

N° d'ordre

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université d'Oran

Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire

Département des Sciences de la Terre

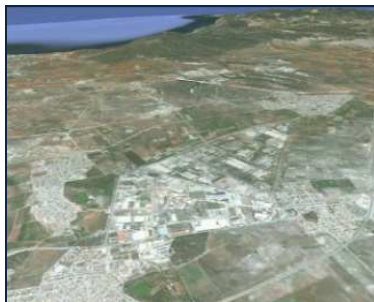
Mémoire

Présenté pour l'obtention du grade de Magister en Sciences de la Terre

Option : **Hydrogéologie**

Thème :

***Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines
en contexte industriel : cas de la zone de Hassi Ameer
(région d'Oran - Algérie)***



Présenté par
BOUBKERI Mustapha

Soutenu le 09 octobre 2013, devant le jury composé de :

M. MANSOUR Hamidi
M. HASSANI Moulay Idriss
Mme. ZAIDI-MEBROUK Naima
M. HAYANE Sidi Mohamed
M. BOUDJEMLINE Djamel

Professeur
Professeur
M.C.A
M.C.A
M.C.A

Université d'Oran
Université d'Oran
Université d'Oran
Université d'Oran
USTO-MB, Oran

Président
Encadreur
Co-encadreur
Examineur
Examineur

Oran, 2013.

Résumé :

L'industrie à travers la diversité de ses différentes branches joue un rôle important dans toute économie nationale. Cependant, les activités industrielles génèrent des rejets liquides, solides et gazeux qui peuvent être à l'origine de la dégradation des milieux, en particulier les eaux souterraines, entraînant ainsi de lourdes conséquences environnementales, sanitaires et socio-économiques.

Une bonne caractérisation des pollutions affectant les zones à forte concentration industrielle permet une bonne appréciation du degré de vulnérabilité des milieux naturels, particulièrement les eaux souterraines.

Cette démarche a été entreprise dans le cas de la zone industrielle de Hassi Ameur. Cette zone industrielle occupe la majeure partie de la plaine de Sidi Ali qui s'étend dans la partie occidentale du "plateau des Hassis", à l'Est de la ville d'Oran. Un ensemble "Astien-Calabrien", parfois indifférencié, formé de grès astiens surmontés de grès lumachelliques et grès jaunes du "Calabrien", constitue le principal réservoir aquifère de la région. Cet ensemble aquifère est fortement susceptible d'être affecté par les activités industrielles en surface.

L'appréciation du degré de vulnérabilité des eaux souterraines locales s'est basée sur une bonne compréhension du contexte hydrodynamique de la zone basée entre autres sur l'établissement d'une campagne de mesures piézométriques. Parallèlement, le prélèvement et l'analyse des eaux au niveau des puits et forages du secteur ont permis de caractériser les principaux paramètres physico-chimiques, aussi bien ceux se rapportant aux éléments majeurs et aux éléments indicateurs de pollution qu'aux éléments en trace (métaux lourds).

L'évaluation du degré de vulnérabilité à la pollution du secteur étudié s'est basé en grande partie sur une restitution sous forme cartographique par utilisation d'une méthode adaptée à cela, à savoir la méthode à notation numérique et à système de classement : "G.O.D" (Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater table).

Mots clés : eau souterraine, industrie, pollution, carte de vulnérabilité, GOD.

المخلص:

تلعب الصناعة من خلال تنوع فروعها المختلفة دورا هاما في أي اقتصاد وطني . ومع ذلك، فالأنشطة الصناعية توليد الغاز من النفايات الصلبة والسائلة، والتي يمكن أن تتسبب في تدهور البيئة، لا سيما المياه الجوفية، مسببة نتائج وخيمة، بيئية، صحية، واجتماعية اقتصادية.

وقد تم اتخاذ هذا النهج في حالة المنطقة الصناعية حاسي عامر . هذه المنطقة الصناعية تحتل الجزء الأكبر من هضبة سيدي علي التي تمتد في الجزء الغربي من "هضبة الحاسي" شرق مدينة وهران. مجموعة "استيان- كالابريان" غير متميزة في بعض الأحيان مشكلة من صخرة الحجر الرملي الستيني يعلوه الحجر الرملي الصديفي والحجر الرملي الأصفر الكالابرياني و الممثل لطبقة المياه الجوفية الرئيسية في المنطقة . مجموع طبقة المياه الجوفية هذه من المحتمل جدا أن تتأثر بالأنشطة الصناعية على السطح.

ويستند تقييم ضعف المياه الجوفية المحلية على فهم السياق الهيدروديناميكية يعتمد من بين أمور أخرى بشأن إنشاء حملة قياس مستويات المياه. وبالتوازي جمع وتحليل المياه في الآبار والحفر في القطاع سمحت بتوسيم العوامل الفيزيائية والكيميائية الرئيسية، فضلا عن تلك المتعلقة بالعناصر الرئيسية والمؤشرات عناصر التلوث والعناصر النزرة (المعادن الثقيلة).

واستند تقييم ضعف وتعرض الحجر الرملي للتلوث في منطقة الدراسة إلى حد كبير على العمل في شكل خريطة باستخدام أسلوب تكييفها إليها، وهي طريقة تصنيف العديدة ونظام الترتيب : "قود" (حدوث المياه الجوفية، والطبقة طبقة المياه الجوفية عموما، عمق المياه الجوفية).

الكلمات المفتاحية : ماء جوفي، صناعة ، تلوث، خريطة التعرض، قود.

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
Chapitre I : Situation et Présentation de la zone d'étude		
Figure 01	Localisation géographique du Plateau des Hassis	03
Figure 02	Localisation de la zone d'étude	04
Figure 03	Carte pluviométrique de la région correspondant à la période 1913-1963.	06
Figure 04	Précipitations moyennes mensuelles à la station d'Es-sénia (1990-2008)	07
Figure 05	Précipitations moyennes annuelles (1990-2008)	08
Figure 06	Températures moyennes mensuelles à la station d'Es-sénia (1990-2008)	09
Figure 07	Indice d'aridité de De Martonne (station d'Es sénia)	10
Figure 08	Log géologique synthétique de la région d'Oran	11
Figure 09	Carte géologique de l'Oranie Nord-Occidentale	14
Figure 10	Coupe géologique illustrant les formations anté et post-nappes autour du Djebel Khar	15
Figure 11	Log géologique du forage de l'ex. Oravio (couvoir)	17
Figure 12	Coupes des sondages SN1, SN2 et SN3 exécutés au sein de l'unité SIMAS	18
Figure 13	Coupe géologique des falaises d'Oran	19
Figure14	Schéma structurale de l'Oranie	20
Figure 15	Schéma illustrant la structure de la région d'étude	21
Figure 16	Ecorche géologique de la région de Gdyl	22
Figure 17	Log hydrogéologique général de la région	23
Figure 18	Carte piézométrique du secteur d'étude	26
Figure 19	Vue aérienne de la zone industrielle de Hassi Ameur (2012)	28
Figure 20	Plan parcellaire actuel de la zone industrielle de Hassi Ameur	29
Figure 21	L'occupation des sols actuelle dans la zone d'étude	31
Chapitre II : Contexte hydrochimique		
Figure 22	Carte de situation des points de prélèvement	37
Figure 23	Carte d'isovaleurs de minéralisation (mg/l) des eaux de secteur d'étude	41
Figure 24	Carte d'isoteneurs en calcium (Ca^{++}) (mg/l)	43
Figure 25	Carte d'isoteneurs en sodium (Na^+) (mg/l)	44
Figure 26	Carte d'isoteneurs en chlorures (Cl^-) (mg/l)	45
Figure 27	Carte d'isoteneurs en sulfates (SO_4^{--}) (mg/l)	46
Figure 28	Représentation graphique d'après le diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux échantillonnées (P1 à P8)	50
Figure 29	Représentation graphique d'après le diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux échantillonnées (P9 à P15)	51

Figure 30	Représentation graphique d'après le diagramme de Piper des eaux échantillonnées (P1 à P8)	52
Figure 31	Représentation graphique d'après le diagramme de Piper des eaux échantillonnées (P9 à P15)	53
Figure 32	Variations d'Is de saturation	56
Figure 33	Histogramme des valeurs propres	61
Figure 34	Cercle de corrélation : axes 1 et 2	62
Figure 35	Répartition des variables et des individus dans le plan formé par les axes F1 et F2	66
Figure 36	Dendrogramme complet visualisant le regroupement progressif des objets	69
Figure 37	Dendrogramme tronqué	70
Figure 38	Représentation sur le diagramme de Riverside	75
	Chapitre III : Pollution des eaux souterraines	
Figure 39	Schéma résumant les différentes causes de la pollution urbaine	79
Figure 40	Pollution agricole	80
Figure 41	Schéma illustrant la pollution d'origine industrielle	80
Figure 42	Carte d teneurs en nitrates (mg/l)	94
Figure 43	Histogramme illustrant les variations des teneurs en nitrites (NO ₂) dans les points d'eau étudiées	95
Figure 44	Carte de teneurs en Manganèse (mg/l)	98
Figure 45	Carte des teneurs en Sélénium (mg/l)	99
Figure 46	Dendrogramme complet de regroupement des individus pour les éléments organiques	101
Figure 47	Dendrogramme complet de regroupement des individus pour les métaux lourds	103
Figure 48	a. Dendrogramme complet b. Dendrogramme de regroupement des individus pour l'analyse globale	106
	Chapitre IV : Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution	
Figure 49	Méthode GOD pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la contamination	118
Figure 50	Schéma illustrative de la zone vadose (zone non saturée)	120
Figure 51	Les étapes d'élaboration de la carte G.O.D	123
Figure 52	Carte indicielle du paramètre "type d'aquifère " (G) dans le secteur d'étude	124
Figure 53	Carte indicielle du paramètre "impact de la zone vadose" (O) dans le secteur d'étude.	125
Figure 54	Carte indicielle du paramètre "profondeur" (D) dans le secteur d'étude	126
Figure 55	Carte de vulnérabilité à la pollution de la région de Hassi Ameer, établie par la méthode GOD	127

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
	Chapitre I : Situation et Présentation de la zone d'étude	
Tableau 01	Coordonnés de la station climatologique d'Es-sénia	05
Tableau 02	Précipitations moyennes mensuelles pour la période 1990-2008	06
Tableau 03	Variabilité des précipitations annuelles à la station d'Es-sénia (1990-2008).	07
Tableau 04	Températures moyennes mensuelles à la station d'Es-sénia, période : 1990-2008	08
Tableau 05	Classification des climats proposée par De Martonne	10
Tableau 06	Les données piézométriques des points d'eau	25
Tableau 07	Résultats de mesures de perméabilité des niveaux aquifères du plateau Oran-Bir El Djir	27
	Chapitre II : Hydrochimie	
Tableau 08	Présentation des résultats de l'analyse physico-chimique des eaux	38
Tableau 09	Les valeurs de l'erreur sur chaque analyse	41
Tableau 10	Les classes des eaux selon la dureté	46
Tableau 11	Valeurs de TH et du TAC calculés	47
Tableau 12	Résultats des analyses chimiques en r (meq/l)	48
Tableau 13	Faciès caractéristiques des échantillons prélevés	49
Tableau 14	Indices de saturations des eaux de la zone d'étude	55
Tableau 15	Les valeurs des indices d'échange de base des différents points d'eau	57
Tableau 16	Calcul des moyennes et des écarts -types de la série	58
Tableau 17	Matrice de corrélation des éléments chimiques	59
Tableau 18	Valeurs propres et pourcentage de la variance expliquée par les axes principaux	60
Tableau 19	Vecteurs propres (coefficient des variables centrées réduites dans l'équation linéaire des axes principaux)	61
Tableau 20	Etude des variables	63
Tableau 21	Etude des individus	64
Tableau 22	Les classes des objets (individus)	70
Tableau 23	Comparaison des résultats obtenus par ACP et CAH	71
Tableau 24	Résultats des valeurs de SAR	73
Tableau 25	Classes d'alcalinité selon U.S.S.L	73
	Chapitre III : Pollution des eaux souterraines	
Tableau 26	Les différentes sources de métaux lourds.	89

Tableau 27	Résultats d'analyse des éléments indicateurs de pollution	92
Tableau 28	Seuils de classes de qualité pour les nitrates	93
Tableau 29	Matrice de corrélation des éléments organiques indicateurs de pollution	101
Tableau 30	Matrice de corrélation des métaux lourds	102
Tableau 31	Matrice de corrélation globale	105
	Chapitre IV : Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution	
Tableau 32	Critères de vulnérabilité intrinsèque	113
Tableau 33	Les méthodes de cartographie de la vulnérabilité	114
	Annexes	
Annexe 04	les types d'activités industrielles dans la zone industrielle de Hassi Aneur (1971-1983).	
Annexe 05	Répartition des unités selon le type d'activité en 2005	
Annexe 06	Les activités industrielles dans la zone industrielle de Hassi Aneur (SGI, 2009)	
Annexe 07	Résultats des analyses (ANRH, 2012).	
Annexe 08	Résultats des analyses des prélèvements hors la campagne de prélèvement (24/25 février 2012).	
Annexe 09	Normes des paramètres organoleptiques (OMS).	
Annexe 10	Normes des paramètres physico-chimiques (OMS)	
Annexe 11	Les substances indésirables ou toxiques (OMS)	

AVANT-PROPOS

Un très grand merci à **ALLAH** qui est toujours présent avec moi dans le bonheur et dans le pire. Au terme de ce travail, il m'est très agréable de remercier tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire.

Mes remerciements vont tout d'abord à mon encadreur, Monsieur **Hassani Moulay Idriss**, Professeur à l'Université d'Oran, qui m'a proposé ce sujet. Qu'il trouve en ces quelques mots toutes mes reconnaissances et ma gratitude, pour son assistance, ses conseils et sa compréhension, son efficacité et sa disponibilité dans les moments de doute et d'incertitude au cours de ce travail. Je salue son esprit critique et encouragements qui m'ont permis de mener ce travail à terme.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon Co-encadreur, Madame **Zaidi-Mebrouk Naima**, Maître de conférences A à l'Université d'Oran,

Un grand remerciement à Monsieur **Mansour Hamidi**, Professeur à l'Université d'Oran, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury. Je le remercie également pour ses discussions utiles et fructueuses et ses conseils précieux.

Mes remerciements vont également à Monsieur **Hayane Sidi Mohamed**, Maître de conférences A à l'Université d'Oran pour avoir accepté de juger ce mémoire et m'a enseigné durant mes études de graduation et de magister.

Je remercie vivement Monsieur **Boudjemline Djamel**, Maître de Conférences A à l'USTO – MB- pour avoir accepté de juger ce travail.

Mes vifs remerciements vont également à Messieurs Foukrache M., Khenafou M., Baiche M., Mahammed Dj., Mme. María del Mar Socías Viciano et Ait Sidhoum D. pour leurs conseils, leurs aides et leurs encouragements.

Mes remerciements aussi à M. A Dehni du CTS et à toutes les personnes de l'ANRH/Oran, en particulier M. Mahi, Directeur du laboratoire d'hydrochimie, aux personnes de l'ABH/Oran, de la DPME, de l'ONM, en particulier M. Tahraoui, et aux personnes du LTPO, pour leurs aides.

Ma vive gratitude et mes remerciements s'adressent également à mes collègues en post-graduation : Adda, Belaeredj, Bouchenouk, Chenafi, Mansour, Draoui, Brahim, Zeghari, Mahfoud, Mahdjoub, Tadjeddine, Aissaoui, Bengasmia, Drissi et Baali (U. Tlemcen).

J'exprime aussi mes remerciements à tous mes collègues géologues et mes amis et mes frères des cités universitaires (en particulier C1, C2 et C5), pour leurs amitiés, aides précieuses et leurs soutiens moraux. Je ne pourrais oublier de remercier les membres de ma famille **BOUBKERI**, partout où ils se trouvent.

*A tous merci
M. Boubkeri.*

Introduction générale

Les eaux souterraines représentent une importante ressource exploitée pour la consommation humaine et pour l'utilisation dans les domaines agricoles et industriels. Ces eaux sont néanmoins souvent menacées par la contamination par des polluants de multiples sources et natures : biologique, chimique ou physique. Plus particulièrement, les activités industrielles, à travers la diversité de leurs différentes branches d'activité et des polluants qu'elles génèrent constituent une source importante de dégradation des eaux souterraines. A cet effet, la caractérisation des principaux paramètres hydrochimique des eaux souterraines situées au droit des zones à forte concentration industrielle constitue le moyen essentiel en vue de l'appréciation de leur degré de vulnérabilité vis-à-vis de pollutions de surface. C'est cette démarche qui sera entreprise dans le cas de la zone industrielle de Hassi Ameer. Cette zone industrielle occupe la majeure partie de la plaine de Sidi Ali qui s'étend dans la partie occidentale du "plateau des Hassis", à l'Est de la ville d'Oran. Un ensemble "Astien-Calabrien", parfois indifférencié, formé de grès astiens surmontés de grès lumachelliques et grès jaunes du "Calabrien", constitue le principal aquifère de la région. Cet ensemble aquifère, de nature libre, est fortement susceptible d'être affecté par les activités industrielles en surface.

La caractérisation de l'état physico-chimique et qualitatif des eaux de la nappe phréatique de ce secteur ciblera en particulier les éléments qui peuvent être de bons indicateurs de pollution (éléments nutritifs, métaux lourds, etc.). En deuxième étape, l'établissement d'une carte de vulnérabilité à la pollution du secteur étudié se basera sur le choix et l'application d'une méthode adaptée de cartographie de la vulnérabilité. Le recours aux systèmes d'information géographique (SIG) permettra une mise en œuvre rapide et précise de cette cartographie.

Plus en détail, le plan de ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre vise la présentation générale de la zone d'étude, en abordant d'une part les caractéristiques morphologiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques de cette zone et d'autre part une présentation de la zone industrielle de Hassi Ameer.

Le deuxième chapitre, a été consacré à l'étude hydrochimique. Ce chapitre portera sur les résultats des différentes analyses chimiques. L'interprétation des données permettra

de discuter la détermination des faciès, l'origine de la minéralisation et d'apprécier la qualité des eaux (potabilité et aptitude à l'irrigation).

Le troisième chapitre est réservé à l'état qualitatif des eaux souterraines du secteur d'étude à travers l'étude des paramètres indicateurs de pollution.

Dans le quatrième chapitre, nous abordons les différentes notions de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution et évaluons cette vulnérabilité des eaux de la nappe par application d'une méthode, à cotation numérique et plus spécialement à système de classement (rating system-RS). Cette méthode, "G.O.D", est basée sur trois critères facilement évaluables :

- Type de nappe (Groundwater occurrence).
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class).
- Profondeur de la nappe (Depth to groundwater table).

I.1. Cadre géographique :

Le secteur faisant l'objet de cette étude fait partie de la plaine de Sidi Ali qui occupe la partie occidentale du Plateau des Hassis. Ce dernier couvre une superficie de 400 km². Il est orienté WSW – ENE, selon la direction tellienne (fig. n° 01). Il est bordé :

- au Nord, par le Djebel Khar et les Monts d'Arzew,
- à l'Est, par la dépression de Telamine,
- au Sud, par les vallonnements du Djebel Debbi (reliefs s'étendant d'El Kerma à Boufatis),
- à l'Ouest, les bordures du plateau sont imprécises, traduisant une certaine continuité de fait avec le plateau d'Oran-Bir El Djir.

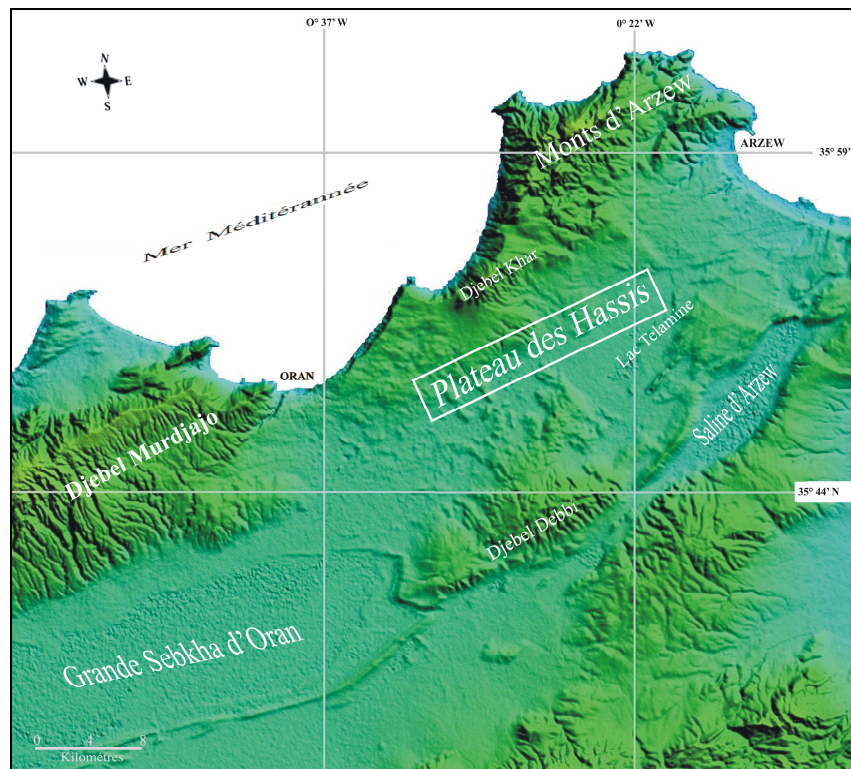


Figure n° 01 : Localisation géographique du Plateau des Hassis.

Plus précisément, le secteur d'étude concerne de fait la zone industrielle de Hassi Ameur et ses alentours : zones agricoles et urbaines qui occupent la partie Nord-Ouest de la plaine de Sidi Ali.

Ce secteur est situé à environ 11 km à l'Est de la ville d'Oran. Il longe la route nationale RN 11 Oran/Arzew. Il est limité : (fig. n° 2)

- au Nord-Est, par l'agglomération de Hassi Ben Okba,
- au Nord et au Nord-Ouest, par les collines de Hassi Ben Okba,

- au Sud-Est, par l'agglomération de Hassi Ameer,
- à l'Ouest et au Sud-Ouest, par les agglomérations de Douar Kharrouba et de Hassi Bounif.

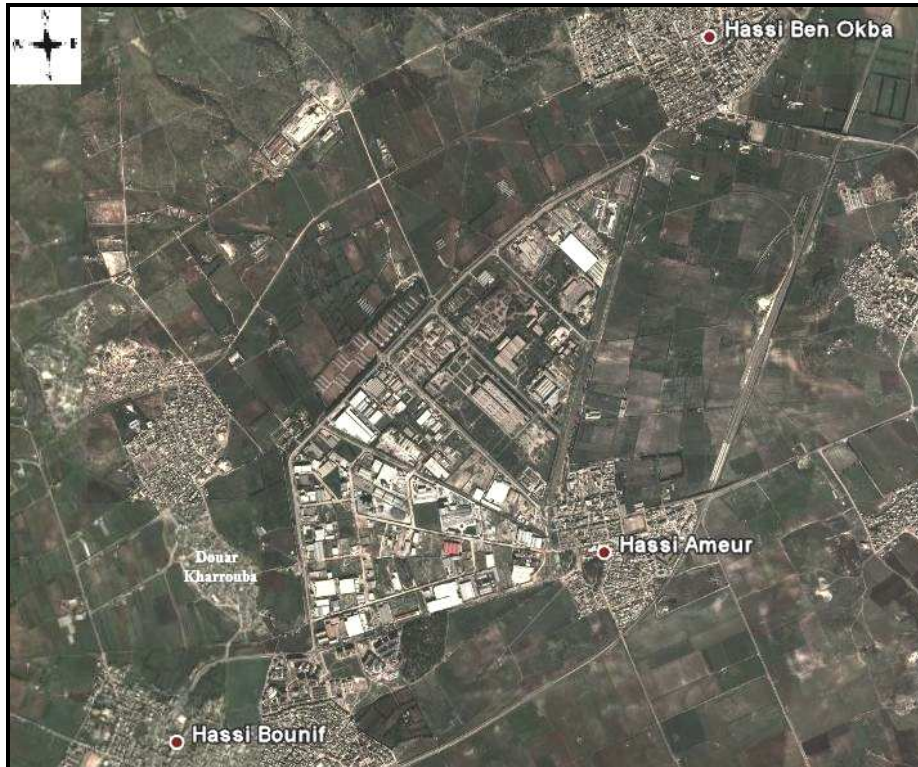


Figure n° 02 : Localisation de la zone d'étude (Google Earth, février 2013).

I.2. Contexte physique de la région d'étude :

I.2.1 Aspects morpho structuraux :

I.2.1.1. Contexte topographique :

La plaine de Sidi Ali fait partie d'une série de cuvettes topographiques bien marquées dans le paysage du plateau des Hassis. Les reliefs qui dominent la plaine de Sidi Ali sont :

- au Nord-Ouest, les collines de Hassi Ben Okba qui prolongent le piémont méridional du Djebel Khar dont le point culminant atteint 611 m,
- à l'Est, les collines de Koudiat Er Reha aux altitudes inférieures à 150 mètres,
- à l'Ouest, les collines de Hassi Bounif-Douar Kharrouba,
- au Sud, la chaîne de collines s'étendant entre El Braya et Hassian Ettoual ne dépassant pas 325 mètres d'altitude.

I.2.1.2. Le réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique du secteur de la plaine de Sidi Ali est restreint. Les reliefs de la partie Nord/Nord-Ouest de la plaine ont permis le développement d'un chevelu

hydrographique très réduit, peu dense et faiblement organisé : trois ou quatre chaâbets importantes (Chaabet El Houari, Chaabet El Ma, etc.) dévalent des reliefs de la forêt de Hassi Ben Okba vers la plaine, où les eaux de ruissellement viennent se perdre, à la faveur du fort amortissement de la pente, au niveau des glacis d'accumulation. L'écoulement est intermittent, animé par des crues, parfois brutales, lors de la saison pluviale,

I.2.2. Cadre climatique :

Les conditions climatiques d'une région jouent un rôle déterminant dans le comportement du régime des écoulements des principaux cours d'eaux superficielles et des eaux souterraines.

Dans le cadre de la présente étude, la climatologie a été étudiée, non pas pour établir un bilan hydrologique, mais uniquement pour illustrer et définir le type et l'influence de quelques paramètres climatiques, à savoir la pluviométrie et la température.

La caractérisation de ces paramètres est basée sur les données relatives de la station d'Es-sénia (tableau n° 01), pour la période 1990-2008. Cette station est choisie par rapport à sa proximité du secteur d'étude et au fait qu'elle soit de type professionnelle.

Tableau n° 01 : Coordonnées de la station climatologique d'Es-sénia.

Station	Altitude (m)	Longitude	Latitude
Es-sénia	90	00° 36' W	35° 38' N

I.2.2.1. Etude des précipitations :

Le régime pluvial en Algérie a été étudié par de nombreux auteurs: P. Seltzer (1913-1938), Chaumont et Paquin (1913-1963), etc.

La carte pluviométrique établie par Chaumont et Paquin (fig. n° 03) indique que le secteur est moyennement, arrosé avec des précipitations moyennes annuelles comprises majoritairement entre 300 et 500 mm.

La carte montre aussi que la hauteur pluviométrique est contrôlée par l'altitude et l'éloignement à la mer ; Boufatis : 358 mm, Es-sénia : 398 mm, Gdyel : 516 mm.

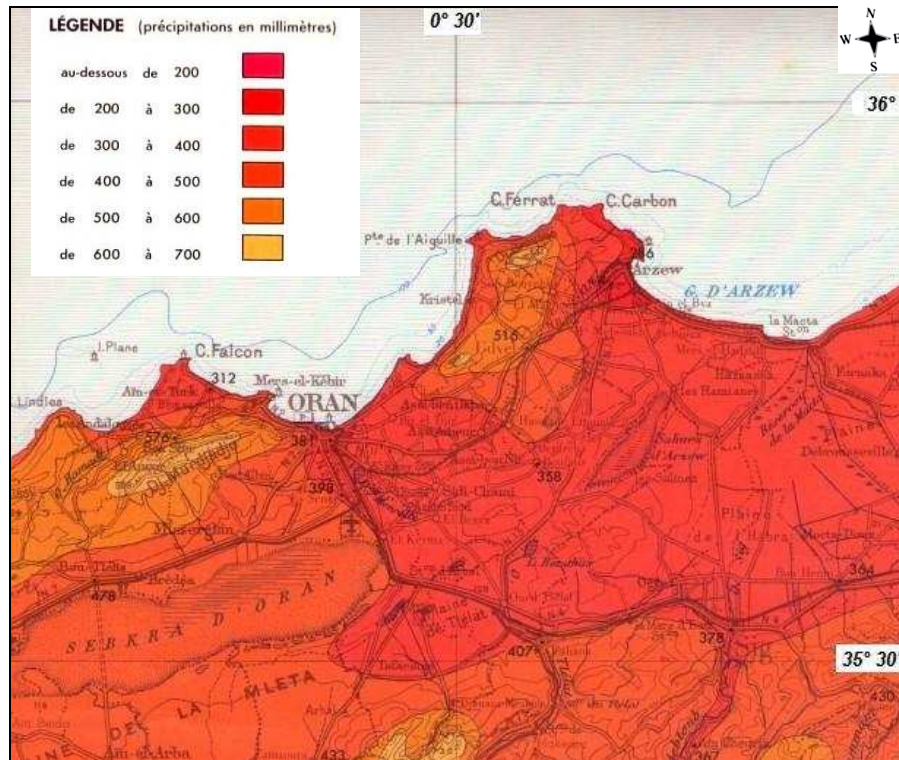


Figure n° 03 : Carte pluviométrique de la région correspondant à la période 1913-1963 (Chaumont M. et Paquin C., 1971).

a. Précipitations moyennes mensuelles :

Les précipitations moyennes mensuelles de la station d’Es-sénia sur la période 1990-2008 sont présentées sur le tableau n° 02.

