). Teneurs en fer ont été, par conséquent, mesurés et leur répartition dans les eaux souterraines au cours de l'enquête en Aout 2015 indiqués sur la (Figure N°31). La concentration de fer varie entre 2 et 13 mg / l dans les eaux souterraines, et une classe (élevé) peuvent être reconnu:

- Teneurs élevées (supérieures à 0,5 mg / l) sont distribués dans toute la région. Cela confirme la grande vulnérabilité à la pollution dans ces zones. On peut également noter que la concentration en fer diminue du centre vers les régions occidentales.

IV.9. Conclusion :

Cette étude expose clairement le problème de la gestion des ressources en eau et la protection des eaux souterraines contre la pollution dans les régions humides.

Les différents points dans ce chapitre ont fait état de la qualité et la pollution de la nappe superficielle de Skikda.

Notre approche a permis de préciser l'importance de la pollution et de préciser son origine. Ainsi, la nappe superficielle de Skikda semble être fortement contaminée par des métaux lourds d'origine industrielle, suite à l'utilisation de produits chimiques plus que nécessaire pour l'industrie. D'autres part, les rejets domestiques, déversés sans aucun traitement préalable dans la plaine, sont une source importante de pollution.

La nature lithologique de la couche vadose et celle de la couche aquifère ont favorisé la contamination de cette dernière et influencé la répartition des sels dans l'aquifère.

Les ions salifères (Na^+ , Cl^-) entrent directement dans l'augmentation de la salinité, ce faciès observé sur les deux rives de l'oued Saf-Saf du à l'intrusion marine surtout aux périodes estivales ou les apports de l'oued diminuent. Au Nord de la plaine la salinité due aux évaporites (halite et le gypse). Le résultat de la dernière transgression marine du Mio- Pliocène.

Nous notons l'effet de la contamination naturelle, marquée par le taux de salinité élevé avec de fortes concentrations en Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et Ca^{2+} .

Les méthodes DRASTIC et GOD ont permis d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque inhérente à la pollution de la plaine de Skikda. L'examen de la carte de vulnérabilité a révélé que la vulnérabilité se concentre sur les classes moyenne et élevée. Les valeurs élevées de l'indice de vulnérabilité selon les deux méthodes DRASTIC et GOD varient entre 120, 160, 0,3 et 0,7, respectivement. Cette vulnérabilité élevée en toute la surface de la plaine, la répartition des teneurs en fer suit cette augmentation.

Selon l'analyse de la sensibilité du paramètre unique, les paramètres de la profondeur d'eau et de la conductivité hydraulique, de l'impact de la zone non saturée et de la lithologie de l'aquifère sont plus importants que les autres paramètres.

La procédure d'élaborer des cartes spécifiques de vulnérabilité a de nombreuses limites ; elle dépend étroitement de la disponibilité et la fiabilité des données adéquates.

L'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines est un outil utile pour la gestion des ressources en eau souterraine et la protection des nappes aquifères. Les résultats fournissent des informations importantes et la carte de vulnérabilité pourrait être utilisée par les autorités locales et les décideurs afin de prévenir toute nouvelle pollution.

Une réflexion approfondie doit être menée pour une agriculture durable, sans qu'elle soit polluante, afin de mieux gérer les ressources en eau, car malheureusement les nappes dans la région sont, à différents degrés, vulnérables à la pollution.

Conclusion générale

La plaine de Skikda fait partie du sous bassin versant de l'oued Saf-Saf et a une forme d'un quadrilatère allongé d'une longueur de 8 Km et d'une largeur de 5 Km le long de la mer. La plaine est à vocation industrielle et agricole qui nécessite la mobilisation d'une grande quantité d'eau aussi bien pour l'industrie et l'AEP, que pour l'irrigation.

L'étude géologique de la région laisse apparaître l'existence de trois formations lithostratigraphiques d'importance inégale. La première formation est celle du Mio-Plio-Quaternaire formé par des alluvions de surface à dominance sablo- limoneuse et limono argileuse en dessous de cette formation on rencontre une couche soit de sable et gravier formant le réservoir de la nappe proprement dit ayant une épaisseur moyenne de 15 à 25 m. Ces formations reposent sur une couche former par une alternance de marne et de grés de Pliocène qui constitue le substratum.