Tableau n° 02 : Précipitations moyennes mensuelles pour la période 1990-2008 (données O.N.M).

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
P (mm)	38	45	30	25	16	2.5	0.5	2.9	18	33	62	50	325

Le graphe des précipitations moyennes mensuelles (fig. n° 04) distingue deux périodes ; l’une aride, de mai à septembre, l’autre pluviale, d’octobre à avril.

La quantité maximale de précipitations est de près de 62 mm au mois de novembre. Le minimum est enregistré au mois de juillet (0,5 mm).

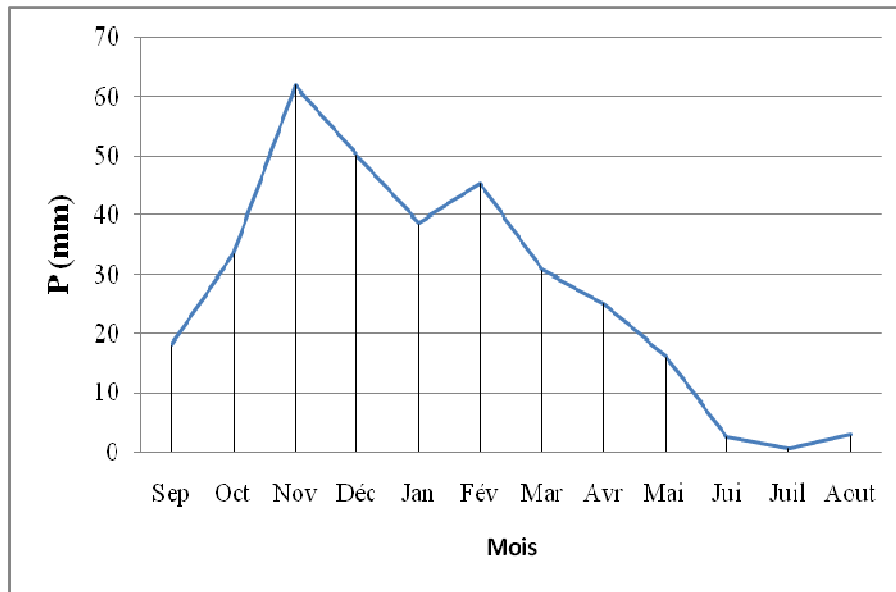


Figure n° 04 : Précipitations moyennes mensuelles à la station d'Es-sénia (1990-2008).

b. Précipitations annuelles :

Durant la période 1990-2008, les précipitations moyennes annuelles ont connu une baisse significative relativement à la période 1913-1963. Le module pluviométrique moyen annuel de la nouvelle période a égalé à 325 mm (Tableaux n° 2 et 3), au lieu des 398 mm de la période précédente.

Tableau n° 03 : Variabilité des précipitations annuelles à la station d'Es-sénia (1990-2008).

Années	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Moy. annuelle
P (mm)	405	234	441	313	318	313	193	205	280	294	375	415	318	313	285	337	320	362	459	325

D'après le graphe obtenu (fig. n° 05), nous constatons une variabilité interannuelle marquée durant la période 1990-2008, avec un maximum enregistré en 2008 (459 mm) et un minimum de 193 mm en 1996.

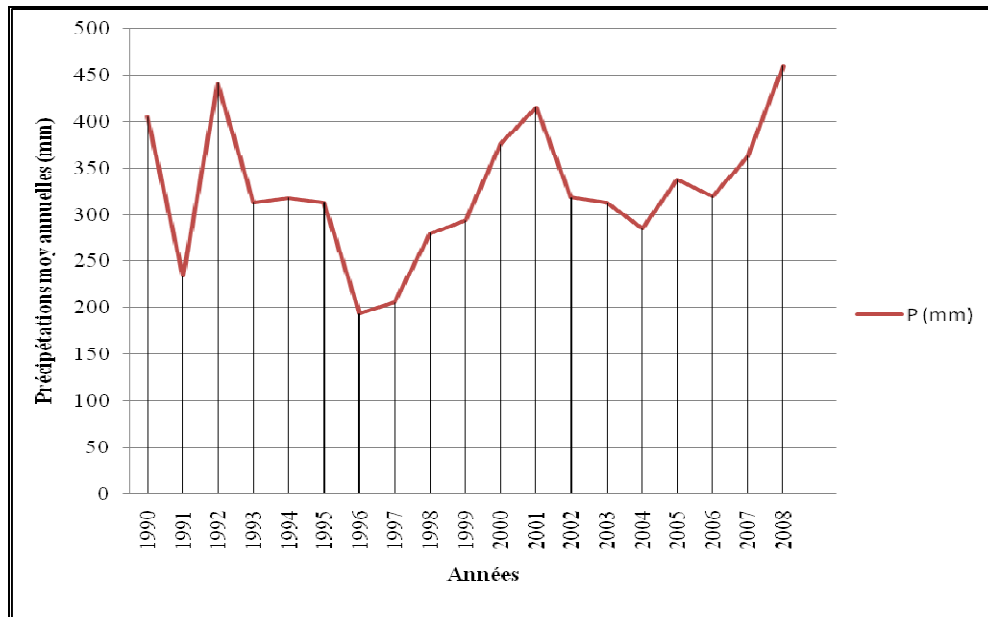


Figure n° 05 : Précipitations moyennes annuelles (1990-2008).

Les précipitations sont caractérisées par leur irrégularité et leur forte intensité.

I.2.2.2. Etude de la température :

La température est le paramètre climatique qui influe directement sur l'évaporation, la pression, le vent et l'humidité.

a. Les températures moyennes mensuelles et annuelles :

Les données des températures moyennes mensuelles, sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° 04 : Températures moyennes mensuelles à la station d'Es-sénia, période : 1990-2008, (données O.N.M).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	An.
T° moyenne °C.	12.93	13.54	15.02	16.65	19.49	22.57	25.28	26.31	24.26	20.74	16.62	14.24	18.97

La température moyenne mensuelle la plus faible est enregistrée au mois de janvier (12.93 °C), et la plus élevée en août (26.31 °C). La température moyenne annuelle étant de 18.97 °C.

Le graphe de la figure n° 06 indique que la période froide (< 17°C) débute au mois de novembre et se termine en avril, alors que la période chaude commence au mois de mai et finit en octobre.

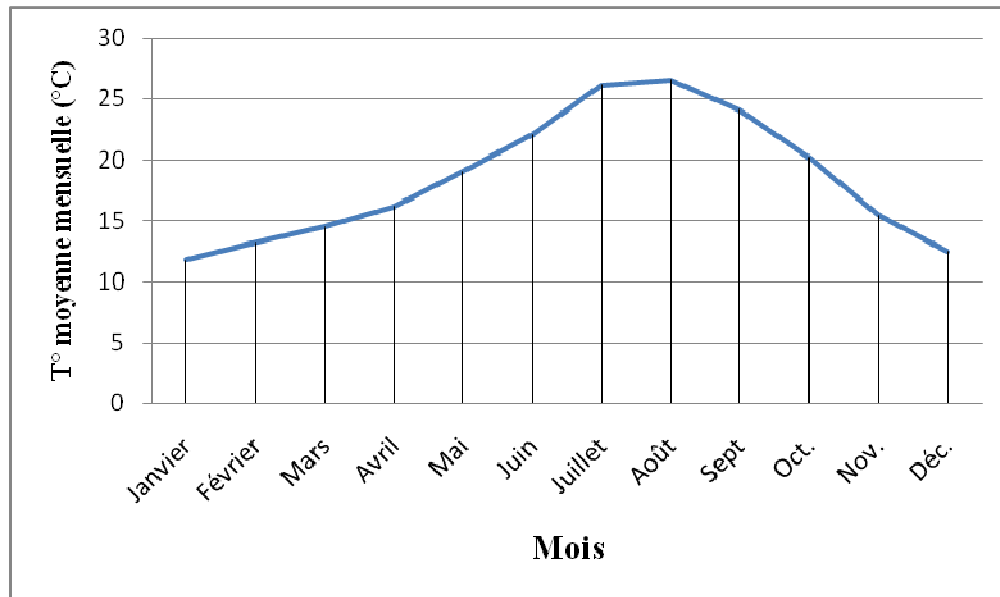


Figure n° 06 : Températures moyennes mensuelles à la station d'Es-sénia (1990-2008).

I.2.2.3. Climat de la région :

De nombreux auteurs se sont préoccupés de synthétiser les données climatiques en recherchant une classification des types de climats qui puissent rendre compte au mieux des éléments du bilan hydrologique.

Les nombreuses classifications proposées se basent le plus souvent sur le calcul d'un indice climatique tenant compte de la pluviométrie et de la température.

Plusieurs formules empiriques permettent d'obtenir les indices climatiques, parmi elles :

- l'indice xéothermique de Bagnouls et Gaussen,
- l'indice d'aridité de De Martonne,
- l'indice de continentalité de Kerner "K".

Nous appliquerons dans la présente étude celle proposée par De Martonne.

L'indice d'aridité de De Martonne tient compte de la température moyenne annuelle (T en °C) et de la pluviométrie annuelle (P en mm). Il est donné par la relation suivante :

$$I = P/T + 10$$

Avec : P = précipitation annuelle moyenne (mm).

T = température annuelle moyenne.

La classification proposée par De Martonne est la suivante (tableau n° 05) :

Tableau n° 05 : Classification des climats proposée par De Martonne.

Valeur de "I"	< 05	05 < I < 7.5	7.5 < I < 10	10 < I < 20	20 < I < 30
Type de climat	hyperaride	désertique	steppique	semi aride	tempéré

Appliqué à la station d'Es-sénia, l'indice "I" = $325/10 + 18.97$

$$I = 11.42$$

Après calcul de l'indice d'aridité et d'après les résultats obtenus (fig. n°07), le climat de la région est classé comme climat semi-aride.

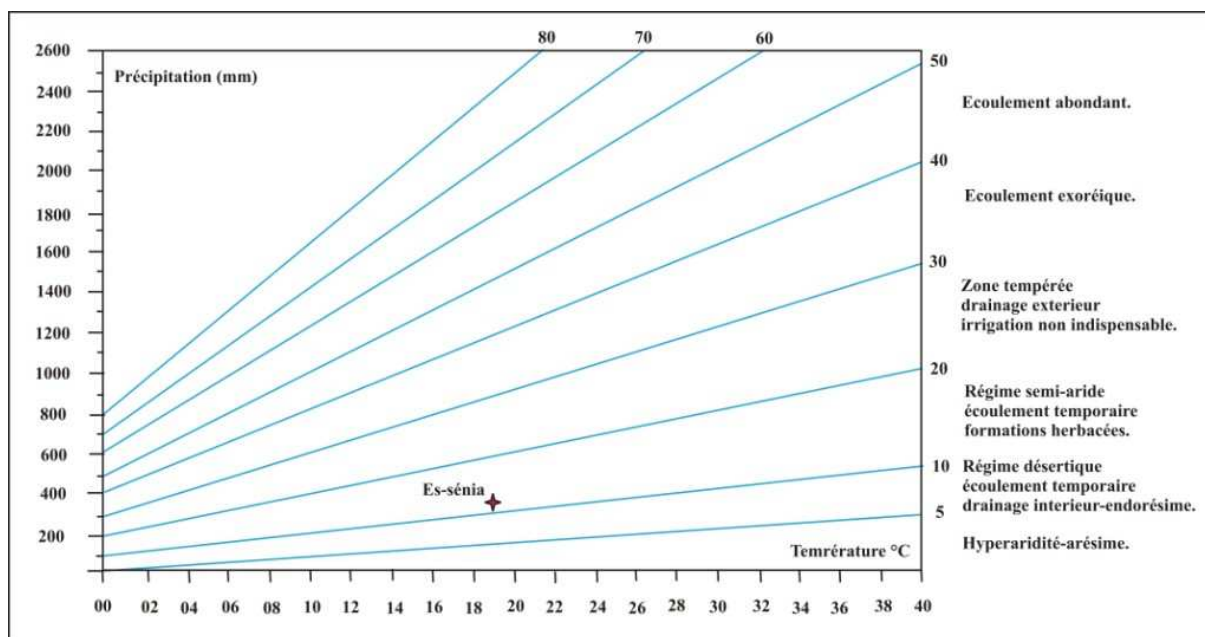


Figure n° 07 : Indice d'aridité de De Martonne (station d'Es sénia).

I.3.Cadre géologique :

I.3.1.Cadre géologique général :

Le secteur d'étude est inclut dans le domaine géologique du Littoral Oranais qui intègre la zone externe ou tellienne de la chaîne alpine. Ce domaine s'allonge sur environ cent (100) kilomètres entre le Massif de Madagh, à l'Ouest, et les Monts d'Arzew à l'Est. Il s'étend sur une largeur moyenne d'environ vingt (20) kilomètres. Il comprend dans le sens de la longueur un groupe de horsts (Djebel Murdjadjo, Djebel Khar, Monts d'Arzew, etc.) constitués essentiellement de terrains d'âge secondaire. Ces horsts, très tectonisés, correspondent à un substratum (para-autochtone).

Ils sont bordés au sud par des zones déprimées (plateaux d'Oran, de Bir El Djir, des Hassis, etc.), comblées d'une importante sédimentation, constituée de terrains d'âges néogène et quaternaire.

De nombreux travaux effectués sur ce domaine, en particulier par F. Doumergue (1912), Tinthoin (1948), A. Perrodon (1957), A. Gourinard (1958), B. Fenet (1975), G. Thomas (1985), ont permis de distinguer deux grands ensembles structuraux, dont le premier est anté à synchro-nappe et le second est post-nappe. (Fig. n° 8).

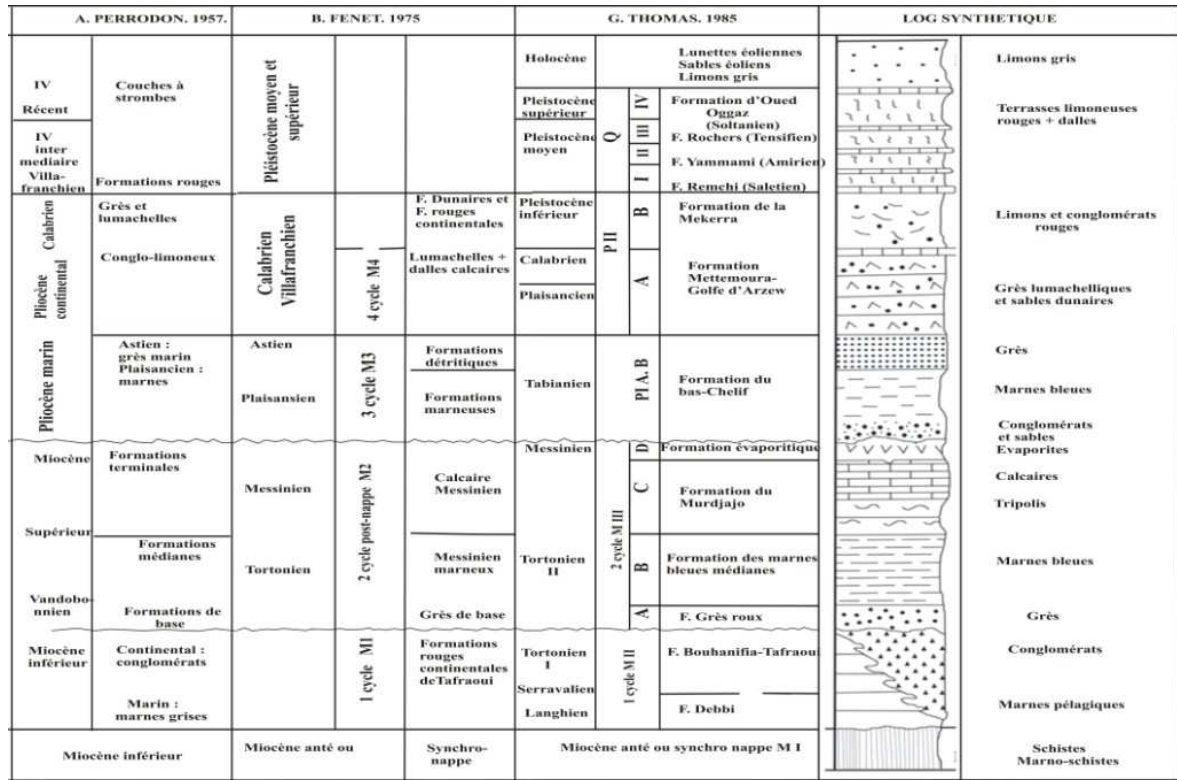


Figure n° 08 : Log géologique synthétique de la région d'Oran (Hassani M.I., 1987).

- Le substratum anté à synchro nappe :

Dans les massifs littoraux d'Oran, les formations du substratum forment l'autochtone relatif (B. Fenet, 1975) ou autochtone anté-nappe (G. Thomas, 1985). Ce substratum affleure dans le Djebel Murdjadjo, le Djebel Khar (Montagne des Lions) et dans les Monts d'Arzew, représenté par des massifs schisteux, autochtones, d'âge permo-triasique, jurassique et crétacé, fortement affectés par l'orogénèse alpine.

- Le remplissage (couverture) post-nappe :

Tandis que les unités telliennes achèvent de se mettre en place dans le bassin synchro-nappes sud tellien dans lequel la sédimentation marine se poursuit encore un certain temps, plus au Nord s'amorce un nouveau cycle sédimentaire. Il s'installe pendant que naissent et se développent des mouvements épigéniques qui découpent les régions

littorales en zones ascendantes ou subsidences (Y. Gourinard, 1957) : Horsts et fossés du littoral.

Ces phénomènes épirogéniques se poursuivent pendant toute la fin du Néogène puis le quaternaire et c'est sur une morphologie réglée presque exclusivement par les mouvements ascendants et descendants que vont succéder quatre cycles marins d'importance inégale, entrecoupés de périodes d'érosion. Ce sont :

- Le premier cycle miocène post-nappes (M1) :

Il début par des formations continentales non datées qui se déposent immédiatement après la mise en place des nappes sur les massifs littoraux (B. Fenet, 1975). Les dépôts continentaux sont constitués d'alternance de conglomérats et de marnes parfois gypseuses, bien développés sur les côtes. L'âge de ces formations du M1 est compris entre la transgression messinienne (P. Guardia et J. Magné, 1971) et la mise en place des nappes, il s'agit pour partie de Tortonien.

- Le deuxième cycle miocène post-nappes (M2) :

Il débute généralement dans le bassin du Chéelif par une importante série détritique grés-sableuse.

Il est constitué aussi par ;

- des formations médianes constituées de marnes bleues.
- des formations terminales, constituées par une série des tripolis et la série des gypses.

- Le troisième cycle post-nappes –pliocène- (P1) :

Dans le bassin du Bas Chéelif, le Pliocène est représenté par la succession classique des marnes bleutées "plaisanciennes" et des grès marins "astiens" puis continentaux.

- Le quatrième cycle post nappes (Calabrien) :

Ce cycle est d'abord lumachellique ou conglomératique passe progressivement à des grès dunaires et représentent le dernier épisode marin de quelque importance sur le littoral Oranais.

I.3.2. Lithostratigraphie de la région étudiée :

La région d'étude est caractérisée par un plateau incliné NW-SE d'où émergent deux massifs constitués de terrains d'âge secondaire (fig. n° 09).

La description géologique de la région étudiée est basée sur :

- des informations de surface des différents faciès : cartes géologiques d'Oran et de Gdyl (ex. S^t. Cloud), au 1/50 000^{ème}. (Annexes n° 01 et 02)
- des informations fournies par un certain nombre de coupes géologiques, de forages, de sondages et de puits creusés à travers les différentes formations géologiques.

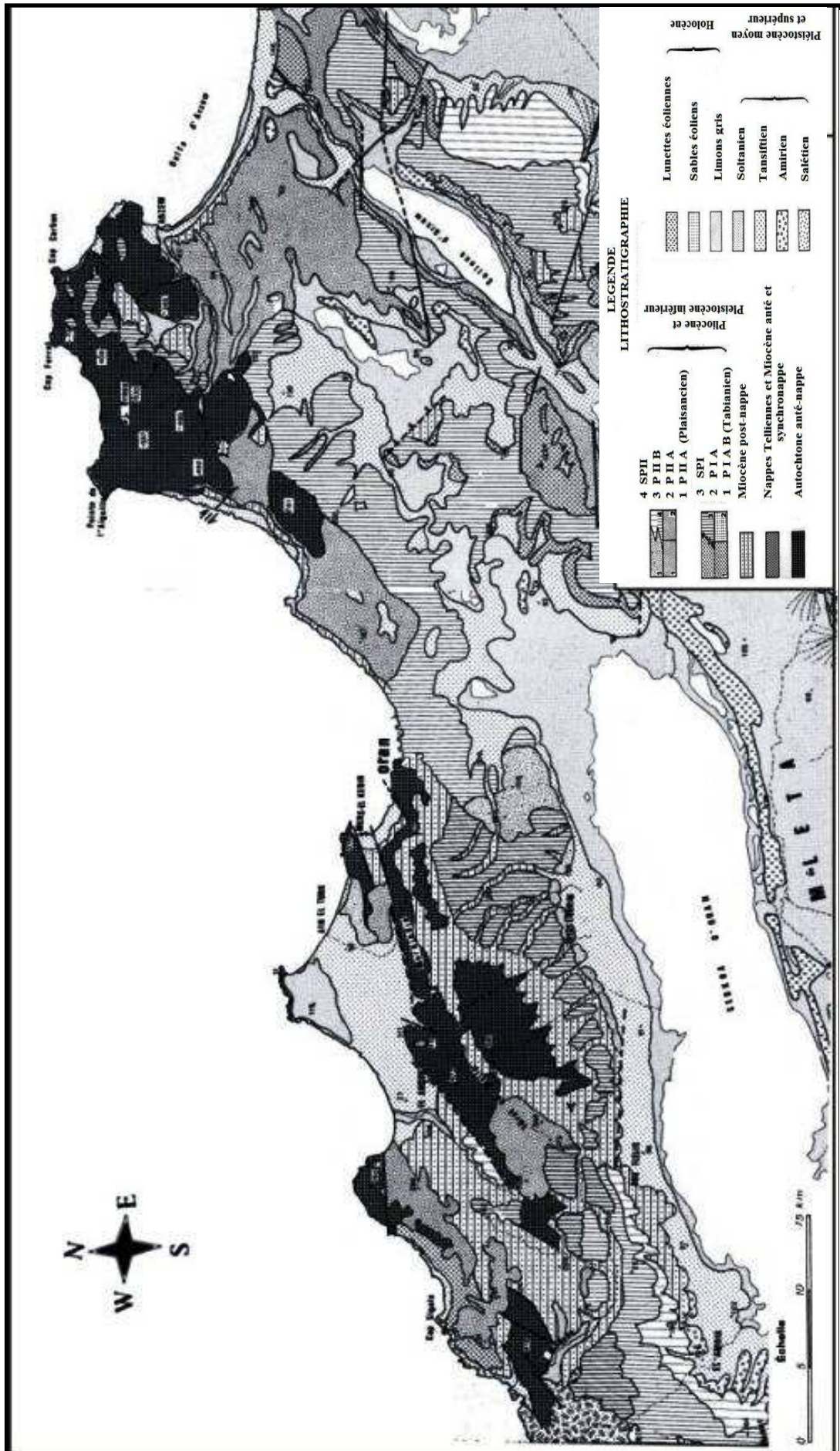


Figure n° 09 : Carte géologique de l'Oranie Nord-Occidentale (G. Thomas, 1985).

Du bas vers le haut, la succession litho-stratigraphique de la région est comme suit :

I.3.2.1. Les formations anté-nappes (fig. n° 10) :

I.3.2.1.1. Le Permo –Trias :

Il est constitué de schistes violacés à bancs de quartzites et de poudingues à débris de quartz. Ces facies n'affleurent qu'au Djebel Khar.

I.3.2.1.2. Le Jurassique :

Il est représenté par des calcaires dolomitiques du Lias qui constituent des affleurements peu importants au Nord-Ouest de Gdyl et par des schistes et grès ardoises, bruns rouges en surface, qui apparaissent en lambeaux sur le flanc sud du Djebel Khar, recouvrant les schistes et les poudingues permo-triasiques (B. Fenet, 1975).

I.3.2.1.3. Le Crétacé :

Il est représenté par des schistes plus ou moins calcaires au Nord-Ouest du Djebel Khar (Montagne des lions).

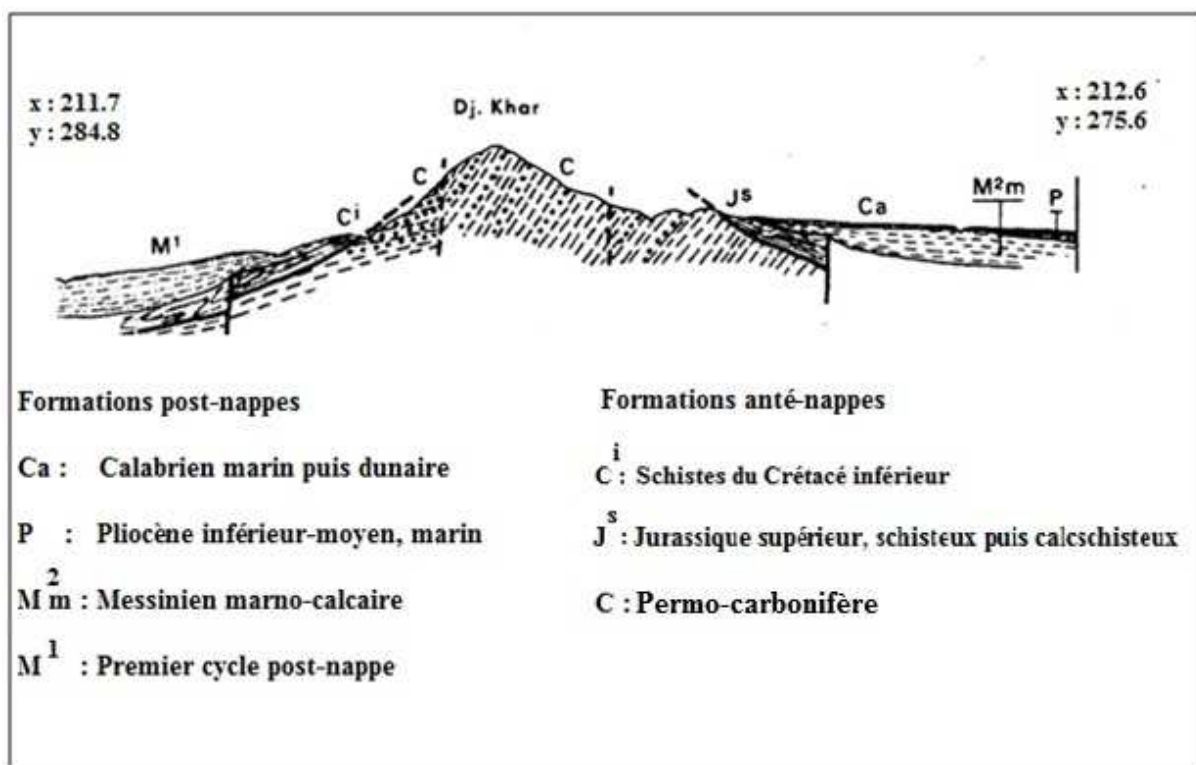


Figure n° 10 : Coupe géologique illustrant les formations anté et post-nappes autour du Djebel Khar (B. Fenet, 1975).

I.3.2.2. Les formations post–nappes :

I.3.2.2.1. Le Miocène :

Dans la région, les formations géologiques se rapportant au Miocène sont constituées de :

- marnes bleues,
- grès à Balanes et bivalves,
- tripolis et marnes à tripolis,
- intercalations de tripolis dans les marnes gypseuses,
- gypses, calcaires et marnes gypseuses.

Sur le flanc sud du Djebel Khar, le premier terme du Miocène supérieur transgressif, est constitué par des marnes bleues à verdâtres à grès micacées formant une dépression couverte de cultures au pied de du Djebel Khar. Elles affleurent aussi au Sud-ouest de la ferme du "domaine des lions". Les marnes bleues sont surmontées par les grès à balanes et bivalves qui affleurent aux falaises du Djebel Khar surmontées de marnes tendres, blanchâtres intercalés avec des bancs de tripolis et avec des niveaux micacés (à quelques passées gréseuses). Ces dernières formations affleurent aux ravins et fond des chaabets des collines de Hassi Ben Okba : Chaabet El Houari, Chaabet El Ma, etc.

Le dernier terme du Miocène supérieur est représenté au sud de Hassian Ettoual (ex : Fleurus). Là, pointent des affleurements de marnes gréseuses gypsifères et des bancs de gypse massif de plusieurs dizaines de mètres ; des marno-calcaires à tripoli formant des bancs de un à deux mètres d'épaisseur s'intercalent au sein de ces formations (Fenet B., 1975).

I.3.2.2.2. Le Pliocène :

Au sud du secteur, au niveau du Djebel Debbi, le Pliocène inférieur et moyen, marin, est affleurant et transgressif. La carte au 1/50 000^{ème} de Saint Cloud indique l'existence de ;

- Marnes pliocènes (Plaisancien) (**p^m**), constituées de formations marno-sableuses jaunes devenant plus franchement marneuses vers le bas. Elles apparaissent au cœur de l'anticlinal de Debbi et le sondage de Db1 les a traversées sous une épaisseur de soixante mètres (A. Perrodon, 1957).

- Grès pliocènes (**p^g**), marins à ciment calcaire (Astien), formés de bancs assez résistants qui se marquent bien dans la topographie. Les niveaux inférieurs, plus tendres,

sont très fossilifères. Cet horizon atteint une cinquantaine de mètres dans la partie Sud-Ouest de la feuille.

Cette formation est traversée par le forage de l'unité de l'ex. Oravio, située en bordure Nord -Ouest de la zone industrielle (fig. n° 11).

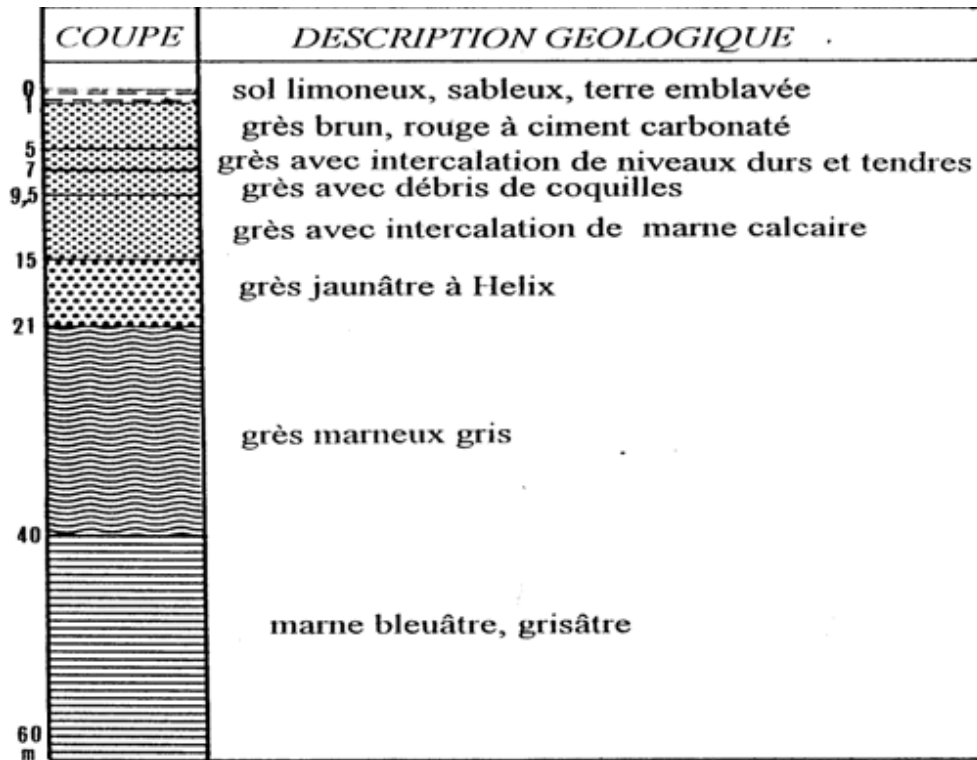


Figure n° 11 : Log géologique du forage de l'ex. Oravio (couvoir)
(X : 212.100, Y : 273.225).

I.3.2.2.3. Le Plio-Pléistocène "Calabrien" :

Au niveau du Plateau des Hassis, cette formation montre la présence de faciès gréseux associés à des fragments de calcaire ou marnes. Elle est constituée de grès coquilliers de couleur blanchâtre passant à une véritable lumachelle, très consolidée, attribuée au "Calabrien". Les sondages carottés SN1, SN2 et SN3 (< 10 m), situés à l'intérieur de l'unité SIMAS (ex. Sn Métal), ont présenté les logs suivants (fig. n° 12).

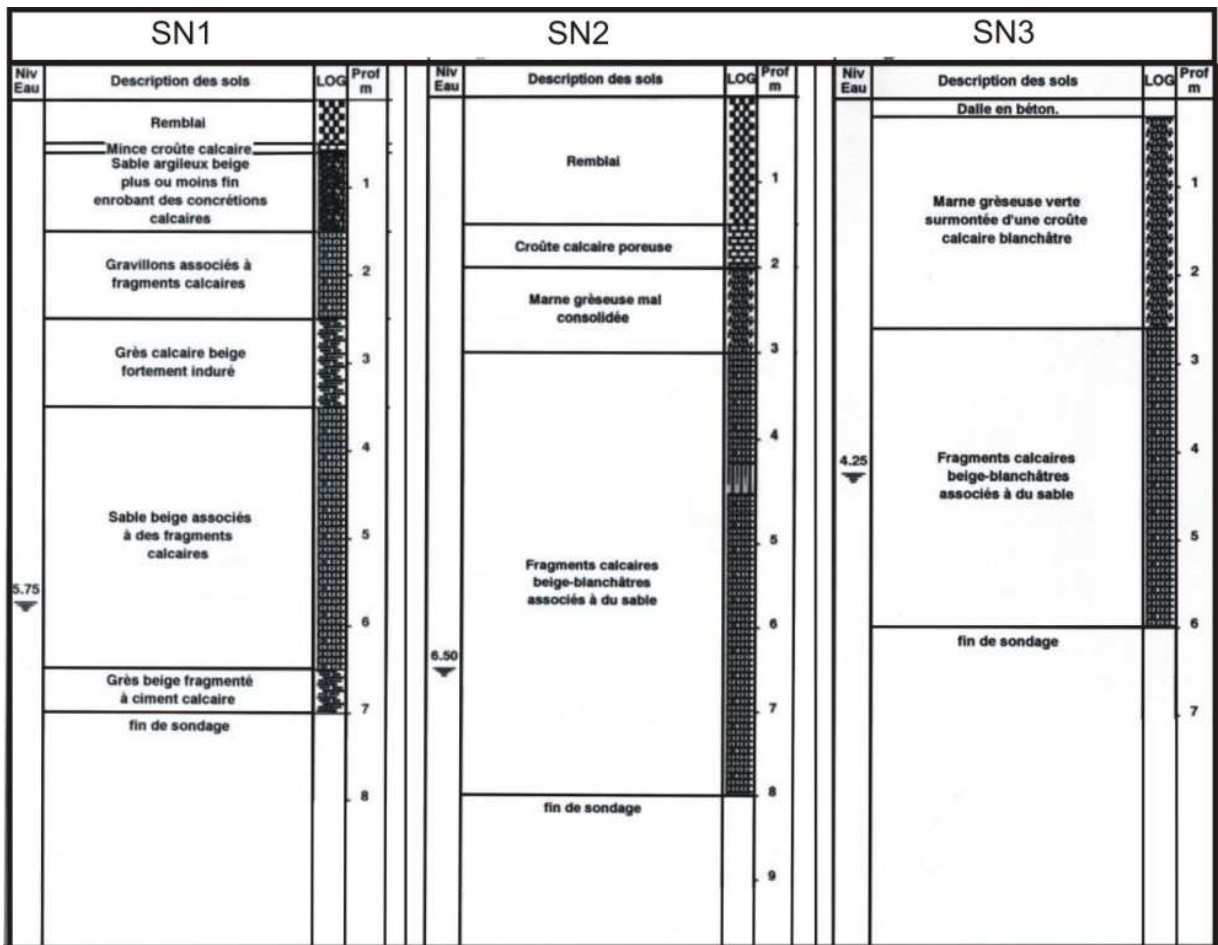


Figure n° 12 : Coupes des sondages SN1, SN2 et SN3 exécutés au sein de l'unité SIMAS (LTPO, 1998).

Au Nord-Ouest de notre secteur, sur le plateau de Bir El Djir, les formations du Plio-Pléistocène reposent directement sur les formations du Miocène supérieur. Ces formations représentent le dernier épisode marin reconnu dans la région. Cette formation calabrienne (formation du golfe d'Arzew, d'après G. Thomas "P IIA") est discordante sur le Miocène supérieur. Tel est le cas au niveau des falaises d'Oran (Cueva d'El Agua) (fig. n° 13).

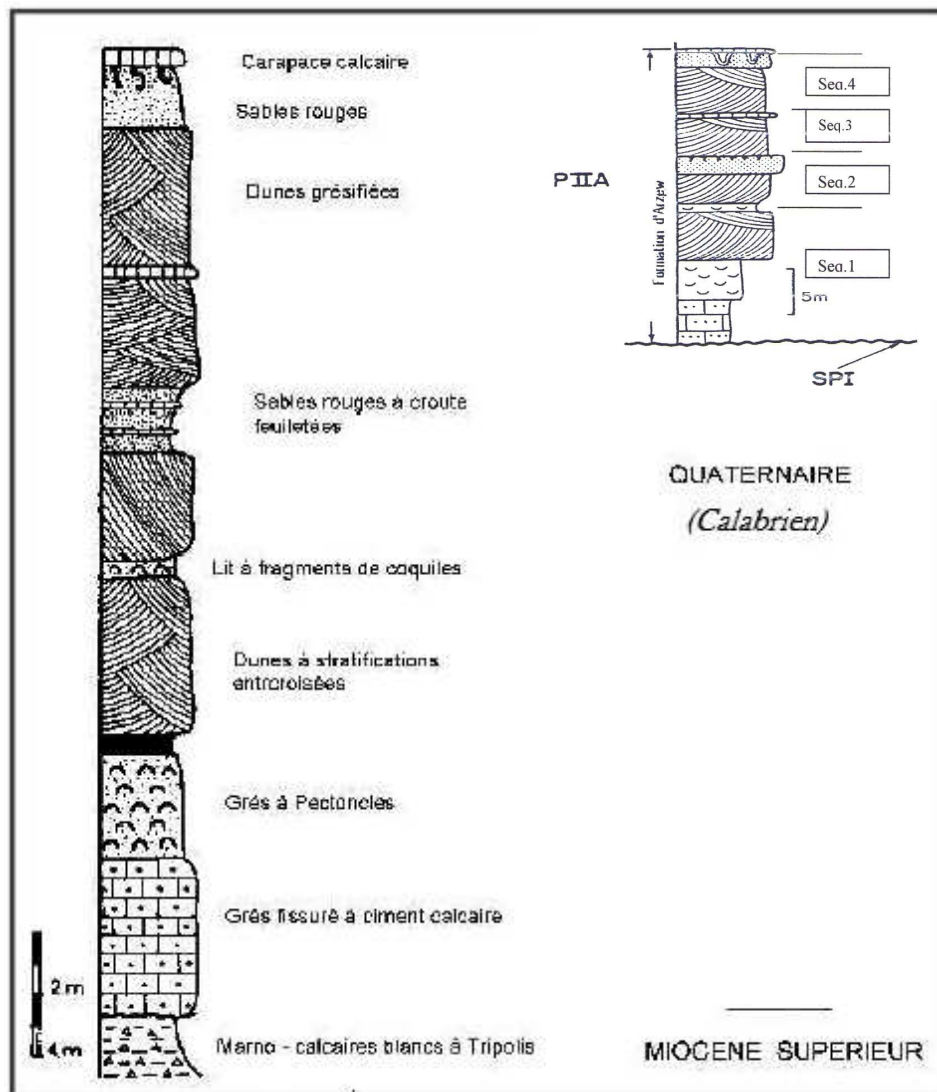


Figure n° 13 : Coupe géologique des falaises d'Oran (G. Thomas, 1985).

Dans la région du "Littoral oranais", cette formation représente le dernier épisode marin reconnu. Elle est discordante sur le Miocène supérieur. D'abord lumachellique ou conglomératique, elle passe progressivement à des grès dunaires à stratification oblique et entrecroisée, souvent entrecoupés d'argile continentale. Souvent, la dissolution des éléments carbonatés a entraîné la formation d'argile rouge brique plus ou moins sableuse qu'on rencontre dans la partie supérieure du "Calabrien".

Dans la majeure partie de la région, une carapace calcaire, parfois de deux mètres d'épaisseur, vient masquer le "Calabrien" et les formations antérieures.

I.3.2.2.4. Le Pleisto-Holocène :

Dans la zone de piedmont, entre les collines de Hassi Ben Okba et la plaine de Sidi Ali s'étend une bande de glacis d'accumulation formés d'éléments grossiers provenant du

démantèlement des reliefs. Ces glacis sont raccordés à l'aval à un empilement des couches formées de limons sableux, argileux ou caillouteux, rubéfiés. La majeure partie de la plaine de Sidi Ali est occupée par des alluvions récentes, limoneuses, recouvrant les formations astiennes et calabriennes. Un mince encroûtement calcaire vient masquer ces alluvions, en surface.

I.3.3. Le Contexte tectonique :

Dans la région d'Oran, la tectonique dessine les traits essentiels de la structure actuelle et s'exprime selon les directions principales N 10-20°, N 50-70° et N 140 (fig. n° 14).

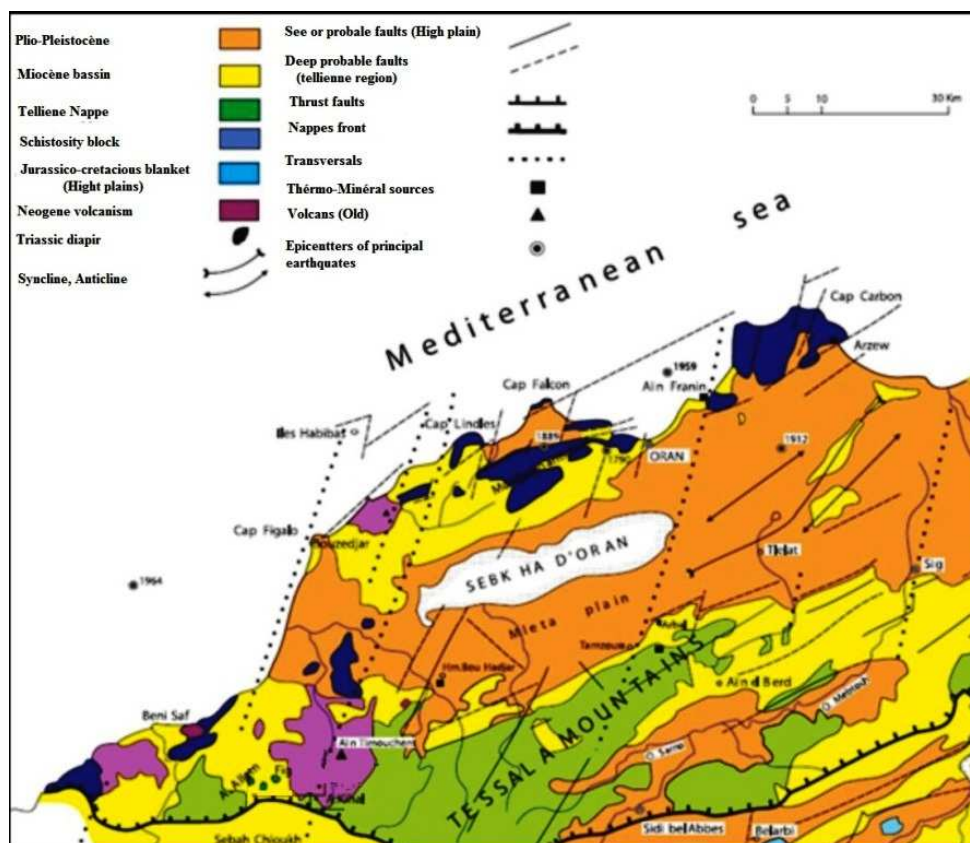


Figure n° 14 : Schema structural de l'Oranie (B. Fenet, 1975).

Le Djebel Khar (Montagne des Lions), comme le reste des Massifs Littoraux, correspond à une zone de horsts présente dans les terrains néogènes, limitées par des failles. L'apparition et la mise en place de ces horsts s'est produite à la fin du Miocène supérieur. Ce mécanisme a encore joué après le Miocène supérieur, près du sommet, ceci est attesté par l'existence de deux affleurements de calcaires à lithothamniées situés à deux niveaux différents. Ce rejet des horsts a contribué au développement d'ondulations

tectoniques de faible amplitude, formées de plis simples tels ceux affectant les couches du Pliocène de l'anticlinal du Djebel Debbi (entre Boufatis et El Braya).

Des failles normales séparent, au sud, les horsts des terrains néogènes et quaternaires du Plateau des Hassis. Ces terrains sont presque horizontaux au niveau des plateaux et affectés de plis simples au niveau des collines (les anticlinaux) ou de dépressions (les synclinaux). La topographie de la région au sud du Djebel Khar concorde avec la structure tectonique (fig. n° 10 & n°15).

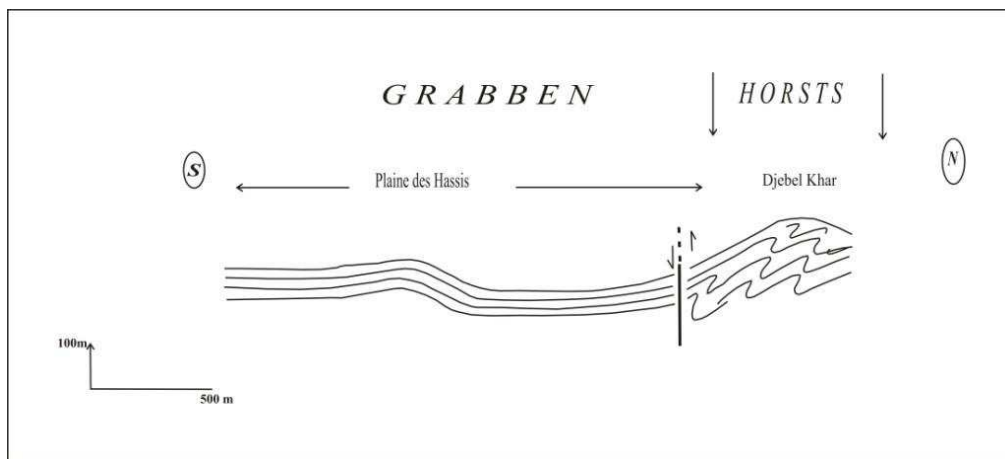


Figure n° 15 : Schéma illustrant la structure de la région d'étude (in Haddar L, 1986, modifié).

L'écorché géologique de la figure n° 16, schématise les structures des anticlinaux et des synclinaux suscités.

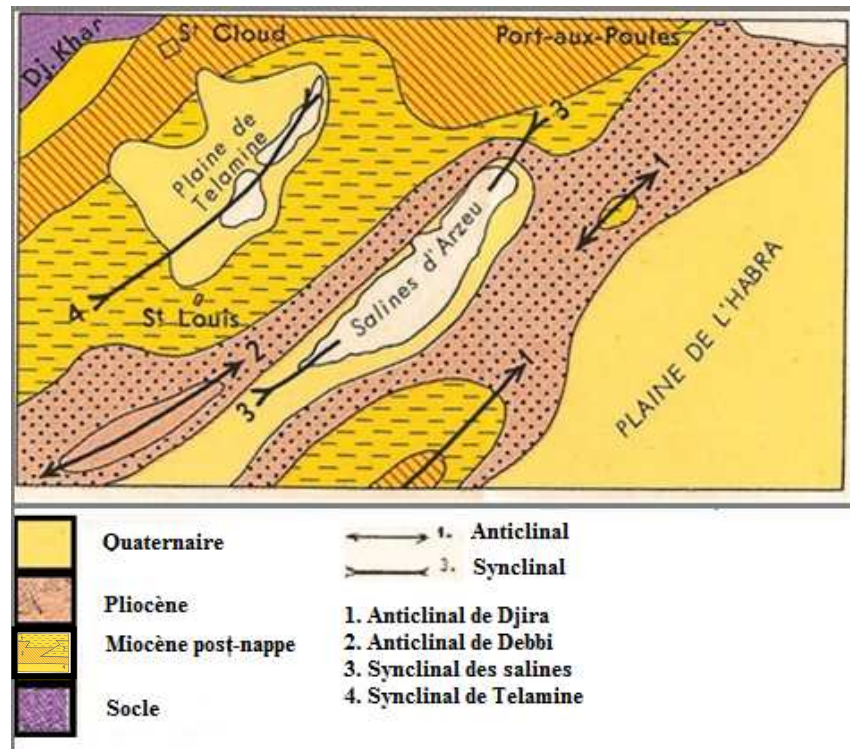


Figure n° 16 : Ecorché géologique de la région de Gdyl (Y. Gourinard, 1957).

La carte montre l'existence d'une structure anticlinale au Sud-Est de la plaine de Telamine. Les déformations du "Calabrien" s'observent d'ailleurs aussi sur les flancs de la plupart des autres structures (bordure de la Saline d'Arzew, par exemple). Ce "Calabrien" étant souvent concordant sur les terrains antérieurs, la plus grande partie des déformations du Néogène apparaît donc comme d'âge Quaternaire. Ces mouvements tectoniques très récents se retrouvent d'ailleurs par l'analyse morphologique, car ils ont détruit peu à peu le réseau hydrographique du Quaternaire ancien, individualisant de nombreux bassins fermés.

I.4. Cadre hydrogéologique :

I.4.1. Description des principaux aquifères de la région :

Les grès du Pliocène "Astien" ainsi que les grès lumachelliques et les grès jaunes du Calabrien et constituent les principales formations aquifères de la région (fig. n° 17).

Géologie			Stratigraphie	Lithologie	Hydrogéologie
Classement des terrains					
1	2	3			
			Récent	Bas fond salé au niveau du lac constitue un milieu vaseux.	Perméabilité faible
			Quaternaire	Argile gréseux, mince couche de croûte et dépôt de pente de Dj. Khar.	Perméabilité moyenne
			Plio-quaternaire	Grès coquilliers et grès jaunes à Hélix	Bonne perméabilité
			Plio-quaternaire	Marnes grises	Imperméable
			Pliocène	Grès et calcaire gréseux	Bonne perméabilité la nappe noie la partie inférieure des calcaires (tendre de porosité d'interstice)
			//	Marnes bleuâtres	Imperméable constitue le mur de la nappe du Pliocène
			Miocène	Gypse à intercalation de bancs de tripoli	Imperméable
			//	Marnes à gypse	Imperméable
			//	Marnes à silice	Très faible perméabilité
			//	Marnes et grès micacés	Très faible perméabilité
			Crétacé	Schistes argileux brun violet	Imperméable
			Jurassique	Calcaire dolomitique du lias	Bonne perméabilité donne naissance à la source de kristel.
			Permo-trias	Schiste violaces, quartzites, lydiennes	Imperméable

Figure n° 17 : Log hydrogéologique général de la région (L. Haddar, 1986, modifié).

L'ensemble Astien - Calabrien forme un réservoir contenant une nappe libre à grande extension.

Dans son ensemble, le substratum est constitué par les marnes du Miocène supérieur et du Pliocène inférieur.

I.4.1.1. Aquifère de l’Astien :

Cet aquifère est constitué essentiellement par des calcaires gréseuses. Le forage de Hassiane Ettoual (annexe 3) exécuté, en juillet 1985, a montré que l'épaisseur de ces calcaires pouvait atteindre 50 m. Ce forage atteint 183 m. Les calcaires gréseux surmontent les marnes bleues du Miocène qui constituent le mur de cette nappe. Elle alimente un nombre de puits qui se concentrent au niveau des villages de Hassiane Ettoual, Hassi Ben Okba et au Nord-Ouest de Hassi Bounif.

Les calcaires gréseux sont constitués de deux couches :

- Une couche supérieure, dure et compacte. Son épaisseur ne dépasse pas 1 m.
- Une couche inférieure, tendre, car le calcaire gréseux devient plus marneux.

Le forage d'Oravio (fig. n° 11) réalisé à la bordure nord de la zone industrielle (S.S), recoupe sur près de vingt mètres les niveaux de l'Astien, sous jacents au grès lumachelliques.

L'eau de la nappe n'est pas en charge. La nappe est à surface libre, elle est alimentée par infiltration directe à travers les formations superficielles perméables : encroûtement calcaire et limons sableux et en période de crue à partir du ruissellement de surface, au niveau des glacis et des cônes de déjection des principaux oueds; essentiellement ceux provenant du flanc sud du Djebel Khar et des collines de la forêt de Hassi Ben Okba.

I.4.1.2. Aquifère de grès lumachelliques du Calabrien :

Les formations des grès lumachelliques et grès jaunes du Calabrien contiennent une nappe phréatique captée et exploitée par la majorité des puits de la plaine de Sidi Ali.

I.4.2. Piézométrie du secteur d'étude :

Afin de caractériser la piézométrie de la nappe phréatique, les niveaux piézométriques de treize (13) puits et forages, situés à l'intérieur de la zone industrielle et au niveau des terres agricoles et urbanisées environnantes, ont été mesurés pendant 2 jours : les 24 et 25 février 2012. Au niveau de chaque puits ou forage, un prélèvement d'échantillon d'eau a été effectué pour fin d'analyses hydrochimiques.

Les mesures piézométriques (Tableau n° 06), nous ont permis d'établir la carte en courbes hydro isohypses de la nappe d'eau souterraine de la zone d'étude (fig. n° 18).

Tableau n° 06 : Les données piézométriques des points d'eau.

Indice des points d'eau	Longitude	Latitude	Z (m)	H (m)	Localisation
P1	35°42'20.10''	0°29'27.14''	97	93	Zone Industrielle (U. Haffar)
P2	35°42'39.48''	0°29'07.66''	96.5	92.7	Zone Industrielle (U. Benyelles)
P3	35°42'17.13''	0°28'37.38''	94	90	Zone Industrielle (U. Saidi)
P4	35°43'01.14''	0°28'25.22''	98.5	92.75	Zone agricole
P5	35°43'21.65''	0°28'10.94''	99	92.1	Zone Industrielle (U. ECO)
P6	35°42'45.03''	0°28'55.89''	97	92.9	Zone Industrielle (U. SIMAS)
P7	35°42'21.24''	0°29'07.13''	94.8	91.55	Zone Industrielle (U. Unilevers)
P8	35°42'17.18''	0°28'25.65''	94	89	Milieu urbain
P9	35°43'01.35''	0°28'10.22''	96	91.4	Zone agricole
P11	35°43'18.19''	0°28'55.77''	115	92.8	Zone agricole
P12	35°42'48.80''	0°29'20.86''	99.75	93	Zone agricole
P13	35°42'42.23''	0°29'50.01''	102	93.8	Zone agricole
P15	35°41'57.11''	0°29'30.23''	97	92.25	Zone agricole

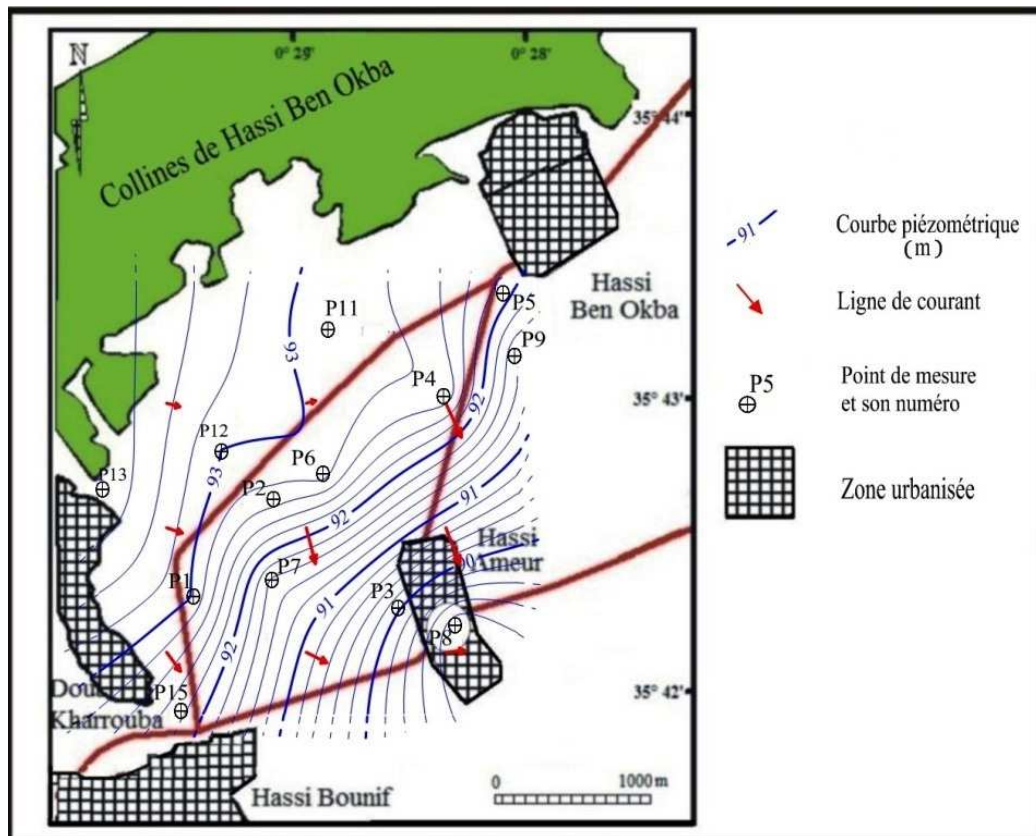


Figure n° 18 : Carte piézométrique du secteur d'étude (24-25 février 2012).

L'examen des courbes isopièzes indique une surface piézométrique caractérisant une nappe radiale, à écoulement de direction Nord-Ouest/Sud-Est, légèrement convergent vers le secteur de l'agglomération de Hassi Ameur. La pente de cette nappe présente une morphologie assez régulière. L'examen de l'allure et de l'espacement des courbes isopièzes indique un écoulement général à profil parabolique dénotant une diminution de la perméabilité dans le sens de l'écoulement. Le gradient hydraulique moyen de la nappe au niveau de la zone industrielle (S.S) est de 1.8×10^{-3} .

I.4.3. Paramètres hydrodynamiques :

I.4.3.1. Transmissivité et perméabilité :

Concernant la transmissivité de la formation aquifère, un pompage d'essai effectué dans un puits, à grand rayon, situé à quelques dizaines de mètres de P1 (X= 212,40 Y= 271,73 Z= 111) a donné une transmissivité : $T = 2,8 \text{ à } 4,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$ (ENRENAD, 1998).

A titre indicatif, des mesures de perméabilité, interprétés selon la méthode Lefranc, réalisés dans des sondages de reconnaissance captant les niveaux au niveau du plateau

d'Oran-Bir El Djir (Ouest du plateau des Hassis) ont donné les résultats récapitulés dans le tableau n° 07 (AGEP/Sogreah, 1984).

Tableau n° 07 : Résultats de mesures de perméabilité des niveaux aquifères du plateau Oran-Bir El Djir (AGEP/Sogreah, 1984).