La zone d'étude se trouve dans une zone à climat méditerranéen tempéré, avec un hiver très humide et un été chaude, où la moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 800 mm/an selon la station de Skikda mais réellement les précipitations oscillent entre 800 et 1200 mm/an. La température moyenne annuelle est de 19.7°C. Ce type de climat chaud en été et froid en hiver, favorise l'évaporation des eaux précipitées et augmente l'ETP et le déficit agricole au profit de l'infiltration et du ruissellement.

L'étude de la piézométrie a montré que la surface piézométrique est non uniforme avec un écoulement de direction générale Sud-Nord

Les analyses hydrochimiques montrent une évolution inverse des éléments chimiques avec les précipitations. On a pu distinguer une liaison de cause à effet entre la géologie, l'invasion marine et la composition chimique des eaux expliquant le mode d'acquisition de chimismes des eaux souterraines.

Enfin, la région est le siège d'une pollution diffuse surtout des eaux souterraines par les fers.

Les méthodes DRASTIC et GOD ont permis d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque inhérente à la pollution de la plaine de Skikda. L'examen de la carte de vulnérabilité a révélé que la vulnérabilité se concentre sur les classes moyenne et élevée. Les valeurs élevées de l'indice de vulnérabilité, selon les deux méthodes DRASTIC et GOD, varie entre 145, 160 et 0,3, 0,7, respectivement. Cette vulnérabilité élevée en toute la région d'étude. La répartition des teneurs en fer soutient cette augmentation.

Selon l'analyse de sensibilité du paramètre unique, les paramètres de la conductivité hydraulique, de l'impact de la zone non saturée, la profondeur d'eau et la lithologie de l'aquifère sont plus importants que les autres paramètres.

L'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines est un outil indispensable pour la gestion des ressources en eau souterraine et leur protection. Les résultats fournissent des informations importantes, tandis que la carte de vulnérabilité pourrait être utilisée par les autorités locales et les décideurs afin de prévenir toute nouvelle pollution.

Cette étude expose clairement le problème de la gestion des ressources en eau et la protection des eaux souterraines contre la pollution dans les régions semi-arides.

Il s'avère que malheureusement les nappes aquifères sont vulnérables et une réflexion pour une agriculture durable doit passer par l'amélioration de la gestion des ressources en eau.

Recommandation

Pour mieux protéger la nappe contre la pollution il est nécessaire :

Une surveillance et une étude à long terme des ressources en eau.

D'étudier les périmètres de protection de la nappe pour un éventuel développement socioéconomique dans la région.

Interdire les rejets des eaux usées domestiques et industrielles dans la nappe contrôler la quantité des engrais et des pesticides utilisés par l'agriculture.

Eviter l'installation des sites industriels et les décharges sur des sites à forte vulnérabilité.

Pour l'exploitation de la nappe alluviale il est important de connaître le bilan hydrologique de la nappe et les débits d'exhaure afin d'éviter le déséquilibre de l'interface naturelle eau douce eau salée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1-Amrani Leila, Seghirou Djahida (1998):** Etude hydrogéologique du bassin versant de l'oued Saf-Saf. Wilaya de Skikda. Mémoire d'Ingénieur, Université de Constantine.
- 2- Khelfaoui Fayçal (2007):** ressources en eau et gestion intégrée dans le bassin versant du Saf-Saf (Nord-est Algérien) mémoire magister Université de Annaba
- 3- Annie Erhard-Cassegrain, Jean Margat (1983):** Introduction à l'économie générale de l'eau. Edition Masson. Paris (361 p).
- 4- Aoun. S. (2003):** Hydrochimie des eaux souterraines de zone industrielle de Skikda, explication de l'origine de la minéralisation. Mémoire d'Ingénieur. Université de Annaba. (82 p).
- 5- Ben Rabah Samia (2006):** Etat actuel des ressources en eau dans la Wilaya de Skikda (Essai de synthèse): Bilan-Gestion-Perspective. Mémoire de Magister, Université Annaba
- 6- Ben Redjem. R, Boularoug. W. (2006):** Hydrogéologie et Hydrochimie de la zone industrielle – Wilaya de Skikda - . Mémoire d'Ingénieur. Université de Annaba. (109
- 7- B.N.E.D.E.R. (2005):** Etude d'inventaire et d'évaluation des ressources en eau souterraines dans le bassin versant de l'oued Saf-Saf (amont). Phase 1, Phase 3.
- **Bourouh Houda (2002):** Etude hydrogéologique et pollution des eaux du bassin versant de l'oued Saf-Saf Wilaya de Skikda. Mémoire d'Ingénieur, Université de Constantine.
- 8- Bourourou. N. (2006):** Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine alluviale de l'oued Saf-Saf aval - Wilaya de Skikda-. Mémoire d'Ingénieur. Université de Constantine
- 9- Chaffai. H, Laouar. R, Djabri. L et Hani. A. (2006):** Etude de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Skikda; Application de la méthode DRASTIC. Bulletin du Service Géologique National. Vol.17.n°1, pp. 63-74.
- 10- Zair Nadjet (2017):** Caractérisation hydrogéologique des nappes aquifères de la région d'oum-El Bouaghi (Nord-Est Algérien) Thèse Doctorat Université Annaba