Quaternaire	Argiles à gravier ou à horizon sableux ou gypseux	$1,2.10^{-7}$ à $2,4.10^{-4}$ m/s
	Argiles rouges	$1,3$ à 7.10^{-7} m/s
	Silts	$1,1.10^{-4}$ m/s
	Sables fins, sables argileux, calcaires tufeux	$9,4.10^{-5}$ m/s
Astien	Argiles sableuses et gréseuses	$6,6.10^{-6}$ m/s
	Sables argileux	$1,1.10^{-5}$ à 7.10^{-4} m/s
	Argiles et calcaires	$1,1.10^{-4}$ m/s

Par ailleurs, une estimation des ressources en eau souterraines du plateau des Hassis, établie par l'ANRH/ENERGOPROJEKT (2009), par application de la méthode du bilan hydrologique, propose une valeur de $3,9 \text{ Hm}^3/\text{an}$.

I.5. Présentation de la zone industrielle de Hassi Ameer :

I.5.1. Localisation de la zone industrielle (fig. n° 19) :

La zone industrielle de Hassi Ameer se situe à environ 11 km à l'Est de la ville d'Oran.

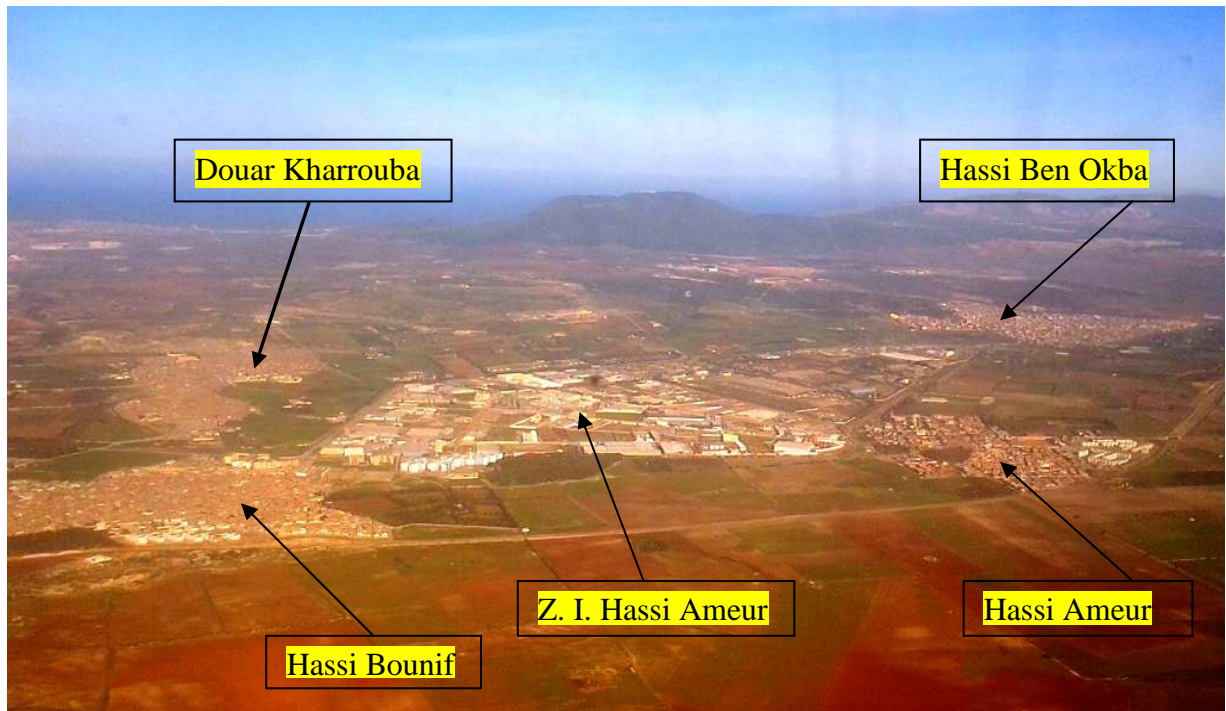


Figure n° 19 : Vue aérienne de la zone industrielle de Hassi Ameer (2012).

Elle longe la route nationale RN 11 Oran / Arzew et elle est limitée par :

- l'agglomération de Hassi Ben Okba au Nord-Est,
- l'agglomération de Hassi Ameer au Sud-Est,
- L'agglomération de Hassi Bounif à l'Ouest,
- Douar Kharrouba au Nord-Ouest.

I.5.2. Historique et évolution des activités au sein de la zone industrielle de Hassi Ameer :

La zone industrielle de Hassi Ameer a été créée vers au début de la décennie 1970, sur une superficie de 313 hectares. Elle a été conçue et construite initialement pour accueillir l'industrie lourde (construction métallique, chaudronnerie, construction de véhicules automobiles, etc.). Le choix de création de cette zone industrielle s'était basé sur :

- Une décision politique en faveur de l'orientation de l'économie nationale vers l'industrialisation.
- La disposition d'une main d'œuvre profitable.
- Une infrastructure routière importante.
- Des potentialités en eau considérables dans la plaine des Hassis.
- La situation géographique stratégique dans la région Nord-Ouest de l'Algérie.

Les industries productives existantes en 1983 comportaient deux types d'unités industrielles de faible densité, les premières étaient métallurgiques et les secondes correspondaient à la production des matériaux de construction. Les industries de service étaient celles de SONELGAZ et SERSID- SNS, les autres unités industrielles étaient encore en réalisation. Par la suite, la zone industrielle est devenue lourde et complexe, avec des unités industrielles de différents types, avec utilisation de matériaux dangereux et une forte mobilité de transport des marchandises. Elle est donc devenue un grand souci pour les populations des agglomérations avoisinantes. Le facteur essentiel dans la sédentarité usinière est la décision politique visant à construire des pôles industriels dans les différentes régions du pays, pour arriver à un développement industriel compréhensif, mais sans prise en considération le facteur de risque.

Par la suite, l'évolution de la politique économique et industrielle du pays a conduit à une restructuration de la zone industrielle qui a connu plusieurs transformations. A la fin des années 1990, la zone industrielle comprenait plus de 60 unités industrielles et avec l'augmentation du nombre des unités, des types d'industries (chimie, hydrocarbures, etc.) se sont aussi multipliés. Aujourd'hui, avec l'adjonction d'un nouveau lotissement dans la partie ouest, la zone industrielle se compose de 183 lots (fig. n° 20).

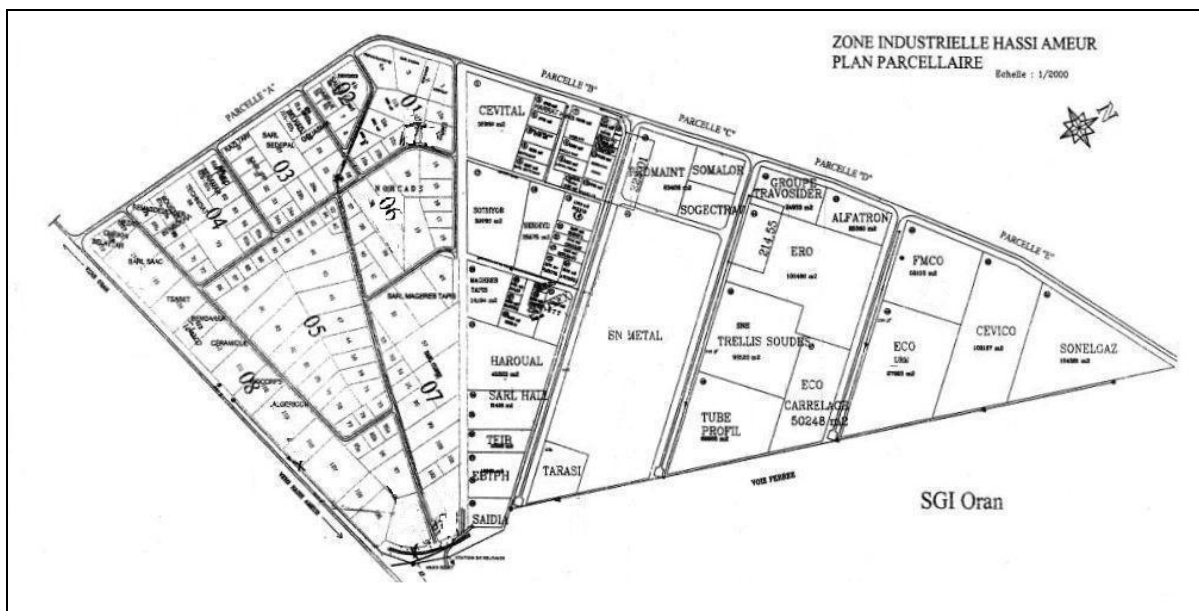


Figure n° 20 : Plan parcellaire actuel de la zone industrielle de Hassi Ameur (SGI Oran, 2009).

L'état actuel de la zone industrielle est caractérisé par des unités en cours de réalisation, des unités à l'arrêt (unité Simas, etc.) ainsi que de lots non exploités, utilisées

parfois comme décharges. Les unités en activité sont divisées en deux catégories: des unités de production et des unités de stockage (annexes n° 04 à 06).

Actuellement, la zone industrielle est gérée par l'organisme S.G.I. : Société de gestion de la zone industrielle de Hassi Aneur.

I.5.3. L'occupation du sol et son évolution :

L'occupation du sol de la zone peut être abordée selon deux angles différents :

- La nature et les formes d'occupation du sol actuelles (zones de cultures, zones de végétations naturelles, les différentes occupations humaines d'habitat, infrastructures diverses.)

- L'évolution spatio-temporelle de cette occupation du sol.

Cette occupation du sol est calquée sur les grandes unités morphologiques décrites précédemment.

I.5.3.1. Les cultures et la végétation naturelle :

• L'occupation du sol avant l'implantation de la zone industrielle :

L'occupation des terres avant l'implantation de la zone industrielle, présentait trois rubriques fondamentales : des cultures permanentes, des cultures annuelles et une végétation naturelle.

Les cultures permanentes se résumaient dans la viticulture, qui occupait plus de 90 % de la superficie de la plaine et de ses abords. Quelques vergers (oliviers) étaient localisés sur les piémonts.

Les cultures annuelles étaient essentiellement céréalières ou maraîchères en sec. Les cultures irriguées étaient très peu représentées.

La végétation naturelle était localisée exclusivement sur les reliefs. Ce sont des restes de forêts de pin d'Alep avec un sous bois peu développé. Cette formation végétale présentait des signes de dégradation à mesure que l'on se rapprochait des zones de cultures.

• L'occupation actuelle de la région (fig. n° 21) :

Aujourd'hui cette occupation du sol a été profondément modifiée. Les faits les plus saillants sont :

- la disparition presque totale de la vigne,
- le développement récent mais massif du maraîchage en irrigué dans la plaine,

- le développement de la céréaliculture sur les terrains où les possibilités d'eau sont limitées.

Dans les zones de contacts, ce sont des labours et des friches qui dominent. La végétation naturelle haute, connaît une dégradation accrue, elle a reculé sur de grandes superficies. Enfin la zone industrielle et le développement anarchique des zones urbaines (douar Kharrouba, etc.) sont les modifications les plus irréversibles de l'occupation du sol du secteur d'étude.

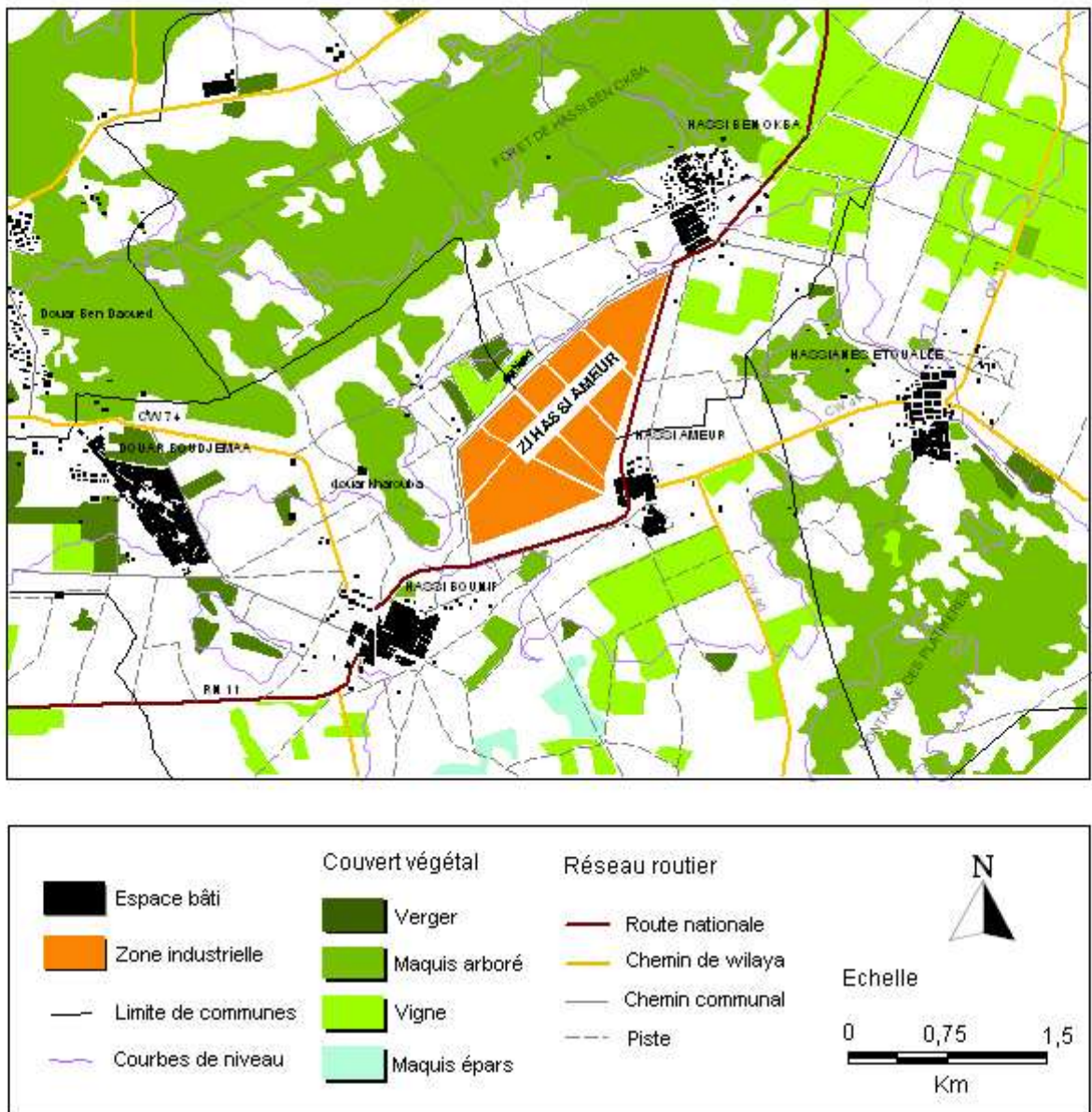


Figure n° 21 : L'occupation des sols actuelle dans la zone d'étude (M. Sardou, 2009).

I.5.3.2. Les grandes infrastructures et l'habitat dans la zone :

Ce qui caractérise la zone industrielle de Hassi Ameer, c'est sa proximité immédiate de trois unités urbaines : Hassi Ameer au Sud-Est, Hassi Ben Okba au Nord-Est et Hassi Bounif au Sud-ouest. On peut rajouter à ces trois unités urbaines, le Douar de Kharrouba, situé à l'Ouest de la zone industrielle. Les agglomérations de Hassi Ameer et Hassi Bounif font partie de la même commune (Hassi Bounif). Elles regroupaient respectivement : 5510 et 23033 habitants en 2005. Quant à l'agglomération de Hassi Ben Okba, elle totalise 12455 habitants.

Le réseau de routes nationales, wilayales et de chemins communaux existait avant l'implantation de la zone industrielle : la route nationale N°11 qui relie Oran à Arzew traverse la zone et par les trois agglomérations citées plus haut. Elle longe la zone industrielle au Sud. Le chemin wilaya N° 41 relie l'agglomération de Hassi Ameer vers l'Est à celle de Hassian Ettoual. Le chemin wilaya N° 90 relie Hassi Ameer vers Boufatis et Oued Tlelat vers le Sud. Le chemin de wilaya N° 74 relie Hassi Bounif, Sidi Chami et Bir El Djir. Des chemins vicinaux desservent la zone industrielle et l'espace communal. Le réseau interne de la voirie de la zone industrielle existant est défectueux. La voie de chemin de fer reliant Arzew à Oran passe au Sud de la zone industrielle.

Le réseau de communication téléphonique utilise une dérivation du réseau souterrain Oran-Alger-Constantine (GD 3), qui passe le long de la RN 11.

Au niveau énergétique, la zone industrielle est alimentée en électricité à partir de la centrale électrique située à l'extrémité Est de la zone. Cette alimentation s'avère parfois insuffisante, ce qui pousse certaines unités à recourir à des groupes électrogènes. Le piquage effectué sur la grande conduite Gaz Haute pression Arzew-Oran alimente la zone industrielle.

Le réseau AEP qui au départ était à la charge du promoteur industrielle (CADAT), à connu d'énormes difficultés dans sa réalisation. Actuellement des restrictions dans l'alimentation de la zone rendent ce réseau non opérationnel. Chaque unité industrielle tente d'assurer son alimentation par ses propres moyens (puits, forages).

Le réseau d'assainissement est bien réalisé. Il comprend le drainage des eaux pluviales, par des canaux aériens, et un réseau unitaire souterrain pour les eaux pluviales et industrielles.

Le débouché de ce réseau est localisé au Sud-est de la zone industrielle au contact de l'agglomération de Hassi Aneur. De là, les eaux sont directement canalisées sur près de cinq kilomètres pour être rejetées dans la partie occidentale du Lac de Telamine. Un projet de station d'épuration a souvent été évoqué mais à ce jour cela est resté sans suite.

Conclusion

Dans ce chapitre, un aperçu général des caractéristiques morphologiques, climatologiques, géologiques et hydrogéologiques de la région d'étude a été présenté.

La plaine de Sidi Ali fait partie d'une série de cuvettes topographiques bien marquées dans le paysage du plateau des Hassis. Elle est drainée par un réseau hydrographique très restreint.

La région se caractérise par un climat méditerranéen de type semi aride. Ce type de climat a été mis en évidence par une période sèche du mois de mai au mois de septembre et une période humide (pluvieuse) du mois d'octobre au mois d'avril. Ceci peut produire des modifications périodiques de la chimie des eaux.

En se basant sur les travaux géologiques de plusieurs auteurs, l'étude géologique de la région a mis en évidence une structure constituée par deux grands ensembles :

- Un substratum anté à synchro nappe, affleurant dans le Djebel Murdjadjo, le Djebel Khar et dans les Monts d'Arzew, représenté par des massifs schisteux autochtones d'âges permo-triasique, jurassique et crétacé, fortement affectés par l'orogénèse alpine.
- Un remplissage (couverture) post-nappe, avec une forte extension dans les zones basses du domaine. Quatre cycles sont distingués :

Le premier cycle miocène post-nappes (M1) :

Formé de dépôts continentaux, constitués d'alternance de conglomérats et de marnes parfois gypseuses, bien développés sur les côtes.

Le deuxième cycle miocène post-nappes (M2) :

Qui débute généralement dans le bassin du Chélif par une importante série détritique grés-sableuse et constitué par ;

- des formations médianes constituées de marnes bleues.
- des formations terminales, constituées par une série des tripolis et la série des gypses.

Le troisième cycle post-nappes –pliocène- (P1) :

Dans le bassin du Bas Chélif, le Pliocène est représenté par la succession classique des marnes bleutées "plaisanciennes" et des grés marins "astiens" puis continentaux.

Le quatrième cycle post nappes (Calabrien) :

Ce cycle est d'abord lumachellique ou conglomératique passe progressivement à des grès dunaires et représentent le dernier épisode marin de quelque importance sur le littoral Oranais.

La structure générale de la région d'étude montre que les séries néogènes qui forment le substratum sont quasi-horizontales dans les régions des plateaux et affectées de plis simples dans les régions des collines ou de dépressions.

Du point de vue hydrogéologique, les grès lumachelliques et grès jaunes du Calabrien et les grès du Pliocène "Astien" constituent sous et autour de la zone industrielle de Hassi Ameer un ensemble aquifère indifférencié "Astien-Calabrien"

Cet ensemble Astien – Calabrien forme un réservoir contenant une nappe libre à grande extension, surmontant un substratum constitué par les marnes du Miocène supérieur et du Pliocène inférieur.

L'étude piézométrique, indique une surface piézométrique, caractérisant une nappe radiale, à écoulement de direction Nord-Ouest / Sud-Est, légèrement convergente vers le secteur de l'agglomération de Hassi Ameer. La pente de cette nappe présente une morphologie assez régulière.

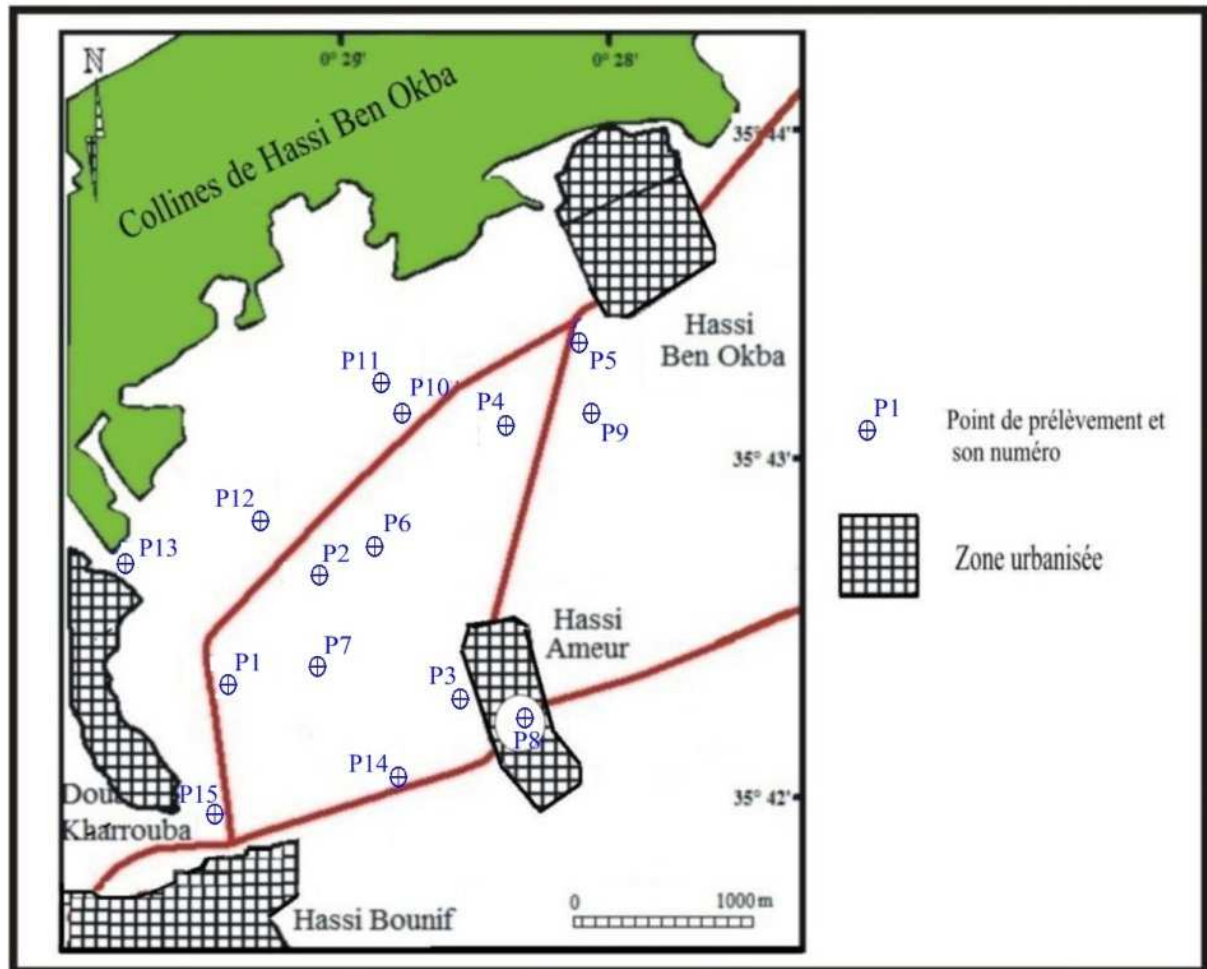
Concernant le contexte industriel, la zone industrielle a été créée en 1973 sans prendre en considération les préoccupations environnementales et la notion du risque pouvant être induit par les activités industrielle. Au cours des ces dernières années, la zone industrielle est devenue plus étendue et plus complexe du fait de l'adjonction les nouvelles activités (chimie, hydrocarbures, etc.) qui peuvent impacter de façon plus marquée le contexte environnemental général de la région et les eaux souterraines en particulier.

Introduction

L'étude hydrochimique donne des informations sur les caractéristiques des eaux souterraines en rapport avec le contexte lithologique de circulation de ces eaux dans la zone saturée ainsi que des interactions du contexte environnant : percolation à travers la zone non saturée, échanges avec les eaux de surface, évaporation, effet des pollutions en surface, etc. L'ensemble de ces facteurs prédéterminera la qualité de l'eau vis-à-vis de sa potabilité et de son aptitude à l'irrigation. A travers, l'étude qui suit, l'interprétation des données des analyses des différentes eaux échantillonnées, aura pour objectif la détermination des caractéristiques physico-chimiques des eaux prélevées afin de connaître leurs origines, définir leurs faciès chimiques et de comparer et suivre leurs évolutions dans l'espace.

Pour cela, un certain nombre de cartes et de diagrammes ont été élaborés et serviront de base pour l'interprétation générale des résultats de mesures des paramètres physico-chimiques.

Dans le secteur d'étude, les points d'eau ciblés (fig. n° 22) ont été ceux ayant fait l'objet, par nous même, d'une mesure piézométrique lors de la campagne du 24/25 février 2012 (voir Chapitre I).



**Figure n° 22 : Carte de situation des points de prélèvement
(campagne du 24/25fevrier 2012).**

Les paramètres physiques tels que la conductivité, le pH et la température ont été mesurés in situ. L'analyse complète des échantillons prélevés, limitée à quinze, a été effectuée au niveau du laboratoire de chimie de la Direction Régionale Ouest (DRO) de l'A.N.R.H.

Cette interprétation portera sur l'interprétation des analyses de quatorze échantillons d'eau. Le point d'eau P4 dont les résultats d'analyse nous ont paru particulièrement aberrants n'a pas été pris en compte dans l'interprétation.

Les résultats des analyses des échantillons sont portés au tableau n° 08.

Tableau n° 08 : Présentation des résultats de l'analyse physico-chimique des eaux.

Point d'eau	T (°C)	pH	Cond (µs/cm)	Min (mg/l)	Rs (mg/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
P1	18.6	7.55	4140	3142	3520	234	104	658	22	974	271	728	92
P2	16.8	7.8	3470	2633	2800	76	145	589	4	821	542	418	55
P3	20	7.3	4110	3120	3100	128	175	695	31	1054	535	447	97
P4*	15.7	7.51	1370	1040	1060	93	54	157	2	334	243	146	21
P5	19	7.06	3500	2657	3000	276	46	460	4	934	250	257	100
P6	18.6	7.32	2740	2080	2040	111	58	479	5	601	474	337	50
P7	20.5	7.33	6110	4638	4800	170	179	1093	12	1729	542	612	58
P8	18.8	7.18	4150	3150	3300	166	123	759	47	888	453	890	112
P9	17.1	7.27	4960	3765	4200	234	153	777	7	1515	339	414	84
P10	20.9	7.03	4880	3704	4200	395	94	695	6	1582	271	322	94
P11	20	7.39	2019	2660	2100	191	66	375	6	687	345	271	55
P12	20.3	7.16	4560	3461	3920	353	71	621	7	1381	284	308	101
P13	18.7	7.2	3180	2414	2600	263	37	458	5	814	284	303	128
P14	20.7	7.39	5270	4000	3880	102	172	1001	16	1428	704	467	46
P15	19.6	7.32	2480	1822	1880	102	78	433	8	514	426	414	71

II.1. Caractères organoleptiques :

II.1.1. La couleur :

La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. Les couleurs réelles et apparentes sont approximativement identiques dans l'eau claire et les eaux de faible turbidité.

L'eau colorée peut présenter des inconvénients. D'après l'O.M.S., la valeur de 10 mg/l de Pt, est considérée comme un chiffre qu'il est souhaitable de ne pas dépasser et la valeur de 15 unités est admise comme limite supérieure acceptable.

Selon les résultats obtenus de l'analyse, les eaux de différents points d'eau sont dans l'ensemble incolores (voir annexe n° 07).

II.1.2. La turbidité :

La turbidité d'une eau est due à la présence de matières en suspension finement divisées. Les normes concernant la turbidité sont assez différentes. L'O.M.S. indique comme valeur limite 5 unités NTU et précise qu'en cas de désinfection, la turbidité doit être inférieure à 1 NTU.

Les eaux échantillonnées dans notre secteur d'étude présentaient des valeurs comprises entre 1 et 3 NTU (voir annexe n° 07).

II.2. Etude des paramètres physiques :

II.2.1. Le pH :

La détermination du pH constitue une mesure de la concentration des ions H^+ dans l'eau. Le pH montre le degré d'acidité du milieu.

Le pH dépend de l'origine des eaux et de la nature géologique des terrains. Les régions granitiques et les zones forestières donnent des eaux acides aux pH voisins de 5 à 6 alors que les terrains calcaires donnent des eaux de pH voisins de 8. Le pH représente l'état de l'équilibre carbonique. Le CO_2 libre dissous dans l'eau forme un acide faible qui abaisse le pH. Il réagit avec les bases pour former des carbonates acides, pratiquement insolubles, et des bicarbonates très solubles. Suivant la teneur en Calcium et en Magnésium, le pH remonte au fur et à mesure de la neutralisation du CO_2 par l'une ou l'autre base.

Le pH ne constitue pas un facteur de toxicité : des valeurs comprises entre 5 et 9 permettent un développement normal de la faune et de la flore. Par contre, il conditionne directement le degré d'ionisation des diverses solutions salines que contiennent les eaux naturelles.

Dans notre zone d'étude, les valeurs de pH sont très homogènes et proches de la neutralité. Toutes les mesures recensées varient entre 7,03 et 7,80.

II.2.2. La température :

La température des eaux souterraines est généralement moins affectée par les variations, quotidienne et saisonnière, de la température de l'air. Elle subit néanmoins de façon atténuée ces variations au fur et à mesure de leur approfondissement. La variation de température régit la quantité d'oxygène dissous dans l'eau. Plus l'eau est chaude, moins l'oxygène est capable de se maintenir en solution et le manque d'oxygène est l'un des facteurs de la pollution thermique.

Par ailleurs, la température de l'eau joue, en outre, un rôle au niveau de la décomposition des matières organiques et du développement des maladies parasitaires. Elle favorise la fermentation qui agit comme pollution additionnelle et qui diminue la teneur en "Oxygène dissous".

Les variations brusques et soudaines de température d'une eau doivent porter la suspicion sur cette eau. Les industries électriques métallurgiques, etc., sont les principales sources de pollution thermique.

La température des eaux de la zone d'étude est assez homogène. Les valeurs varient de 16.3 et 20.9 °C. A titre de référence, la température moyenne de l'air au mois de février est de 13.5 °C (voir chapitre I).

II.3. Etude des paramètres chimiques :

II.3.1. La balance ionique :

L'analyse chimique des échantillons a porté sur les éléments majeurs. Pour vérifier la balance ionique des différents ions analysés sur l'ensemble des échantillons, nous avons calculé l'erreur sur chaque analyse à partir de la relation suivante :

$$e = (\sum r_c - \sum r_a) / (\sum r_c + \sum r_a) * 100.$$

où :

r_c = somme des cations en meq /l ;

r_a = somme des anions en meq/l.

Selon la valeur de l'erreur, on peut distinguer :

- $e\% > 5\%$: *erreur dans l'analyse*
- $5 > e > 2\%$: *erreur acceptable*
- $e < 2\%$: *bonne analyse*

Les valeurs de l'erreur sur chaque analyse sont figurées dans le tableau n° 09. Ces valeurs s'échelonnent entre zéro (0) et quatre (4).

Tableau n° 09 : Valeurs de l'erreur sur chaque analyse.

Echantillon	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
e (%)	2	1	4	2	3	1	0	2	1	2	1	1	3	1	1
Etat de l'analyse	bonne	bonne	acceptable	bonne	acceptable	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne	acceptable	bonne	bonne

II.3.2. La minéralisation :

La conductivité reflète la minéralisation totale des eaux. La répartition spatiale des valeurs de la minéralisation sur l'ensemble de la zone d'étude est représentée en figure n° 23.

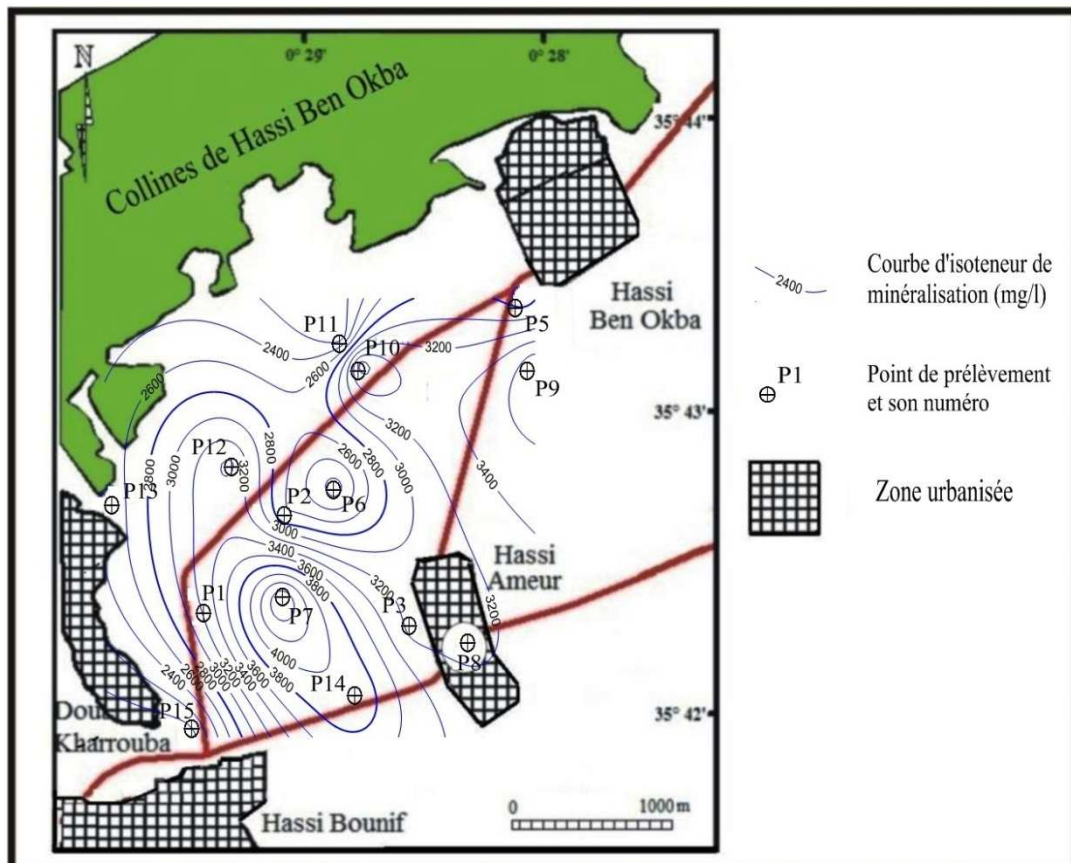


Figure n° 23 : Carte d'isovaleurs de minéralisation (mg/l) des eaux du secteur d'étude.

Au sein de la zone industrielle (SS), la minéralisation la plus élevée est centrée sur P7 (Min = 4638 mg/l); la minéralisation la plus faible l'étant en P6 (Min = 1822 mg/l).

Globalement, les plus fortes minéralisations (>3000 mg/l) se concentrent dans le secteur Ouest de la zone à forte concentration de grandes unités industrielles en activité.

En dehors de la zone industrielle, les minéralisations les plus faibles sont relevables dans les zones les plus amonts de la plaine (piémont des collines de Hassi Ben Okba).

Concernant les puits à usage agricole P10 et P11, nous notons un fort resserrement des courbes probablement dû au fait que le puits P10 était en cours de pompage au moment de prélèvement.

En dehors de la campagne que nous avons effectuée lors de cette étude, des prélèvements effectués à différentes époques, au sein de différents points d'eau situés dans certaines unités industrielles (données ANRH) ont montré des valeurs de minéralisation dépassant les valeurs mesurées lors de la dernière campagne de prélèvement. Les valeurs de minéralisation ont atteint 5950 mg/l à P16 (Groupe Mérouani), 7028 mg/l à P17 (SMCP), 11050 mg/l à P18 (U. Tréfilerie de l'Ouest) et 15844 mg/l à P19 (U. Afia International). (Annexe n° 08).

II.3.3. Les cations :

II.3.3.1. Le calcium :

C'est un élément de la dureté totale. Il a une origine interne au système. Il provient, surtout, de la dissolution des roches calcaires. Le calcium peut aussi provenir du gypse.

Une eau potable contient entre 100 et 140 mg/l de calcium. Les eaux qui contiennent plus de 200 mg/l de calcium présentent des inconvénients pour les usages domestiques.

Dans notre zone d'étude (fig. n° 24), les valeurs de calcium sont comprises entre 76 mg/l (P2) et 395 mg/l (P10).

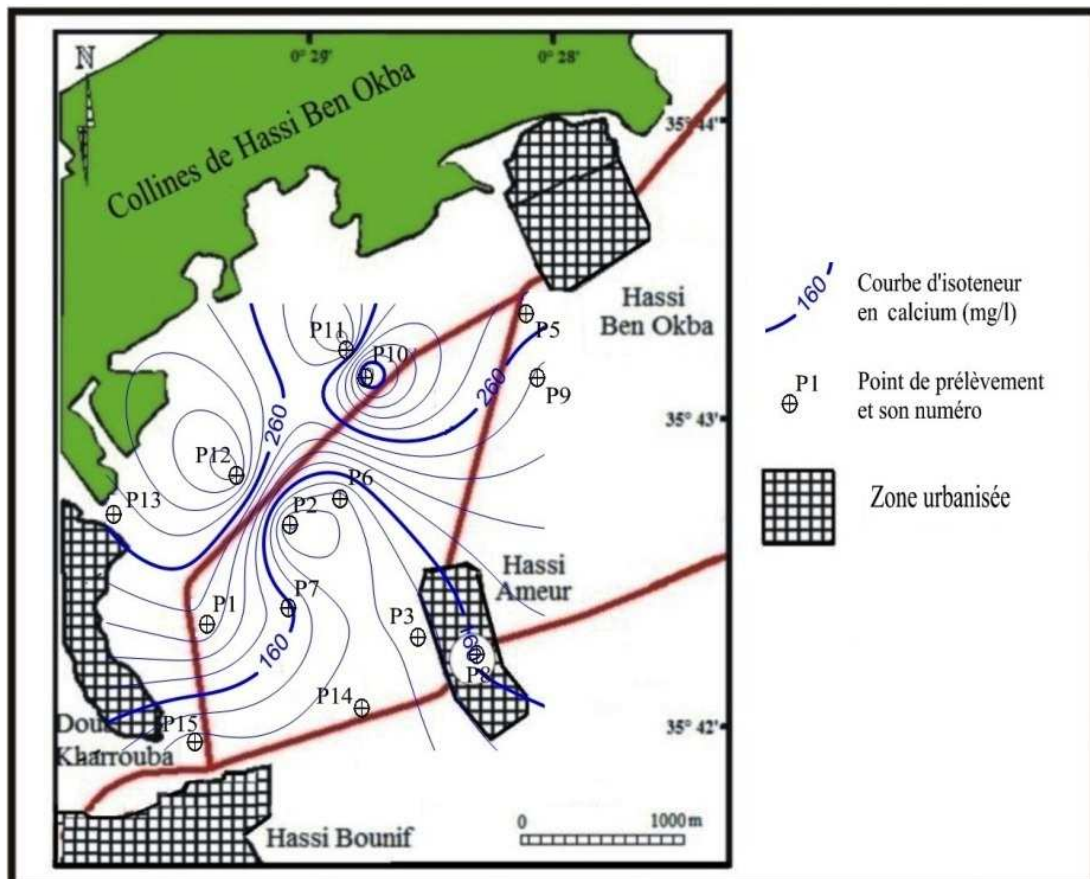


Figure n° 24 : Carte d'isoteneurs en calcium (Ca^{++}) (mg/l).

II.3.3.2 Le magnésium :

C'est également un élément de la dureté totale. La mise en solution de cet ion prend beaucoup de temps.

Il provient de l'attaque des formations dolomitiques par le gaz carbonique, de la dissolution de $MgSO_4$ dans les terrains gypseux entraînant le magnésium et aussi des minéraux ferromagnésiens. Dans notre secteur d'étude, sa teneur varie de 37 mg/l (P13) à 179 mg/l (P7).

II.3.3.3. Le sodium et potassium :

Généralement, ces deux éléments ont une origine semblable à celle des chlorures et sont également liés aux minéraux argileux. Ils peuvent être échangés contre des ions Ca^{++} et Mg^{++} par les minéraux argileux ou des substances organiques et provenir de l'hydrolyse des silicates.

En ce qui concerne notre secteur d'étude, la concentration en Na atteint son maximum au P7 (1093 mg/l) (fig. n° 25).

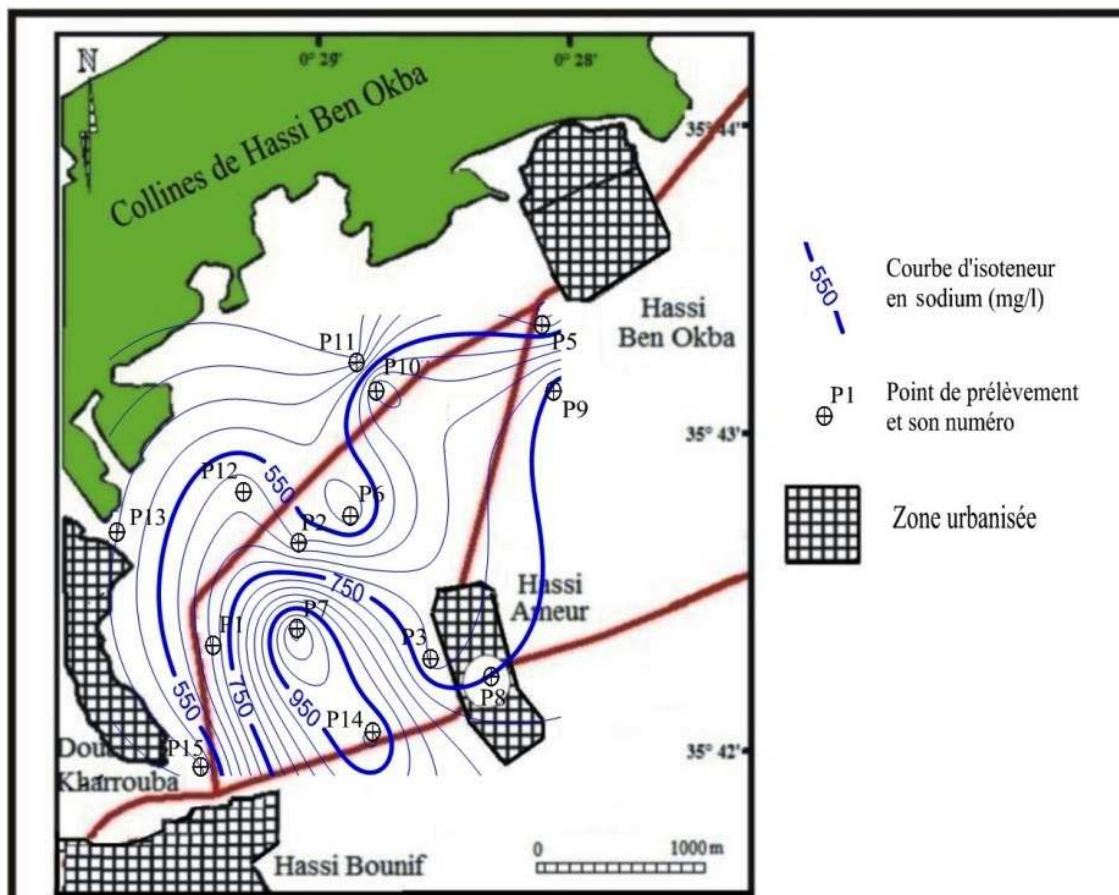


Figure n° 25 : Carte d'isoteneurs en sodium (Na^+) (mg/l).

II.3.4. Les anions :

II.3.4.1. Les chlorures :

Les chlorures ont deux sources : les apports atmosphériques et la dissolution des évaporites salées. Dans les régions littorales, les pluies apportent des chlorures d'origine maritime qui peuvent s'accumuler en surface par évaporation puis être entraînés dans les aquifères. La dissolution des évaporites (Na Cl) est aisée et sont présentes en grandes concentrations dans les eaux.

L'observation de la carte d'isoteneurs en chlorures (fig. n° 26) de notre secteur indique que la carte présente des similitudes avec celle de la minéralisation, c'est-à-dire que les chlorures influent sur la minéralisation totale.

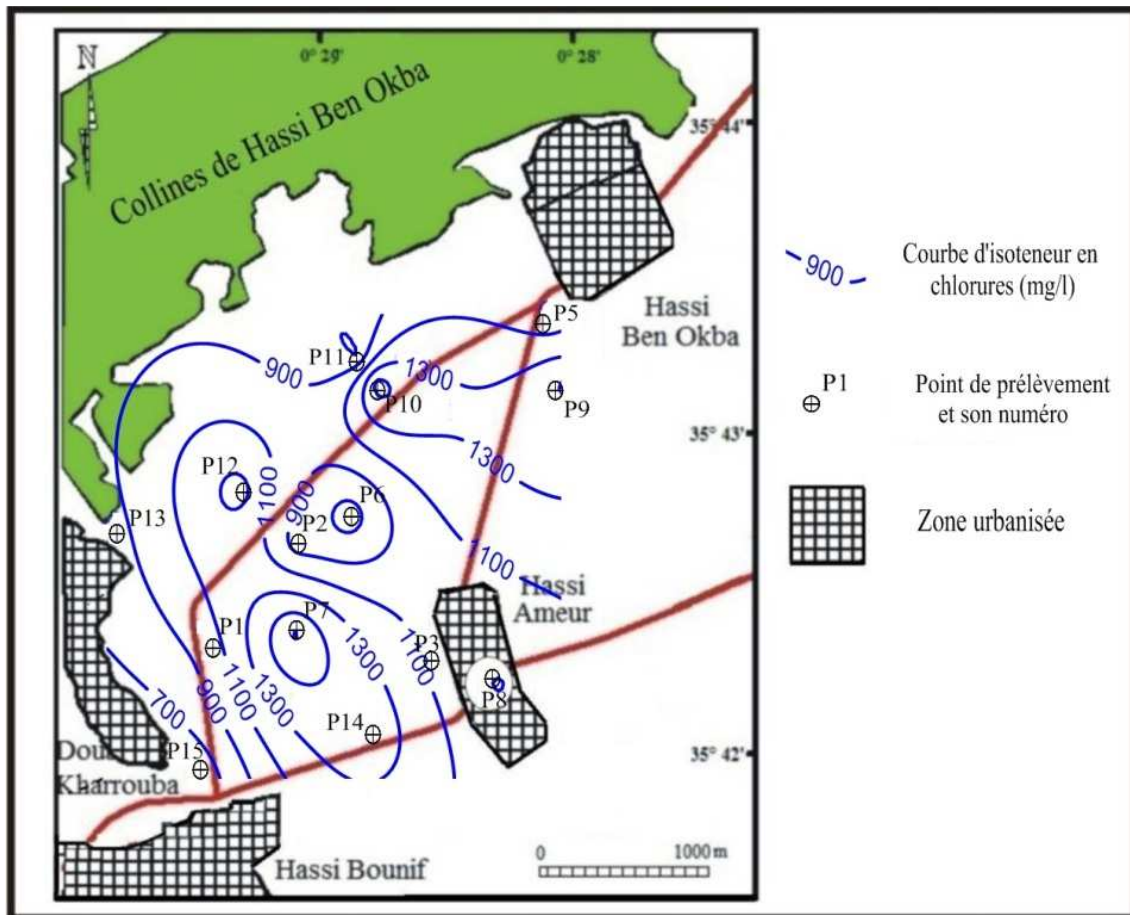


Figure n° 26 : Carte d'isoteneurs en chlorures (CI) (mg/l).

II.3.4.3. Les sulfates :

Les eaux naturelles contiennent, pratiquement, toujours des ions sulfates dans des proportions très variables (d'origine météorique). Leur présence résulte de la légère solubilité des sulfates de calcium dans les roches gypseuses et de l'oxydation des sulfures se trouvant dans les roches. Cependant, ils peuvent aussi provenir de l'oxydation dans l'atmosphère, de l'anhydrite sulfureuse par combustion des hydrocarbures (Bakalowicz, 1979).

Sur la carte de la figure n° 27, la valeur maximale de teneur en SO_4 est enregistrée au point P9 (890 mg/l) qui se trouve à l'extrémité Nord-est de la zone d'étude.

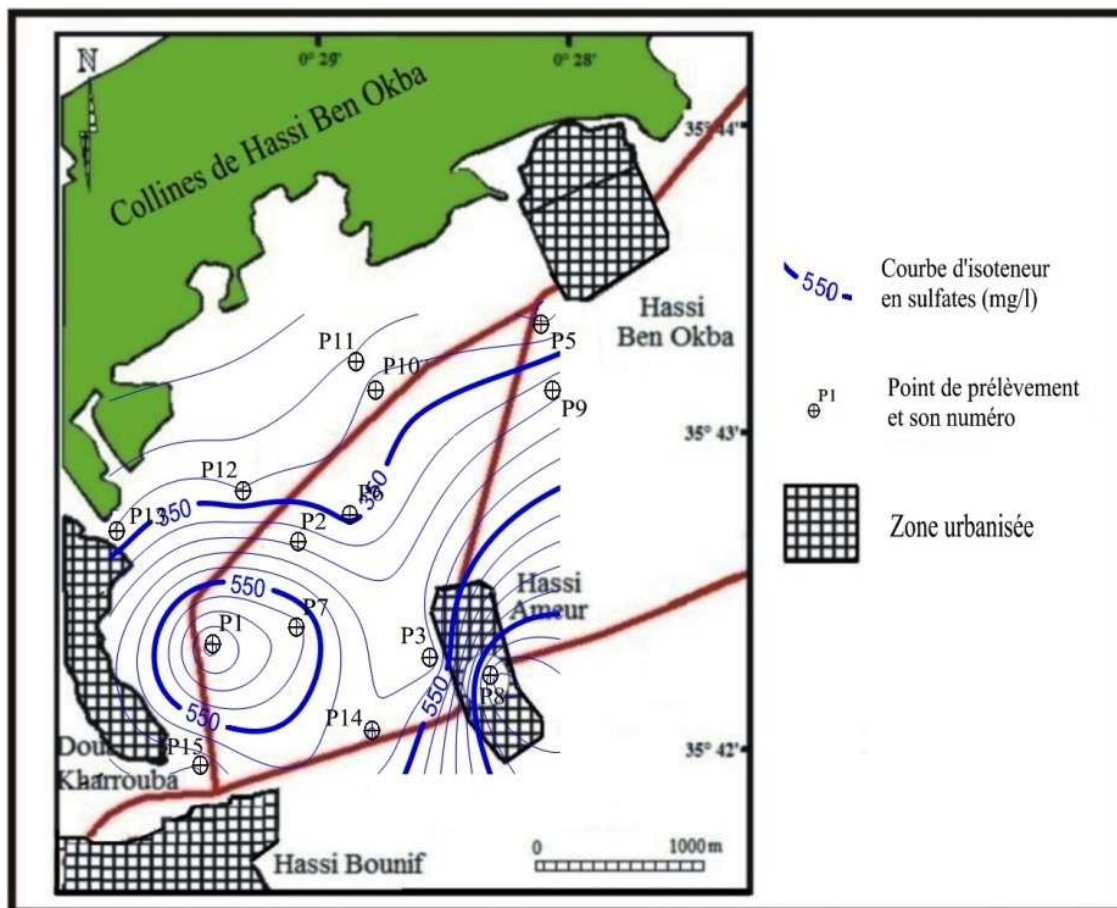


Figure n° 27 : Carte d'isoteneurs en sulfates (SO_4^{2-}) (mg/l).

II.3.5. Dureté et alcalinité des eaux :

II.3.5.1. La dureté :

La dureté d'une eau est un caractère naturel correspondant à la présence de sels de calcium et de magnésium dans l'eau. Une eau trop dure constitue un risque important d'entartrage des canalisations. En fonction de leur dureté, définie par le Titre Hydrotimétrique (TH), les eaux peuvent être classées suivant les indications du tableau n° 10.

Tableau n° 10 : Les classes des eaux selon la dureté.

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

Concernant notre secteur d'étude, les valeurs de TH calculées de l'ensemble des points de prélèvement (tableau n° 11) montrent qu'on est en présence d'eaux très dures.

Tableau n° 11 : Valeurs de TH et du TAC calculés.

Points d'eau	TH calculé (°F)	TAC
P1	101	22.2
P2	79	44.4
P3	104	43.8
P5	88	20.45
P6	52	38.8
P7	116	44.4
P8	92	37.1
P9	121	27.75
P10	137	22.2
P11	75	28.25
P12	117	23.25
P13	81	23.25
P14	96	57.65
P15	58	34.9

II.3.5.2. L'alcalinité :

L'alcalinité d'une eau est liée à la présence de bases fortes CO_3 et OH et de bases faibles HCO_3 . Elle est toujours en relation directe avec le PH. On distingue :

- le Titre Alcalimétrique Complet (TAC) : il représente la somme des bases (fortes et faibles),

- le Titre Alcalimétrique (TA) : il concerne les bases fortes, lorsque le PH est supérieur à 8.3.

Pour les eaux étudiées, le TA est égal à zéro du fait que le PH ne dépassait pas 8.3. Les valeurs de TAC (tableau n° 11) varient de 20.45° F au P5 à 57.65° F au P14.

II.4. Faciès hydrochimiques:

Les faciès ainsi que les principaux sous faciès hydrochimiques des eaux échantillonnées ont été déterminés à partir de leurs teneurs en milliequivalent/l et de leurs formules caractéristiques (tableau n° 12 et 13).

Tableau n° 12 : Résultats des analyses chimiques en r (meq/l).

N°	rCa ⁺⁺	rMg ⁺⁺	rNa ⁺	r K ⁺	rCl ⁻	rSO ₄ ⁻	rHCO ₃ ⁻	rNO ₃ ⁻
1	11.66	8.54	28.6	0.55	27.44	15.16	4.44	1.49
2	3.81	11.94	25.6	0.1	23.12	8.7	8.88	0.88
3	6.36	14.4	30.2	0.8	29.7	9.32	8.77	1.56
5	13.78	3.79	20	0.11	26.32	5.35	4.1	1.61
6	5.51	4.79	20.8	0.13	16.92	7.02	7.77	0.8
7	8.48	14.75	47.5	0.3	48.69	12.75	8.88	0.94
8	8.26	10.12	33	1.2	25	18.54	7.43	1.8
9	11.66	12.58	33.8	0.17	42.67	8.62	5.55	1.35
10	19.71	7.76	30.2	0.15	44.55	6.7	4.44	1.51
11	9.54	5.4	16.3	0.14	19.36	5.64	5.66	0.88
12	17.63	5.87	27	0.17	38.91	6.41	4.66	1.62
13	13.14	3.02	19.9	0.13	22.93	6.31	4.66	2.06
14	5.08	14.11	43.5	0.42	40.23	9.72	11.54	0.74
15	5.08	6.43	18.8	0.2	14.47	8.62	6.99	1.15

Tableau n° 13 : Faciès caractéristiques des échantillons prélevés.

N°	Contexte	Cations	Anions
P1	Zone Industrielle	$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$
P2	Zone Industrielle	$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{--} > \text{NO}_3^-$
P3	Zone Industrielle	$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$
P5	Zone agricole	$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$
P6	Zone Industrielle	$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{--} > \text{NO}_3^-$
P7	Zone Industrielle	$\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$
P8	Milieu urbain	$\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$
P9	Zone agricole	$\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$
P10	Zone agricole	$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$
P11	Zone agricole	$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{--} > \text{NO}_3^-$
P12	Zone agricole	$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$
P13	Zone agricole	$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$
P14	Zone Industrielle	$\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{--} > \text{NO}_3^-$
P15	Zone agricole	$\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$

L'ensemble des eaux présente un faciès chloruré sodique. Par ailleurs, cette classification fait ressortir une prédominance variable entre les cations Ca^{++} et Mg^{++} et les anions HCO_3^- , et SO_4^{--} . Ceci détermine l'existence de quatre sous-faciès :

- Un sous-faciès sulfaté calcique aux points : P1, P3, P5, P10, P12 et P13.
- Un sous-faciès sulfaté magnésien aux points : P7, P8, P9 et P15.
- Un sous-faciès bicarbonaté calcique aux points : P2, P6 et P11.
- Un sous-faciès bicarbonaté magnésien au point P14.

Les traits hydro chimiques des eaux analysées ont été également représentés sur des graphiques qui permettent une meilleure étude comparative entre échantillons.

II.4.1. Interprétation par diagramme Schoeller-Berkaloff :

Il s'agit d'un diagramme logarithmique qui permet de :

- représenter un ensemble d'eaux aux concentrations différentes avec une bonne précision.

- effectuer directement la conversion des résultats d'analyse de milligrammes par litre (mg/l) en milliéquivalent par litre (meq/l).

Les valeurs des analyses ont été reportées sur le diagramme (fig. n° 28 et 29). L'interprétation permet de confirmer et de mieux faire ressortir les faciès et sous-faciès prédéterminés.