Liste des Abréviations

ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydriques
DHW	Direction de l'hydraulique de la Wilaya
CE	Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
ETP	Evapotranspiration potentielle (mm)
ETR	Evapotranspiration Réelle (mm)
I	Infiltration de l'eau dans le sol (mm)
P	Précipitations (mm)
Q_s	Débit d'écoulement de surface (l/s)
Q_w	Débit d'écoulement souterrain (l/s)
R	Ruissèlement (mm)
s	Rabattements en (m)
RFU	Réserve Facilement Utilisable (mm)
T	Température ($^{\circ}\text{C}$)
DA	Déficit agricole
EX	Excédent en eau du sol (mm)

Annexes

Tables ou systèmes de cotation numérique

<i>Profondeur</i>	
<i>Classe (m)</i>	<i>Note</i>
0 – 1.5	10
1.5 – 4.5	9
4.5 - 9	7
9.0 – 15.0	5
15 - 23	3
23 - 30	2
> 30	1

<i>Recharge annuelle</i>	
<i>Classe (mm)</i>	<i>Note</i>
0 - 50	1
50 - 100	3
100 - 175	6
175 - 225	8
> 225	9

<i>Perméabilité</i>	
<i>Plage de la perméabilité (en m/s)</i>	<i>Note</i>
$4.7*10^{-7} - 4.7*10^{-5}$	1
$4.7*10^{-5} - 14.7*10^{-5}$	2
$14.7*10^{-5} - 32.9*10^{-5}$	4
$32.9*10^{-5} - 4.7*10^{-4}$	6
$4.7*10^{-4} - 9.4*10^{-4}$	8
$> 9.4*10^{-4}$	10

<i>Impacte de la zone non saturée</i>		
<i>Nature lithologique</i>	<i>Note</i>	<i>Note typique</i>
Silt et argile	2 à 6	3
Shale	2 à 6	3
Calcaire	2 à 5	3
Grès	2 à 7	6
Sable et gravier avec passage silt et argile	4 à 8	6
Sable et gravier	4 à 8	8
Basalte	2 à 10	9
Calcaire Karstique	8 à 10	10

<i>Type de sol</i>	
<i>Classe</i>	<i>Note</i>
Mince ou absent	10
Graviers	10
Sables	9
Limons sableux	6
Limons	4
Limons silt eux	3
Argiles	1

<i>Topographie</i>	
<i>Plage de la pente (en degré)</i>	<i>classe</i>
0 à 2	10
2 à 6	9
6 à 12	5
12 à 18	3
> 18	1

<i>Milieux Aquifère</i>		
Classe	Note	Note typique
Massive shale	1 à 3	2
Métamorphique	2 à 5	3
Métamorphique Altéré – grès	3 à 5	6
Calcaire massif	4 à 9	8
Grès massif	4 à 9	6
Sable et gravier	4 à 9	8
Basalte	2 à 10	9
Calcaire Karstique	9 à 10	10