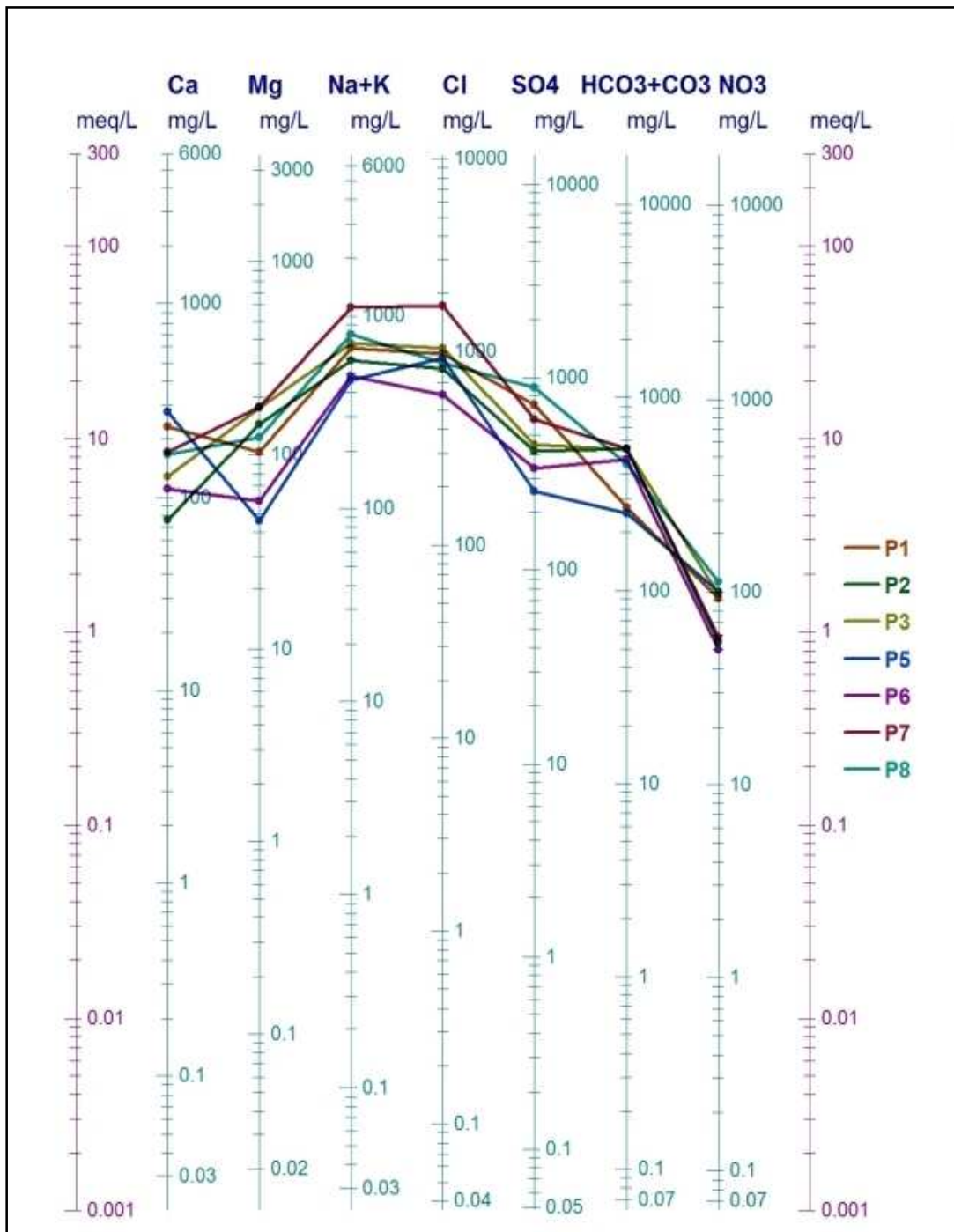


Figure n° 28 : Représentation graphique d'après le diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux échantillonnées (P1 à P8).

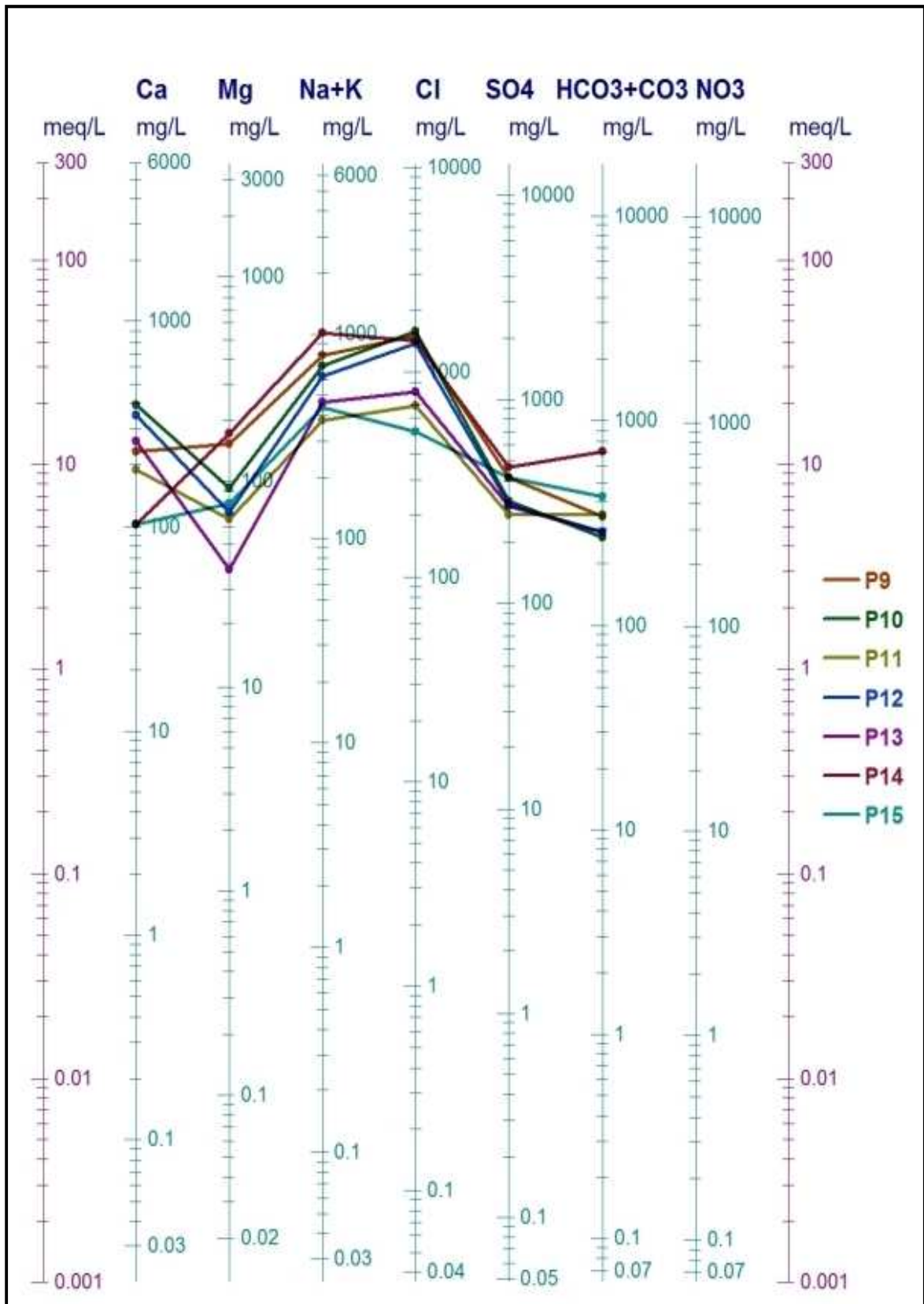


Figure n° 29 : Représentation graphique d'après le diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux échantillonnées (P9 à P15).

II.4.2. Interprétation par diagramme Piper :

Cette méthode consiste à représenter sur deux triangles les pourcentages des quantités en réactions (r%) de chaque cation et anion.

Les deux points sont reportés sur un losange en un seul point qui représente la famille chimique de l'eau. Ce diagramme présente l'avantage de regrouper un grand nombre d'analyses.

Les valeurs des analyses ont été reportées sur le diagramme (fig. n° 30 et 31). L'interprétation permet de distinguer un faciès d'eau chloruré sodique.

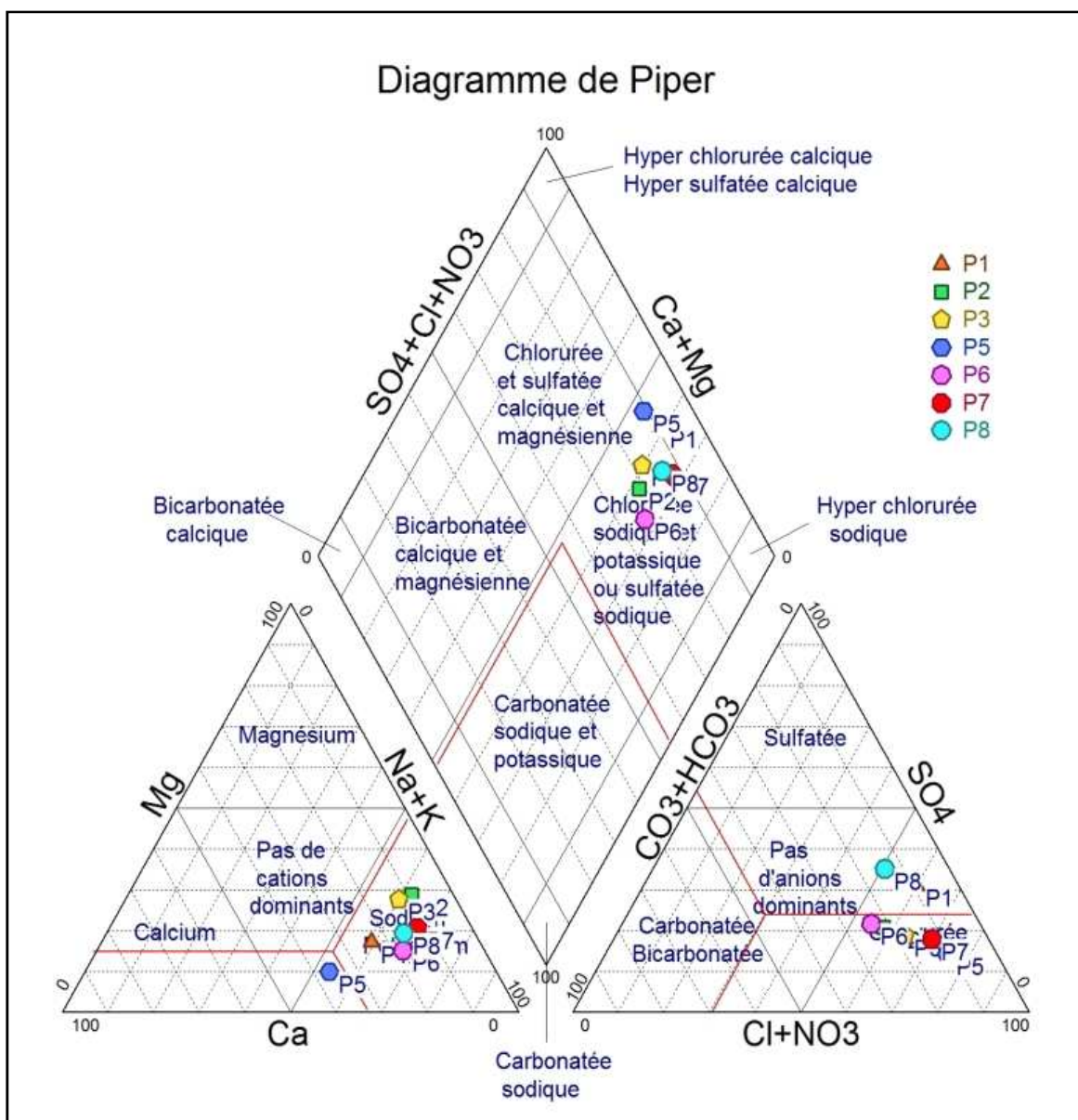


Figure n° 30 : Représentation graphique d'après le diagramme de Piper des eaux échantillonnées (P1 à P8).

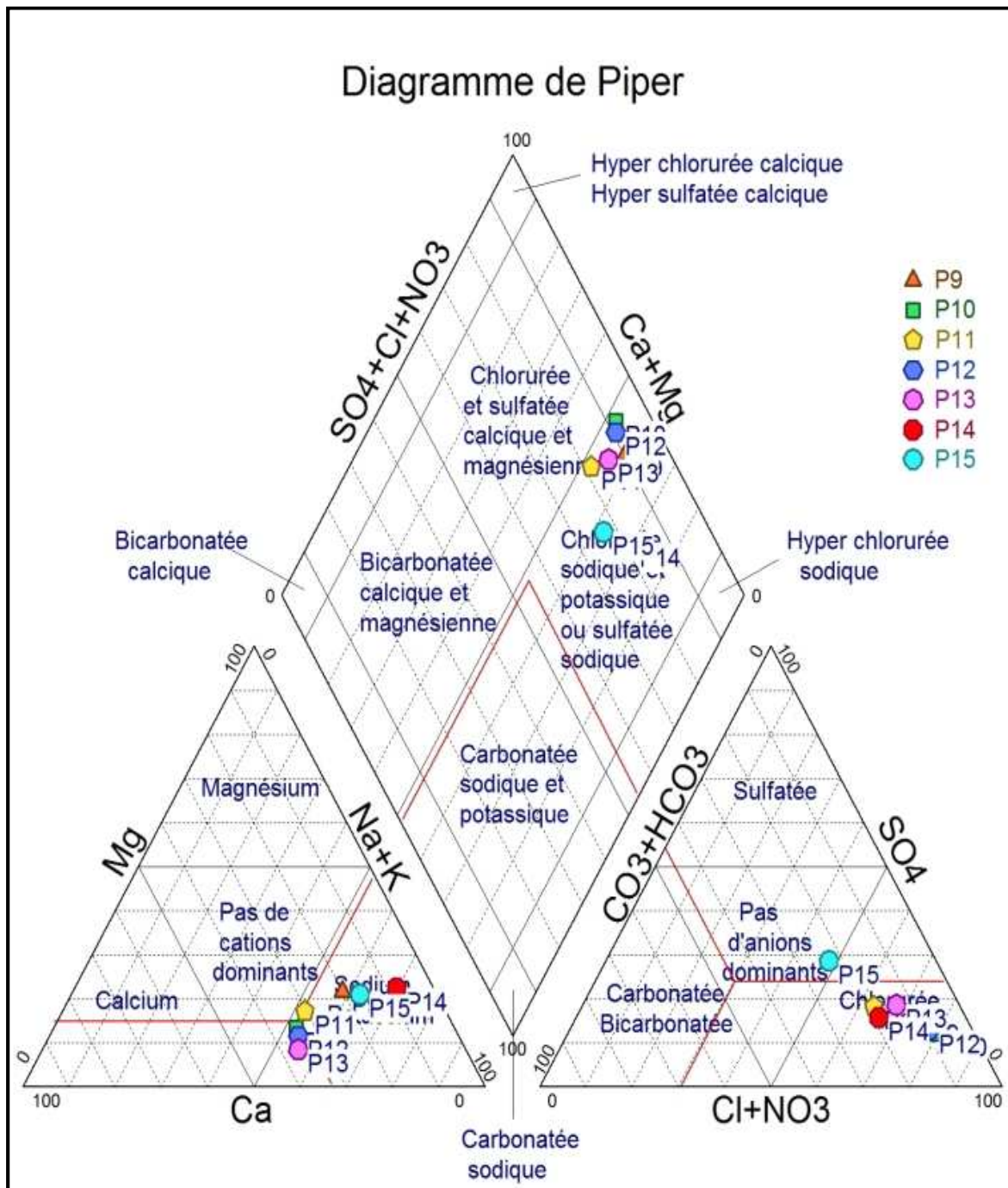


Figure n° 31 : Représentation graphique d'après le diagramme de Piper des eaux échantillonnées (P9 à P15).

II.5. Indices de saturation :

L'état thermodynamique du milieu aquifère par rapport à certains minéraux peut être déterminé par l'étude de leurs indices de saturation et d'équilibre.

L'état de saturation (I.S) est défini par le logarithme du rapport des produits d'activité ionique (PAI) sur le produit de solubilité (K) lors de l'échantillonnage :

$$IS = \log \frac{PAI}{K}$$

Nous prenons en considération la présence de calcite (CaCO_3) en solution par exemple :



Donc le produit d'activité ionique :

$$PAI = a\text{Ca}^{2+} \cdot a\text{CO}_3^{2-}$$

$$(a\text{Ca}^{2+} = \text{activité de l'ion Ca}^{2+})$$

A l'état d'équilibre thermodynamique le produit de solubilité de la calcite (KCaCO_3) est

$$\text{KCaCO}_3 = \frac{a\text{Ca}^{2+} \cdot a\text{CO}_3^{2-}}{a\text{CaCO}_3}$$

Alors, l'indice de saturation exprimé est :

$$ISc = \log \frac{PAI}{\text{KCaCO}_3}$$

Si,

$IS = 0$, l'eau est saturée vis-à-vis de la calcite,

$IS > 0$, l'eau est sursaturée par rapport à la calcite,

$IS < 0$, l'eau est sous-saturée vis-à-vis de la calcite.

De la même manière, les indices de saturation vis-à-vis du gypse, de l'anhydrite, de la calcite, de la dolomite, de l'aragonite sont calculés.

Pour la zone d'étude, le calcul des indices de saturation a été obtenu en utilisant le logiciel "Diagramme 54", (R. Simler, version 5.3, 2010). Les résultats sont représentés dans le tableau n° 14.

Tableau n° 14 : Indices de saturation des eaux de la zone d'étude.

points d'eau	Cl-	Is Calcite	Is Dolomite	Is Aragonite	Is Gypse	Is Anhydrite
P1	974	0.57	0.49	0.43	-0.35	-0.60
P2	821	0.64	1.22	0.49	-1.05	-1.30
P3	1054	0.38	0.63	0.24	-0.82	-1.06
P5	934	0.17	-0.73	0.02	-0.68	-0.92
P6	601	0.33	0.08	0.19	-0.93	-1.17
P7	1729	0.50	0.77	0.36	-0.61	-0.85
P8	888	0.26	0.09	0.12	-0.43	-0.67
P9	1515	0.35	0.18	0.20	-0.62	-0.87
P10	1582	0.30	-0.27	0.16	-0.50	-0.73
P11	687	0.52	0.30	0.37	-0.79	-1.03
P12	1381	0.41	-0.14	0.27	-0.54	-0.78
P13	814	0.35	-0.46	0.20	-0.63	-0.87
P14	1428	0.48	0.93	0.33	-0.93	-1.16
P15	514	0.27	0.13	0.12	-0.88	-1.12

Les résultats figurés dans le tableau n° 14 montrent que :

- Les eaux de zone d'étude sont sursaturées par rapport à la calcite et l'aragonite.
- Les eaux de zone d'étude sont sous-saturées par rapport au gypse et à l'anhydrite.
- Les eaux de zone d'étude sont sous-saturées par rapport à la dolomite, pour (P5, P10, P12 et P13). Par contre, elles sont sursaturées par rapport à la dolomite pour le reste de points de prélèvement.

Les chlorures étant les principaux éléments conditionnant la minéralisation des eaux, nous avons représenté sur les digrammes de la figure n° 32, la variation des indices de saturation de ces différents minéraux en fonction des chlorures.

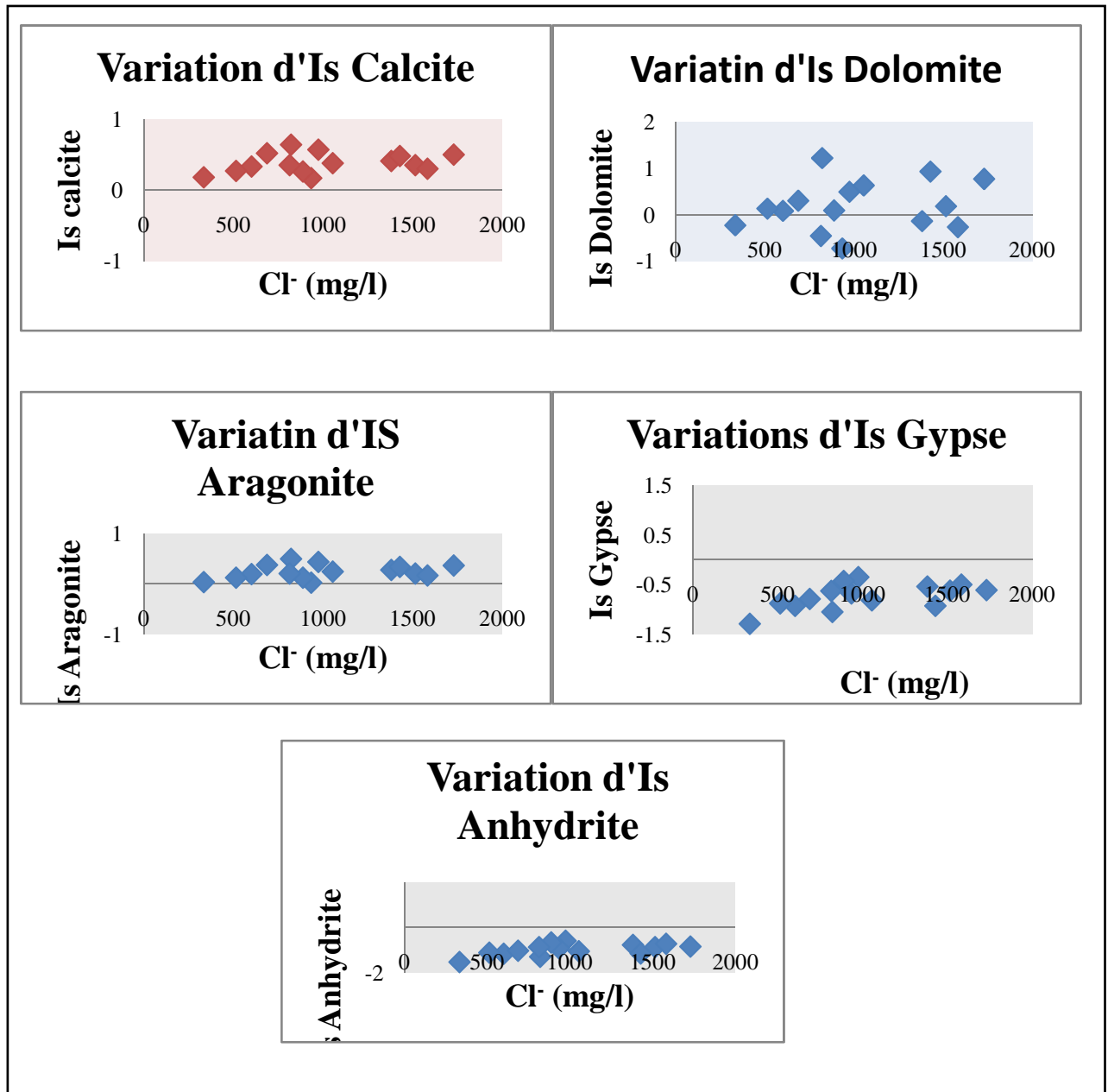


Figure n° 32 : Variations d'Is de saturation.

II.6. Etude des valeurs relatives

II.6.1. Indice d'échange de base (i.e.b) :

L'indice d'échange de base proposé par Schoeller en 1934, est défini comme le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation suivante :

$$\text{i. e. b} = \frac{r\text{Cl} - r(\text{Na} + \text{K})}{r\text{Cl}}$$

Cette capacité d'échange est particulièrement élevée pour les argiles.

- Si l'i.e.b est négatif, les ions Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau sont échangés contre les ions K^+ et Na^+ des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b est positif, les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont remplacés par les ions Mg^{++} et Ca^{++} des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b = 0, il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celle du terrain encaissant.

L'utilisation de cet indice est importante car il met en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain.

L'interprétation des données des i.e.b calculés (tableau n° 15) montre que les eaux des points d'eau, P1, P2, P3, P6, P8 et P15 ont un i.e.b négatif, donc les eaux échangent des ions (Ca, Mg) contre des ions Na et K du terrain.

Les points d'eau, P5, P7, P9, P10, P11, P12, P13 et P14, présentent un i.e.b positif. Des ions sodium et potassium de l'eau sont échangés contre des ions calcium et magnésium du terrain.

Tableau n° 15 : Les valeurs des indices d'échange de base des différents points d'eau.

Point d'eau	i.e.b	Point d'eau	i.e.b
P1	-0.06	P9	0.2
P2	-0.11	P10	0.31
P3	-0.04	P11	0.15
P5	0.23	P12	0.30
P6	-0.23	P13	0.12
P7	0.01	P14	0.98
P8	-0.36	P15	-0.31

II.7. Traitement statistique des données hydrochimiques :

La composition chimique des eaux souterraines est fonction de plusieurs facteurs, notamment la nature géologique des formations à travers lesquelles l'eau a circulée et séjournée.

Dans le but de déterminer les paramètres pouvant influencer le comportement chimique des eaux nous avons utilisé l'analyse en composantes principales.

Nous avons au préalable effectué une étude statistique par distribution des éléments sur papier Gausso-logarithmique et par analyse en composante principale sur les 23 échantillons.

Nous avons pris en considération les éléments majeurs suivants : Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , K^{+} , Cl^{-} , SO_4^{-2} , HCO_3^{-} , ainsi que la minéralisation. L'analyse en composante principale a été effectuée par utilisation d'un logiciel appelé XLSTAT (Addinsoft, 2012).

II.7.1. Etude statistique en composante principale :

a)- statistiques élémentaires :

Dans le tableau n° 16 nous avons présenté les minimums, maximums, moyennes et les écarts-types de la série de différents éléments chimiques.

Tableau n° 16 : Calcul des moyennes et des écarts-types de la série.

Variables	Minimum	Maximum	Moyennes (mg/l)	Ecart-types de la série
Ca^{+2}	25.000	471.000	199.391	114.596
Mg^{+2}	37.000	498.000	150.174	107.285
Na^{+}	356.000	4485.000	988.217	965.127
K^{+}	4.000	56.000	15.913	14.501
Cl^{-}	490.000	7881.000	1626.652	1641.964
SO_4^{-2}	257.000	1535.000	546.783	344.605
HCO_3^{-}	250.000	704.000	421.000	126.319
Min	1723.000	15844.000	4201.261	3263.104

b)- Matrice de corrélation :

Dans le tableau n° 17, nous avons figuré les valeurs des coefficients de corrélation entre les teneurs des différents éléments majeurs.

Tableau n° 17 : Matrice de corrélation des éléments chimiques.

	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	Min
Ca ⁺²	1							
Mg ⁺²	0.224	1						
Na	0.496	0.925	1					
K ⁺	0.273	0.760	0.755	1				
Cl ⁻	0.568	0.909	0.989	0.711	1			
SO ₄ ⁻⁻	0.365	0.858	0.917	0.876	0.869	1		
HCO ₃ ⁻	-0.394	0.572	0.430	0.430	0.352	0.436	1	
Min	0.545	0.916	0.994	0.734	0.993	0.897	0.386	1

L'analyse du tableau n° 17 – matrice de corrélation- donne les résultats suivants :

- Le sodium est bien corrélé avec le magnésium ($r = 0.925$), et également avec les chlorures ($r = 0.989$), les sulfates ($r = 0.858$) et la minéralisation ($r = 0.916$).
- Les sulfates sont bien corrélés avec le magnésium ($r = 0.858$), le potassium ($r = 0.876$), et les chlorures ($r = 0.869$).
- Le potassium est moyennement corrélé avec le magnésium ($r = 0.760$) et le sodium ($r = 0.755$).
- La minéralisation est bien corrélée avec le magnésium ($r = 0.916$), les chlorures ($r = 0.933$) et les sulfates ($r = 0.897$), et moyennement corrélée avec le potassium ($r = 0.734$).

II.7.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) :

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique multidimensionnelle essentiellement descriptive, son objectif est la représentation sous forme graphique d'un maximum d'informations contenues dans un tableau de données.

L'ACP sert à mettre en évidence des similarités ou des oppositions entre variables et à repérer les variables les plus corrélées entre elles.

II.7.2.1. Principe de l'ACP :

L'ACP consiste à remplacer une famille de variables par de nouvelles variables de variance maximale, non corrélées deux à deux et qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine. Ces nouvelles variables, appelées composantes principales, définissent des plans factoriels qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'interprétation des résultats se restreint généralement aux deux premiers plans

factoriels, sous réserve que ceux-ci expliquent la majeure partie de la variance du nuage des variables initiales.

Les facteurs sont des combinaisons linéaires des variables de départ. Chaque variable contribuant au facteur intervient avec un coefficient dit "vecteur propre". Le premier axe factoriel est celui qui explique le plus grand pourcentage de variance totale, le second explique le plus grand pourcentage de variance résiduelle. Pour être significatif, le cumul de l'inertie des axes doit être supérieur à 65%. (In M. I. Hassani, 1987).

II.7.2.2. Application de l'ACP :

a. Diagonalisation (étude des valeurs propres) :

Une valeur propre représente la variation des individus sur l'axe correspondant. Dans le but de faciliter leur interprétation, le tableau n° 18 met en évidence les valeurs propres de chaque axe factoriel, ces valeurs sont exprimées en pourcentage de variance totale ainsi que leur cumul.

Le premier axe a une valeur propre égale à 5.8, il explique 72.46 % de la variance totale. Le second axe a une valeur propre égale à 1.48 : 18.53 % de la variance totale. Ces deux premiers axes englobent l'ensemble de l'information avec 91 % de la variance totale. Ces derniers sont jugés suffisants pour une approche d'analyse des variables et des individus. On peut aussi présenter l'ensemble d'axes sous forme d'histogramme d'information de chaque axe (fig. n° 33).

Tableau n° 18 : Valeurs propres et pourcentage de la variance expliquée par les axes principaux.

L'axe	F1	F2
Valeur propre	5.797	1.482
Variabilité (%)	72.463	18.531
% cumulé	72.463	90.994



Figure n° 33 : Histogramme des valeurs propres.

Tableau n° 19 : Vecteurs propres

(coefficients des variables centrées réduites dans l'équation linéaire des axes principaux).

variables	AXE 1	AXE 2
Ca^{+2}	0.188	0.699
Mg^{+2}	0.391	-0.162
Na^+	0.410	-0.184
K^+	0.349	-0.101
Cl^-	0.403	0.127
SO_4^{--}	0.393	-0.035
HCO_3^-	0.197	-0.667
Min	0.407	0.098

b. Etude des variables :

Le cercle de corrélation correspond à une projection des variables initiales sur un plan à deux dimensions constitué par les deux premiers facteurs. Lorsque deux variables sont loin du centre du graphique, alors si elles sont : proches les unes par rapport aux autres, alors elles sont significativement positivement corrélées (r proche de 1), orthogonales les unes par rapport aux autres, alors elles sont significativement non-corrélées (r proche de 0), symétriquement opposées par rapport au centre, alors elles sont significativement négativement corrélées (r proche de -1).

Lorsque les variables sont relativement proches du centre du graphique, alors toute interprétation est hasardeuse, et il est nécessaire de se référer à la matrice de corrélations à d'autres plans factoriels pour interpréter les résultats.

Dans notre exemple, la figure n° 34 (cercle des corrélations), nous permet de déduire que :

- les éléments Mg, Na, K, Cl, SO₄ et Min sont significativement corrélés positivement à l'axe 1. Ces éléments sont aussi corrélés entre eux ;
- Le HCO₃ est significativement corrélé négativement à l'axe 2 ;
- Le Ca est significativement corrélé positivement à l'axe 2.

Le cercle des corrélations est aussi utile pour interpréter la signification des axes. Dans notre cas, l'axe F1 peut être lié au sodium ou à la minéralisation. L'axe 2 est lié au calcium.

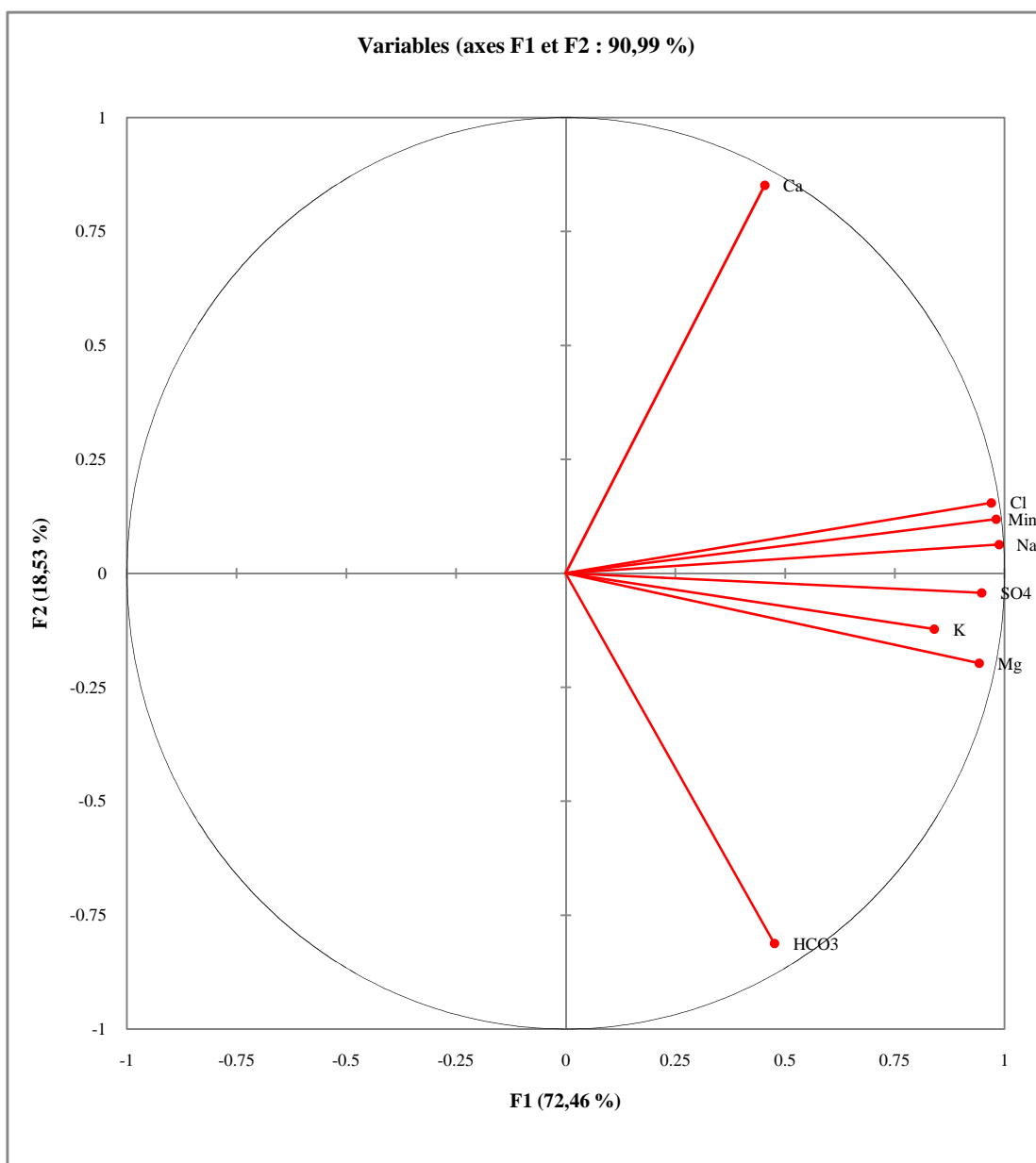


Figure n° 34 : Cercle des corrélations : axes 1 et 2.

Pour confirmer le fait qu'une variable est fortement liée à un facteur, il suffit de consulter le tableau n° 20 des cosinus : plus le cosinus est élevé (en valeur absolue), plus la variable est liée à l'axe. Plus le cosinus est proche de zéro, moins la variable est liée à l'axe.

Les résultats sont résumés dans le tableau 20. Ce tableau précédent nous a permis de déduire que les éléments Mg, Na, Min, Cl, Cond et Rs contribuent à la formation de l'axe 1. Le Na est fortement lié à cet axe. Le Ca est fortement lié à l'axe 2.

Tableau n° 20 : Etude des variables.

1^{er} colonne : Corrélation entre les variables et les axes principaux.

2^{ème} colonne : Corrélation au carré.

VARIABLES	COMPOSANTES PRINCIPALES			
	AXE 1		AXE 2	
Ca⁺²	0.453	0.205	0.851	0.725
Mg⁺²	0.942	0.887	-0.197	0.039
Na⁺	0.987	0.975	0.063	0.004
K⁺	0.840	0.705	-0.122	0.015
Cl⁻	0.970	0.940	0.155	0.024
SO₄⁻²	0.947	0.897	-0.043	0.002
HCO₃⁻	0.475	0.226	-0.812	0.660
Min	0.981	0.962	0.119	0.014

b. Etudes des individus :

Tableau n° 21 : Etude des individus.

1^{er} Colonne : coordonnées des individus sur les axes principaux.2^{ème} colonne : cosinus carrés (qualité de présentation).

N°	Echantillons	AXE 1		AXE 2	
01	P 1	-0.428	0.183	0.932	0.868
02	P 2	-1.057	1.117	-1.451	2.105
03	P 3	-0.003		-1.290	1.664
04	P 5	-1.774	3.147	1.547	2.393
05	P 6	-1.677	2.812	-0.770	0.592
06	P 7	0.360	0.129	-0.833	0.693
07	P 8	0.652	0.425	-0.700	0.490
08	P 9	-0.617	0.38	0.698	0.487
09	P 10	-0.837	0.700	2.177	4.739
10	P 11	-1.723	2.968	0.433	0.187
11	P 12	-1.078	1.162	1.847	3.411
12	P 13	-1.758	3.090	1.267	1.605
13	P 14	0.206	0.042	-2.183	4.765
14	P 15	-1.603	2.569	-0.644	0.414
15	P 16	1.501	2.253	-2.101	4.414
16	P 17	2.531	6.405	-0.790	0.624
17	P 18	4.583	21.583	0.363	0.131
18	P 19	8.674	75.238	1.223	1.495
19	P 20	0.241	0.058	0.521	0.271
20	P 21	-1.677	2.812	-0.867	0.751
21	P 22	-1.429	2.042	0.987	0.974
22	P 23	-1.650	2.722	0.508	0.258
23	P 24	-1.439	2.070	-0.872	0.760

La projection des variables (tableau n° 20) et des individus (tableau n° 21) sur le plan (F1-F2), nous permet d'avoir une répartition par rapport à l'axe 1 (lié au Na), selon cinq groupes (figure n° 35) :

Le premier groupe (I) concerne les points ; P2, P6, P15, P21 et P24. Ce groupe est caractérisé par des minéralisations s'échelonnent entre 1723 et 2633 mg/l. Il est plus influencé par le pôle bicarbonaté ($\text{HCO}_3 > 393$ mg/l).

Le deuxième groupe (II), englobe les points ; P5, P11, P13, P22 et P23. Il se caractérise par des minéralisations s'échelonnant entre 2209 et 2657 mg/l, mais influencées par le pôle calcique (Ca entre 148 et 276 mg/l).

Le troisième groupe (III), englobe les points ; P1, P9, P10, P12, P20. Ce groupe est caractérisé par des minéralisations qui varient entre 3142 et 4509 mg/l, mais plus influencés par le pôle calcique de l'axe 2 ($\text{Ca} > 231 \text{ mg/l}$).

Le quatrième groupe (IV), qui englobe les points ; P3, P7, P8, P14, P16 et P17. Ces puits sont caractérisés par des minéralisations s'échelonnant entre 3120 et 7028 mg/l, mais influencées par le pôle bicarbonaté de l'axe 2 ($\text{HCO}_3 > 453 \text{ mg/l}$).

Le cinquième groupe (V) de points : P18 et P19. Ces points d'eau sont caractérisés par une minéralisation dépassant la valeur 11 050 mg/l.

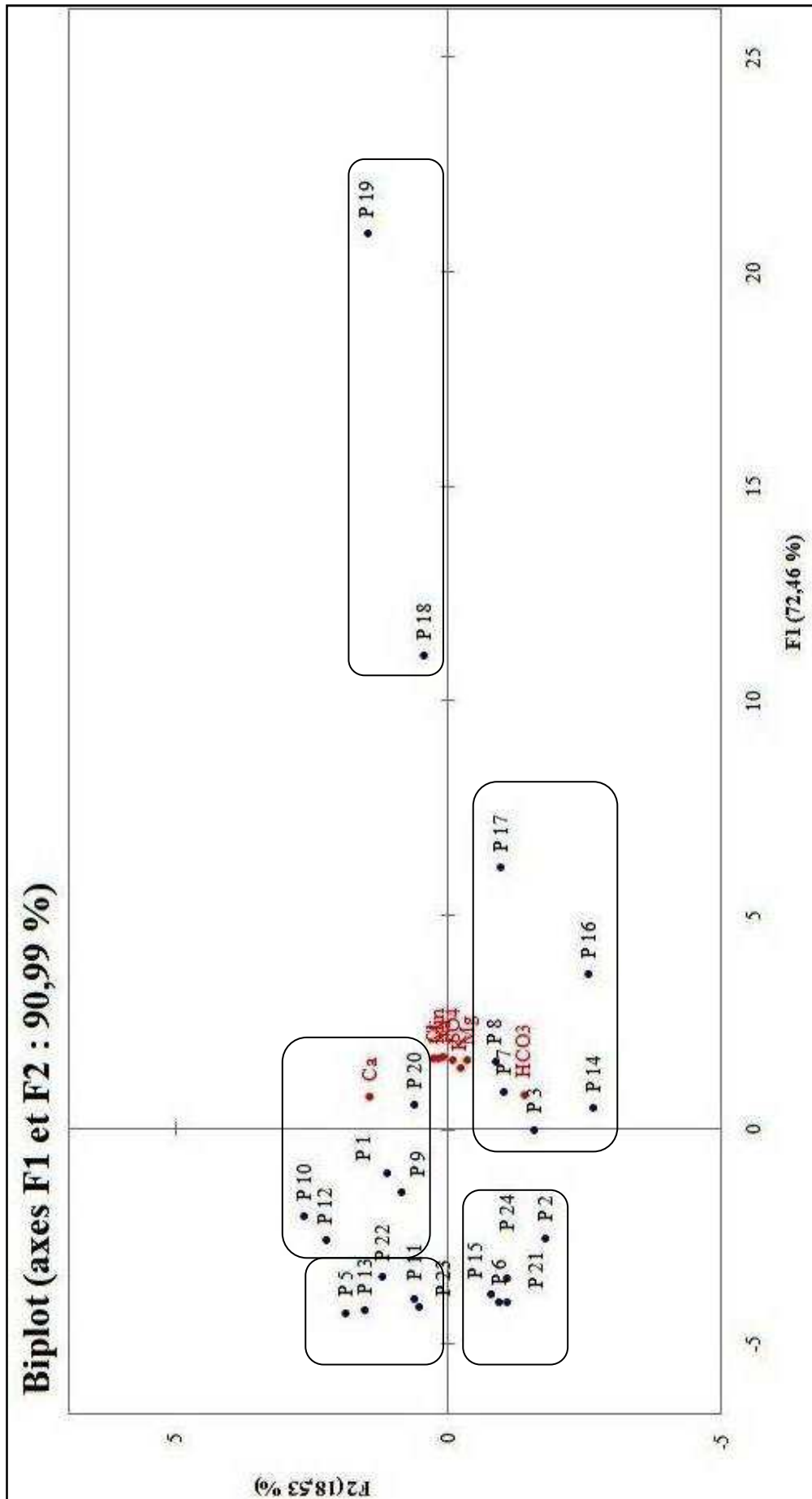


Figure n° 35 : Répartition des variables et des individus dans le plan formé par les axes F1 et F2.

II.7.3. Classification Ascendante Hiérarchique

Classifier, c'est regrouper entre eux des objets similaires selon tel ou tel critère. Les diverses techniques de classification (ou d'"analyse typologique", de "taxonomie", ou "taxinomie" ou encore "analyse en clusters" (amas)) visent toutes à répartir n individus, caractérisés par p variables X_1, X_2, \dots, X_p en un certain nombre m de sous-groupes aussi homogènes que possible.

On distingue deux grandes familles de techniques de classification :

- La classification non hiérarchique ou partitionnement, aboutissant à la décomposition de l'ensemble de tous les individus en m ensembles disjoints ou classes d'équivalence ; le nombre m de classes est fixé.

- La classification hiérarchique : pour un niveau de précision donné, deux individus peuvent être confondus dans un même groupe, alors qu'à un niveau de précision plus élevé, ils seront distingués et appartiendront à deux sous-groupes différents. (F. G. Carpentier, 2006).

II.7.3.1. Avantages de la classification ascendante hiérarchique :

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classification qui présente les avantages suivants :

On travaille à partir des dissimilarités entre les objets que l'on veut regrouper. On peut donc choisir un type de dissimilarité adapté au sujet étudié et à la nature des données.

L'un des résultats est le dendrogramme, qui permet de visualiser le regroupement progressif des données. On peut alors se faire une idée d'un nombre adéquat de classes dans lesquelles les données peuvent être regroupées.

II.7.3.2. Principe de la méthode :

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classification itérative dont le principe est simple.

On commence par calculer la dissimilarité entre les N objets.

Puis on regroupe les deux objets dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux objets.

On calcule ensuite la dissimilarité entre cette classe et les N-2 autres objets en utilisant le critère d'agrégation. Puis on regroupe les deux objets ou classes d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation.

On continue ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés.

Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus.

Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions. On peut alors choisir une partition en tronquant l'arbre à un niveau donné, le niveau dépendant soit des contraintes de l'utilisateur, soit de critères plus objectifs.

II.7.3.3. Méthode d'agrégation pour la Classification Ascendante Hiérarchique :

Plusieurs méthodes d'agrégation sont disponibles ; Méthode de Ward (inertie), méthode de Ward (variance), lien complet, lien simple, lien fort, lien flexible, lien moyen et lien proportionnel

II.7.3.4. Résultats pour la Classification Ascendante Hiérarchique dans le secteur d'étude :

Les données utilisées dans cette classification correspondent aux données hydrochimiques de 23 points (14 points de la campagne de prélèvement de la période 24/25 février 2012, et les données des prélèvements effectués à différentes époques, au sein de différents points d'eau situés dans certaines unités industrielles « données ANRH »).

Le but est ici de créer des groupes homogènes d'individus. Ces données ont déjà été utilisées pour l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

L'application de la méthode CAH, au moyen de XLSTAT, nous a permis de faire ressortir beaucoup de résultats ; statistiques des nœuds, diagramme des niveaux, dendrogrammes, barycentres des classes, distances entre les barycentres des classes, objets centraux, distances entre les objets centraux, résultats par classe et les résultats par objet.

Parmi les résultats de la classification CAH, on peut analyser les deux dendrogrammes qui présentent la composition des quatre groupes et comment les 23 individus ont eux-mêmes été regroupés.

Le dendrogramme complet (fig. n° 36), permet de visualiser le regroupement progressif des objets où le trait en pointillé marque le niveau auquel est effectuée la troncature.

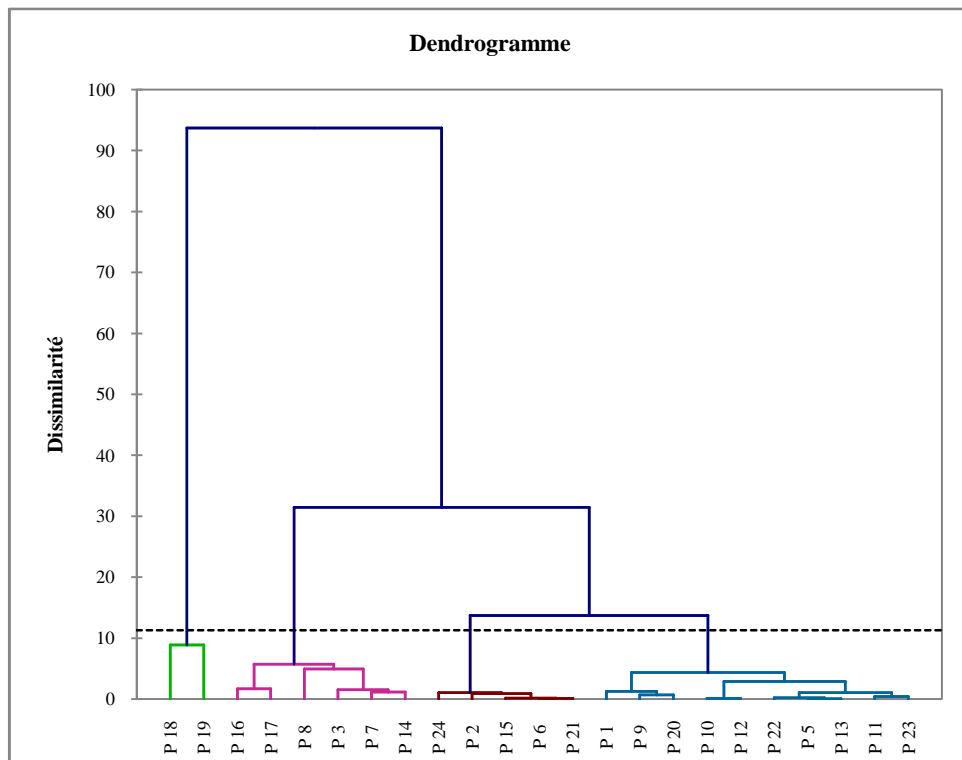


Figure n° 36 : Dendrogramme complet visualisant le regroupement progressif des objets.

Le dendrogramme tronqué (fig. n° 37), permet de visualiser quatre classes après la troncature.

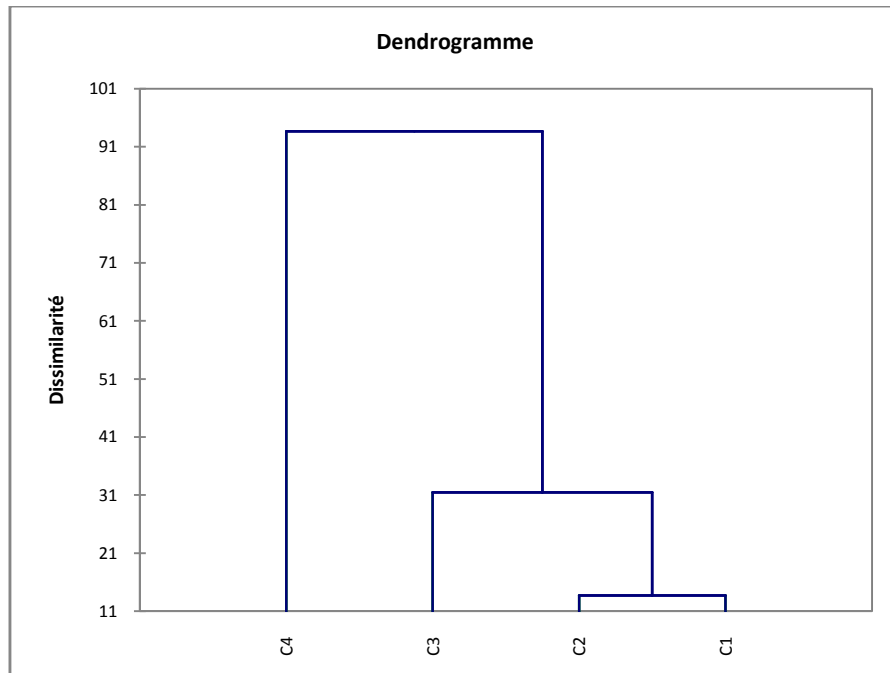


Figure n° 37 : Dendrogramme tronqué.

Les résultats par classes sont présentés au tableau n° 22, où sont indiqués pour chaque classe ces objets (individus) inclus.

Tableau n° 22 : Les classes des objets (individus).

Classes	1	2	3	4
<i>Objets (individus)</i>	P1	P2	P3	P18
	P5	P6	P7	P19
	P9	P15	P8	
	P10	P21	P14	
	P11	P24	P16	
	P12		P17	
	P13			
	P20			
	P22			
	P23			

La comparaison des résultats de l'ACP et le CAH sont résumés dans le tableau n° 23.

Tableau n° 23 : Comparaison des résultats obtenus par ACP et CAH.

Groupes d'ACP	Individus	Groupes de CAH		Individus
		Grandes groupes	Sous-groupes	
Groupe 1	P2, P6, P15, P21 et P24.	Groupe I	Groupe 2	P2, P6, P15, P21 et P24.
Groupe 2	P5, P11, P13, P22 et P23.		Groupe 1	P1, P5, P9, P10, P11, P12, P13, P20, P22 et P23.
Groupe 3	P1, P9, P10, P12 et P20.			
Groupe 4	P3, P7, P8, P14, P16 et P17.		Groupe 3	P3, P7, P8, P14, P16 et P17.
Groupe 5	P18 et P19.	Groupe II	Groupe 4	P18 et P19.

II.8. Evaluation de la qualité des eaux :

L'eau est une ressource naturelle qu'il convient de protéger. Pour cela, la connaissance de la qualité de l'eau est fondamentale, de manière à définir précisément les actions nécessaires à sa protection.

Les caractéristiques chimiques de l'eau sont déterminées selon l'usage auquel on les destine, soit pour l'alimentation en eau potable ou pour des usages agricoles, soit pour l'industrie.

II.8.1. Potabilité des eaux (Norme et qualité) :

L'eau destinée à la consommation humaine doit respecter un certain nombre de paramètres qui définissent sa potabilité.

La comparaison des résultats des analyses avec les normes de potabilité de l'OMS (voir annexes n° 09 et 10). A titre indicatif, les eaux à résidu sec égal ou supérieur à 1500 mg, seraient non potabilité.

II.8.2. Aptitude des eaux à l'irrigation :

L'agriculture rencontre des problèmes tels que le risque de salinisation qui peut entraîner, à long terme, la stérilité du sol, et celui de l'alcalinisation des sols qui entraîne la destruction de la structure du sol.

Pour caractériser la qualité de l'eau d'irrigation dans le secteur étudié, nous avons utilisé les valeurs de la conductivité électrique à 25°C et celles du coefficient d'adsorption du sodium (SAR).

II.8.2.1. Evaluation de risque d'alcalinité :

Une grande quantité d'ions de sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. Ceci est dû à l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact (lorsqu'il est sec) réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et de l'air, affectant ainsi sa structure et par conséquent la culture n'est plus suffisamment alimentée en eau et le rendement diminue.

L'alcalinisation est le processus par lequel la teneur en Na échangeable d'un sol augmente par la fixation sur le complexe adsorbant. La précipitation rapide des carbonates de calcium et de magnésium permet aux ions sodiques de se fixer sur le complexe. La teneur en ions Na⁺ et K⁺ du sol provenant des sels alcalins (carbonates et sulfates) conduisent à des pH supérieurs à 8.

Le coefficient utilisé est celui d'adsorption du sodium (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium.

Le SAR est défini par l'équation suivante : $SAR = rNa / \sqrt{(rCa + rMg)/2}$

où

rNa, rCa et rMg sont les quantités en réaction du Na, du Ca et du Mg exprimées en meq/l.

La comparaison des valeurs du SAR calculées (tableau n° 24) avec les valeurs portées au tableau n° 25, nous a permis de déduire les résultats suivants :

- L'ensemble des points d'eau étudiés du secteur d'étude, appartiennent à la classe S1 avec un pourcentage de 85.72 %.
- La classe S2 représente 4.28 %.

- L'absence d'échantillons appartenant à la classe S3 (00 %).

Le calcul du risque d'alcalinité montre que les deux échantillons, prélevés au P7 et au P14, sont caractérisés par un fort risque d'alcalinité.

Tableau n° 24 : Résultats des valeurs de SAR.

Point d'eau	SAR	Point d'eau	SAR
P1	9.02	P9	9.17
P2	9.42	P10	8.16
P3	9.37	P11	5.97
P5	6.74	P12	7.87
P60	9.17	P13	7
P7	13.97	P14	14.04
P8	10.89	P15	6.61

Tableau n° 25 : Classes d'alcalinité selon l'U.S.S.L (1954).

Classes	SAR	Les échantillons	% correspondant
S1	<13	P1, P2, P3, P5, P6, P8, P9, P10, P11, P12, P13 et P15	85.72 %
S2	13-23	P7 et P14	14.28 %
S3	>23	/	00 %

II.8.2.2. Evaluation du risque de salinité (diagramme de Riverside) :

La salinité provoque des effets directs sur les végétaux et des risques de salinisation du sol. En effet, elle perturbe le développement des végétaux en limitant l'assimilation des éléments nutritifs.

Un niveau de salinité élevé des sols provoque le flétrissement des plantes du fait d'une augmentation de la pression osmotique et des effets toxiques des sels.

Le diagramme de Riverside est très utile et fiable pour caractériser une eau. En effet, le diagramme ne peut pas prendre en compte l'évolution des caractéristiques de l'eau lorsque sa minéralité augmente dans les sols des zones arides auxquels il est destiné. Lorsque les eaux se concentrent, elles précipitent des minéraux, la calcite étant l'un des plus importants et des plus précoces à précipiter. Il en résulte une sur estimation de la charge saline et une sous estimation du rapport Na/Ca. Le diagramme sous estime le risque de salinisation et sous estime le risque de sodisation.

Ce diagramme a été proposé par Richards, chercheur à l'USDA de Riverside en Californie, en 1956. Il repose sur le croisement de deux critères.

- le premier est la conductivité électrique (C.E). Ce critère vise à quantifier la charge en sel de la solution et par conséquent le risque de salinisation (i.e. d'accumulation de sel dans les sols). Les eaux sont classées de C1 à C5 selon le risque croissant de salinisation.

- le second est le S.A.R. (Sodium Adsorption Ratio) de l'eau induit par l'eau dans le sol. Ce second critère permet d'évaluer le risque de sodisation du sol par l'eau d'irrigation. Les eaux sont classées de S1 à S3 selon le risque croissant de sodisation.

Pour nos échantillons, le diagramme est basé sur les valeurs du rapport du SAR et de la conductivité électrique des ions contenus dans l'eau (fig. n° 38). L'objectif était de représenter les échantillons sur le diagramme de Riverside afin de faciliter la caractérisation des eaux sur leur aptitude à l'irrigation.

Les échantillons représentés sur le diagramme de Riverside se répartissent en trois groupes.

1^{er} groupe : les points 5, 11, 15 et 13 avec des risques de salinisation des sols moyens mais les risques de sodisation sont élevés ;

2^e groupe : les points 2, 3, 6, 8, 9, 10 et 12, avec des risques de salinisation élevés et de forts risques de sodisation.

3^e groupe : les points 7 et 14, avec des risques de salinisation très élevés et de très forts risques de sodisation.

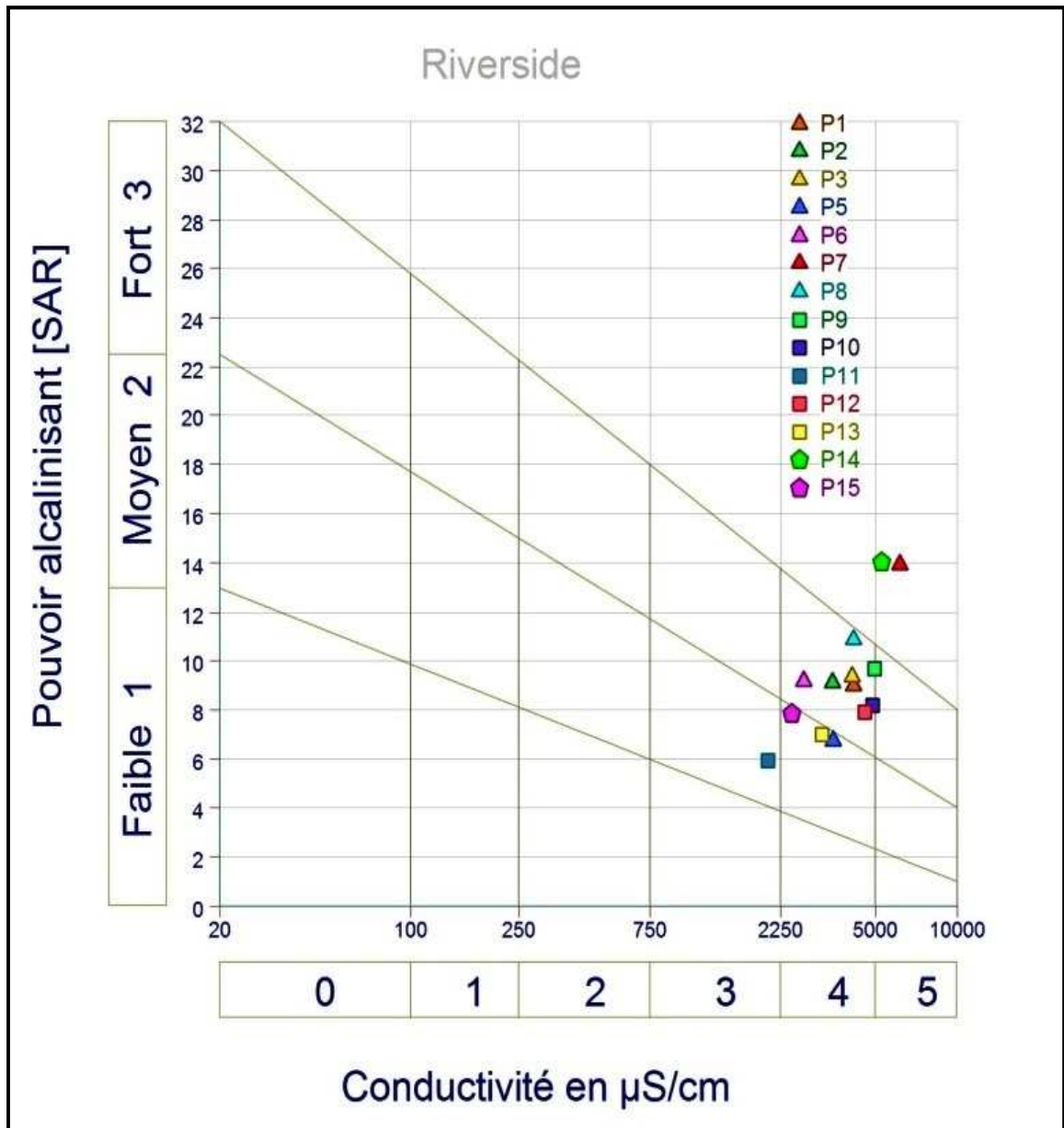


Figure n° 38 : Représentation sur le diagramme de Riverside.

Conclusion

Dans le but de bien déterminer l'état chimique (qualité) des eaux de la région d'étude, une campagne d'échantillonnage des eaux souterraines a été réalisée. Les échantillons ont été soumis à des analyses physicochimiques au laboratoire de l'ANRH d'Oran. Les résultats obtenus, pour les eaux étudiées, montrent des températures s'échelonnant entre 15.7 et 20.9°C et des pH entre 7,08 et 7,8.

L'utilisation de la cartographie hydro chimique permet de bien caractériser l'évolution spatiale de certains éléments majeurs.

Les mesures de la conductivité électrique des eaux de la nappe indiquent des valeurs de conductivité plus élevées, enregistrées à l'intérieur de la zone industrielle, P7 (cond = 6110 μ S/cm) et P14 (cond = 5270 μ s/cm).

Les eaux étudiées présentent une salinité variable, la forte minéralisation s'observant au sein de la zone industrielle, centrée sur P7 (4638 mg/l). La valeur de minéralisation la plus faible est enregistrée au point de prélèvement P6 (Min = 1822 mg/l). D'autres échantillons prélevés hors la campagne effectuée lors de la période 24/25 février montrent que la minéralisation peut atteindre 15 844 mg/l au P19.

Les valeurs de dureté sont supérieures à 30 °F, ce qui donne à l'eau le caractère dur.

Tenant compte de l'effet des conditions géologiques et hydrogéologiques, ainsi que de l'effet anthropique, cette étude hydrochimique a permis de mettre en évidence l'hétérogénéité de la plupart des paramètres physico-chimiques ayant une influence sur l'évolution et la qualité des eaux.

La représentation des échantillons dans les diagrammes de Piper et de Schoeller et Berkaloff montre que les eaux du secteur d'étude présentent globalement, un faciès chloruré sodique, voire calcique ou magnésien.

Le traitement statistique des données a permis de trouver, à travers la matrice, quelques corrélations des éléments entre eux.

L'étude indique aussi que la minéralisation des eaux du secteur d'étude est fortement contrôlée par le sodium, le magnésium, les sulfates et les chlorures.

Le traitement statistique des données par l'ACP a permis de faire ressortir cinq groupes d'individus ;

Le premier groupe concerne les points ; P2, P6, P15, P21 et P24. Ce groupe est caractérisé par des minéralisations s'échelonnent entre 1723 et 2633 mg/l, et plus influencé par le pôle bicarbonaté ($\text{HCO}_3 > 393$ mg/l).

Le deuxième groupe englobe les points ; P5, P11, P13, P22 et P23, se caractérisé par des minéralisations s'échelonnant entre 2209 et 2657 mg/l, influencés par le pôle calcique (teneur de Ca variant de 148 à 276 mg/l).

Le troisième groupe, englobe les points ; P1, P9, P10, P12, P20. Ce groupe est caractérisé par des minéralisations s'échelonnant entre 3142 et 4509 mg/l, mais plus influencé par le pôle calcique de l'axe 2 ($\text{Ca} > 231$ mg/l).

Le cinquième groupe qui englobe les points ; P3, P7, P8, P14, P16 et P17. Ces puits sont caractérisés par des minéralisations s'échelonnent entre 3120 et 7028 mg/l, mais influencées par le pôle bicarbonaté de l'axe 2 ($\text{HCO}_3 > 453$ mg/l).

Le quatrième groupe des points ; P18 et P19. Ces points d'eau sont caractérisés par des minéralisations dépassant 11050 mg/l.

L'étude par le CAH, permis de faire ressortir deux grandes groupes, répartis en quatre sous groupes, identiques à celles déduites de l'ACP. Les groupes 2 et 3 de l'ACP sont néanmoins regroupés dans le même groupe dans le CAH.

L'évaluation de la qualité hydrochimique des eaux de la nappe montre la non-potabilité générale des eaux du secteur étudié.

Concernant l'aptitude des eaux à l'irrigation, les eaux de ces puits présentent un risque d'alcalinité et de salinisation. Elles sont potentiellement mauvaises pour l'irrigation.

Introduction

La croissance exponentielle de la démographie et des activités industrielles et agricoles au cours de ce siècle a entraîné dans certaines régions une pénurie quantitative et qualitative des eaux mobilisables.

Dans notre pays cette ressource est actuellement exposée à différentes formes de pollution, qui modifient sa qualité et restreignent son utilisation. Ceci peut entraîner des conséquences fatales sur l'homme et son activité, aussi est-il nécessaire de la protéger en prenant toutes les dispositions nécessaires à la localisation de toutes les sources de pollution et leurs éliminations, en assurant une utilisation et une gestion rationnelles.

La caractérisation de la pollution est basée sur l'étude de deux types d'éléments indicateurs de pollution : les éléments indicateurs de la pollution organique (ammonium, nitrite, etc.) et les éléments indicateurs de pollution métallique (micropolluants).

III.1. Aperçu sur la pollution :

III.1.1. Définition de la pollution de l'eau :

Une eau est polluée lorsque sous l'effet de l'activité humaine, elle perd au moins une de ses fonctions (ou un de ses usages). Elle devient alors impropre à répondre à la demande d'utilisation et peut présenter un danger pour l'environnement. Les eaux souterraines se caractérisent par leur teneur en substances minérales dissoutes, d'origine naturelle ; c'est le bruit de fond. Le degré de pollution est apprécié par la mesure de l'écart entre le bruit de fond et les caractéristiques physico-chimiques (Mardhel, 2001).

III.1.2. Les principaux types de pollution :

Les pollutions sont classées selon différents critères ; l'origine de la pollution, la nature des polluants, la répartition géographique et la répartition dans le temps.

III.1.2.1 Selon l'origine de pollution :

- **Pollution d'origine urbaine (fig. n° 39) :**

La pollution d'origine urbaine, correspond à des apports hétérogènes liés, d'une part aux activités physiologiques et domestiques, et d'autre part aux activités économiques, industrielles et commerciales pratiquées dans le milieu urbain.

Pour celles liées aux activités physiologiques et domestiques, elle est essentiellement de type organique et bactériologique.

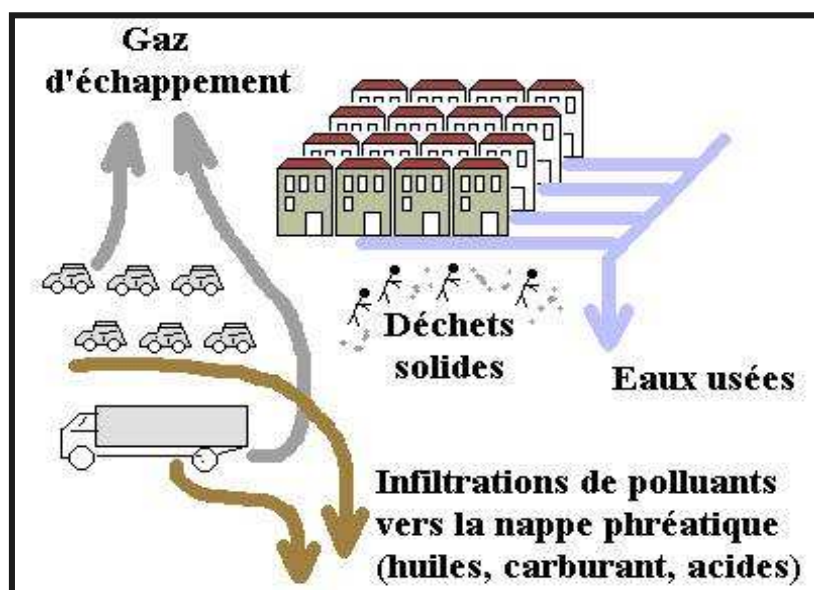


Figure n° 39 : Schéma résumant les différentes causes de la pollution urbaine.

- **Pollution d'origine agricole (fig. n° 40) :**

L'agriculture est entrée dans un stade de modernisation, où les cultivateurs font parfois recours à une utilisation abusive d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires (pesticides, fongicides, herbicides, etc.). L'utilisation irrationnelle de ces produits peut entraîner des risques graves et polluer les eaux souterraines.



Figure n° 40 : Pollution agricole.

- **Pollution d'origine industrielle (fig. n° 41) :**

Elle peut être provoquée par des rejets industriels, thermiques et chimiques. Sa nature est aussi variée que celle des industries. La pollution par les éléments toxiques est la plus dangereuse pollution incluse dans ce type.

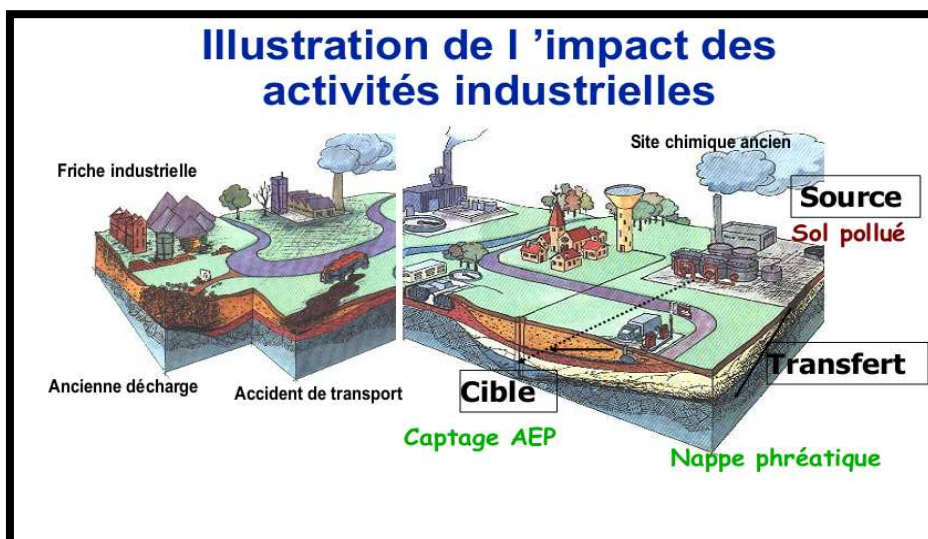


Figure n° 41 : Schéma illustrant la Pollution d'origine industrielle.

III.1.2.2. Selon la nature des polluants :

- **Les macropolluants ;** Les macropolluants sont des molécules de grande taille (par rapport aux micropolluants). Ils doivent être contenus dans certaines limites de concentration, évaluées en milligrammes par litre (mg/l), par opposition aux micropolluants, chiffrés en microgrammes par litre (µg/l).

MES, sont des matières insolubles, fines, minérales ou organiques, biodégradables ou non. Leur principal effet est de troubler l'eau : c'est la turbidité.

MO, un composé organique caractéristique de toute matière vivante ou issue d'une matière qui a été vivante, et/ou contient du carbone. La plupart des matières organiques ne deviennent polluantes que lorsqu'elles sont en excès dans le milieu notamment dans le milieu aquatique. On distingue, d'une part les matières organiques biodégradables et d'autre part les matières organiques non biodégradables.

Les nutriments, sont des matières nutritives. Il s'agit principalement de l'azote et du phosphore

- **Les micropolluants ;** Ce terme de micropolluants désigne un composé minéral ou organique dont les effets sont toxiques à très faible concentration (les teneurs sont évaluées en µg/litre).

Les métaux : Les métaux sont naturellement présents dans les roches et les sols. Néanmoins, l'essentiel provient des apports d'origine industrielle, qu'il s'agisse des exploitations minières, des activités industrielles anciennes, ou des activités actuelles.

Les pesticides destinés à lutter contre les parasites des plantes.

Autres micropolluants organiques : Ce sont surtout des substances chimiques, englobant principalement les hydrocarbures et les solvants.

Les micros polluants issus de la micro biologie : bactéries, virus et parasites

III.1.2.3. Répartition géographique :

Les pollutions peuvent être :

- **Diffuse :** Comme celle due aux épandages de pesticides et d'engrais sur les terres agricoles, elle met plus de temps à atteindre les milieux aquatiques et ne peut être traitée qu'à la source en diminuant l'usage des substances responsables.

- **Ponctuelle** : Souvent relativement immédiate, qui provient de sources bien identifiées (rejets domestiques ou industriels, effluents d'élevage, etc.).

III.1.2.4. Répartition temporelle :

Selon la répartition dans le temps, les pollutions peuvent être :

- **Permanentes** : Rejets domestiques d'une grande ville, par exemple.
- **Périodiques** : Augmentations saisonnières des rejets liées au tourisme, aux crues...
- **Accidentelles ou aiguës**, à la suite du déversement intensif de produits toxiques d'origine industrielle ou agricole, ou du lessivage des sols urbains lors de fortes pluies.

III.1.3. Les principaux éléments indicateurs de pollution :

III.1.3.1 Les éléments nutritifs :

III.1.3.1.1. Les nitrates:

Ils constituent la forme la plus oxydée de l'azote que l'on retrouve dans l'eau. Une forte teneur en nitrates peut être d'origine naturelle mais indique parfois la présence d'une contamination par des eaux résiduelles, de certaines industries ou de ruissellement riche en engrais (agriculture). En trop grande quantité, les nitrates empêchent le sang de transporter l'oxygène vers les tissus humains.

Les normes de l'O.M.S. indiquent un niveau guide de 25 mg/l, et 50 mg/l comme concentration maximale admissible, pour l'eau destinée à la consommation humaine

III.1.3.1.2. Les nitrites :

Les nitrites peuvent être présents dans l'eau mais généralement à des doses faibles. Les nitrites sont donc des bons indices de contamination organique et bactériologique. Ils peuvent avoir comme origine l'oxydation incomplète de l'ammoniaque, ou bien une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiante. L'O.M.S préconise comme teneur en nitrites une valeur limite de 0.1 mg/l dans l'eau potable.

III.1.3.1.3. L'ammonium :

L'ammonium est souvent rencontré dans l'eau. La présence d'ammonium dans les eaux souterraines résulte d'une contamination de surface liée essentiellement aux rejets d'effluents domestiques et industriels ou d'un phénomène de réduction naturelle des

nitrate. Il traduit habituellement un processus de dégradation incomplète de la matière organique.

Pour l'eau destinée à la consommation humaine, il est recommandé comme valeur admissible maximale ; 0.5 mg/l.

III.1.3.1.4. Les phosphates :

Leur présence dans les eaux naturelles dépend de la nature des terrains traversés et de la décomposition de la matière organique. Les eaux souterraines peuvent être contaminées par des rejets industriels et domestiques ou par le lessivage des terres cultivées renfermant des engrais phosphatés.

Pour l'eau potable, les normes de l'O.M.S recommandent comme niveau guide du phosphate 0.4 mg/l et une concentration maximale admissible de 5 mg/l.

III.1.3.2. Les matières organiques :

Ce genre de pollution est fortement lié aux activités humaines. Les matières organiques susceptibles d'être rencontrées dans les eaux sont constituées par des produits de décomposition d'origine animale ou végétale, élaborés sous l'influence des micro-organismes.

L'inconvénient des matières organiques est de favoriser l'apparition de mauvais goûts, qui pourront être exacerbés par la chloration, et d'odeurs désagréables et pourrait faire suspecter une contamination microbienne.

III.1.3.3. Les matières en suspension (MES) :

La teneur et la composition minérale et organique des matières en suspension dans les eaux sont très variables. Elles sont variées en fonction de la nature des terrains traversés, de la saison, de la pluviométrie, de rejets, etc. En se déposant, elles peuvent colmater les fonds et créer des déséquilibres de la faune et la flore. En outre, ces substances peuvent favoriser la prolifération des micro-organismes pathogènes et ralentissent les phénomènes liés à la lumière (photosynthèse).

III.1.3.4. Les métaux lourds :

Un métal est une matière, issue le plus souvent d'un minerai ou d'un autre métal, dotée d'un éclat particulier, bon conducteur de chaleur et d'électricité, ayant des

caractéristiques de dureté et de malléabilité, se combinant ainsi aisément avec d'autres éléments pour former des alliages utilisables dans l'industrie.

En général, on appelle métaux lourds les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 grammes par cm³. On retrouve dans certaines publications anciennes l'appellation de « métal pesant ». Quarante et un métaux correspondent à cette définition générale auxquels il faut ajouter les métalloïdes.

La classification en métaux lourds est d'ailleurs souvent discutée car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement "lourds" (le zinc), tandis que certains éléments toxiques ne sont pas toujours des métaux (l'arsenic par exemple).

Pour ces différentes raisons, la plupart des scientifiques préfèrent à l'appellation métaux lourds, l'appellation « éléments en traces métalliques » -ETM- ou par extension « éléments traces ».

En concentration appropriée, de nombreux métaux sont essentiels à la survie. Par contre, en quantité excessive, ils peuvent être toxiques.

Même une faible exposition à ces métaux, si elle est chronique, peut avoir de graves répercussions sur la santé. Du fait qu'il est impossible de dégrader ou de détruire les métaux lourds, ils ne sont pas décomposés et s'accumulent dans le corps humain ; ils se concentrent dans le foie, les reins, le cerveau, le squelette et les tissus kératinisés tels que les cheveux et les ongles.

L'exposition aux métaux lourds est liée aux troubles du développement, à divers cancers, à l'atteinte rénale et même, dans certains cas, à la mort.

Certains de ces métaux peuvent être toxiques (cadmium, chrome, mercure, plomb...), d'autres éléments sont considérés comme indésirables et peuvent présenter des inconvénients au consommateur d'ordre organoleptique : goût, saveur, coloration. C'est le cas pour le cuivre, le zinc, le fer, le manganèse, l'aluminium.

Les éléments toxiques agissent sur la santé des êtres humains soit directement comme les cyanures, soit progressivement comme les métaux lourds : fer, cuivre, plomb, cadmium, mercure, etc.

Parallèlement à leur présence naturelle dans les eaux souterraines en fonction de la nature de sous-sol ; au sein de notre environnement, la pollution métallique sous forme

dissoute ou particulaire est souvent d'origine anthropique. Cette pollution provient en effet essentiellement :

- des épandages sur les sols agricoles d'oligo-éléments ou de boues résiduelles de stations d'épuration,
- des rejets d'usines, notamment de tanneries (cadmium, chrome), de papeteries (mercure), d'usines de fabrication de chlore (mercure) et d'usines métallurgiques,
- de l'utilisation de certains fongicides (mercure),
- des retombées des poussières atmosphériques émises lors de l'incinération de déchets (mercure) ou de la combustion d'essence automobile (plomb),
- du ruissellement des eaux de pluie sur les toitures et les routes (zinc, cuivre, plomb).

En milieu urbain et industrielle et lors d'un événement pluvieux, la pluie lessive tout d'abord l'atmosphère, corrode les différentes surfaces urbaines ou industrielles, entraîne ensuite les dépôts accumulés sur les surfaces imperméables (chaussées, trottoirs, etc.), puis pénètre dans le réseau d'assainissement avant de rejoindre le milieu naturel.

III.1.3.4.1. Les principaux éléments toxiques ou indésirables

➤ Le cadmium :

Le cadmium (Cd) est utilisé pour le revêtement électrolytique des métaux, dans certains alliages, pour la fabrication d'accumulateurs, de peintures et de matières plastiques.

Généralement les eaux ne contiennent que quelques microgrammes de Cd par litre. Lorsque des teneurs plus élevées sont rencontrées dans les eaux superficielles ou les eaux de nappes phréatiques, l'origine du cadmium doit être recherchée dans les effluents industriels.

Pour les eaux destinées à la consommation humaine, l'OMS recommande une valeur limite de 0.003 mg/l. (annexes n° 11 et 12). (Rodier, 2010).

➤ Le chrome :

Le chrome est présent en petites quantités dans la nature. Il est trouvé en quantité plus importante dans les roches de type basique que dans celles de type siliceux. D'une façon générale, sa solubilité est faible vis à vis des phénomènes de lessivage des sols. Sa

présence dans les eaux souterraines est le plus souvent liée aux rejets des ateliers de galvanoplastie. Le tannage au chrome est très utilisé pour les cuirs et les peaux.

Chez l'homme, quelques μg de chrome sont considérés comme utiles pour l'équilibre du métabolisme du glucose. L'intoxication aiguë par le chrome se traduit par une tubulonéphrite parfois compliquée d'une hépatite toxique avec ictère. Les caractéristiques cancériques du chrome hexavalent font que l'O.M.S, a adopté comme valeur limite du chrome total le chiffre de 0.05 mg/l.

➤ **Le cobalt :**

Le cobalt est présent en petites quantités dans la nature ; Il est trouvé en quantité plus importante dans les roches de type basique que dans celles de type siliceux. Les teneurs dans les eaux naturelles sont nulles ou très faibles, généralement inférieures à 10 $\mu\text{g/l}$. Le cobalt est très utilisé dans la métallurgie des aciers spéciaux très résistants ; les sels de cobalt sont également employés comme pigments colorés (peintures, céramiques) et comme catalyseurs.

L'homme est susceptible d'absorber quotidiennement 5 à 8 μg de cobalt, à partir de l'eau. L'OMS ne donne pas de valeur limite pour le cobalt. Une teneur de 1 mg/l dans l'eau de boisson pourrait être considérée comme concentration limite. (Rodier, 2010)

➤ **Le cuivre :**

Le cuivre est présent dans la nature sous forme de minerais de cuivre natif. Il peut se rencontrer dans certaines eaux naturelles, généralement à des teneurs inférieures à 1mg/l. Une eau potable ne doit contenir du cuivre qu'à l'état de traces.

➤ **Le fer :**

Le fer peut se rencontrer dans l'eau sous différentes formes dans les conditions habituelles, c'est à dire pour un pH variant entre 4.5 et 9. Le fer soluble est présent généralement à l'état ferreux si le milieu est réducteur comme dans beaucoup d'eaux souterraines. Le fer ferreux peut atteindre des teneurs élevées.

Le fer ferrique n'est soluble d'une façon significative qu'à des $\text{pH} < 3$. Les normes de l'O.M.S. ont retenu pour la potabilité la valeur limite de 0.2 mg/l.

➤ **Le manganèse :**

Le manganèse est assez répandu dans la nature. Les minerais les plus connus sont la pyrolusite, la rhodocrosite et la bronite. Son importance industrielle est grande : métallurgie (aciers, soudures...), industrie électrique, chimique, etc.

Le manganèse présent dans l'eau peut être soit à l'état soluble ou en suspension soit sous forme de complexe. Sa solubilité dépend du pH et de l'oxygène dissous.

Le manganèse est nécessaire pour l'homme pour la croissance, pour le métabolisme des glucides et des lipides et comme catalyseur dans certaines réactions enzymatiques. Les intoxications par le manganèse sont extrêmement rares : en dehors d'une absorption accidentelle ou volontaire en quantités importantes, le risque est exclusivement d'origine professionnelle. Les normes de l'O.M.S indiquent comme concentration limite 1 mg/l.

➤ **Le plomb :**

Depuis l'antiquité, le plomb étant largement utilisé dans les poteries vernissées et pour la fabrication des tuyauteries de distribution d'eau, il en a résulté de nombreuses intoxications d'origine hydrique. Le plomb est susceptible de s'accumuler dans l'organisme ; le danger n'est donc pas seulement lié à l'absorption d'une dose toxique mais à une accumulation de doses considérées séparément comme non toxiques.

La toxicité du plomb est due notamment à son effet inhibiteur de certaines enzymes qui provoque des troubles cérébraux et des retards mentaux chez les jeunes enfants.

Ce métal est actuellement très répandu et utilisé dans l'industrie et les possibilités de pollution sont extrêmement nombreuses et variées. Les activités humaines (emploi de plomb tétraéthyl dans les carburants comme antidétonant, fusion des minerais, etc.), entraînant la formation d'aérosol plombifère, constituent actuellement la principale source de plomb dans l'hydrosphère.

Le plomb se trouve généralement, dans les eaux potables dans des proportions de 0.01 à 0.03 mg/l, alors que la concentration admise est de 0.1mg/l.

➤ **Le sélénium :**

Le sélénium est largement répandu dans la nature. Il se rencontre à l'état de traces dans les pyrites, les minerais sulfurés du cuivre, du plomb,...etc. Industriellement, il constitue un sous-produit du raffinage du cuivre ; il est utilisé dans la préparation des

colorants, en verrerie, en métallurgie et pour le traitement des textiles ainsi que dans la fabrication des cellules photo-électriques et des semi-conducteurs.

Toutefois, suivant la pollution de l'environnement, l'eau est susceptible de se charger de cet élément qui peut entraîner des caries dentaires, une pâleur de la peau, et des troubles digestifs.

L'OMS a retenu comme valeur limite dans l'eau destinée à la consommation humaine le chiffre de 10 µg/l. Pour l'irrigation, les eaux contenant plus de 0.5 mg/l ne sont pas utilisables.

➤ **Le zinc :**

Le zinc se retrouve dans les roches, généralement sous forme de sulfure (Blende). Les renseignements fournis par Palmquist (1935) et par Lundgarh (1948) in Chanu (1976), donnent un ordre de grandeur des teneurs en zinc (ppm) trouvées dans les roches sédimentaires :

Grès : 20 ppm, Argiles : 80 à 230 ppm, Schistes : 200 à 1000 ppm, Calcaires : <50 ppm.

Dans l'eau, la solubilité des chlorures et sulfates de zinc est importante. Leur hydrolyse conduit à une diminution du pH. D'une façon générale, les eaux à pH bas ont des teneurs en zinc plus importantes. La présence de zinc dans les eaux de surface doit être rattachée à des activités industrielles. Dans les eaux de distribution, le zinc provient généralement des canalisations en laiton ou en fer galvanisé, attaquées par les eaux agressives ou riches en chlorures et sulfates.

Il y a lieu de noter que dans les eaux résiduelles de traitements de surface, le zinc est habituellement accompagné de plomb et de cadmium. La toxicité par le zinc est fonction de la minéralisation de l'eau.

Du point de vue physiologique, la quantité de zinc tolérable dans l'eau est rapidement limitée par le goût désagréable des sels de zinc. Pour l'eau de boisson, les normes de l'O.M.S ont défini comme concentration maximale admissible : 1 mg/l.

III.1.3.4.2. Les sources de pollutions par les métaux lourds :

Les sources anthropiques de substances métalliques sont multiples et sont principalement dues à l'intensification des activités urbaines, agricoles et industrielles. Ces activités intensives génèrent de fortes concentrations en métaux lourds (Cu, Zn, Pb, Cd) et

des polluants organiques dans le sol qui peuvent être alors accumulés par la plante (Gremion, 2003).

Le tableau n° 26 présente quelques exemples de sources industrielles et agricoles d'où proviennent les métaux présents dans l'eau.

Tableau n° 26 : Les différentes sources de métaux lourds (in, Zouaoui, 2001, modifié).

Sources	Cd	Cr	Co	Cu	Fe	Mn	Pb	Se	Zn
Alliage et soudures	x			x		x	x		x
Céramique-Verrerie	x					x			
Chimie				x					
Colorants					x	x			x
Produits cosmétiques									x
Galvanoplastie	x	x							
Biocides (pesticides, herbicides, conservateurs)	x			x		x	x		x
Pigments - peintures – vernis	x	x		x	x	x	x		x
Pharmacie						x			
Photographie	x					x			
Station d'épuration					x				
Metallurgies	x	x		x		x	x	x	x
Cuir et chaussures	x	x					x		x
Textiles		x			x	x		x	x
Extraction des métaux	x	x		x		x	x		x
Batteries et autres appareils électriques	x					x	x		x
Matières plastiques	x						x		
Raffineries					x	x			x
Engrais	x	x		x		x	x		x
Carburants	x			x	x	x	x		
Verre	x	x		x		x	x	x	x

III.2. Etude de la pollution dans le secteur d'étude :

Dans notre secteur d'étude, la nappe se situe dans une zone générant des risques de pollution multiformes, issues des activités urbaines, agricoles et industrielles.

Les ressources en eau dans le secteur d'étude peuvent être exposées à différentes sources potentielles de pollution, dont notamment :

- Une pollution domestique et urbaine :

La pollution domestique, dans le secteur d'étude, est due aux possibilités de rejet des eaux usées d'origine domestique par des foyers non raccordés au réseau d'assainissement (fosses perdues). Ce type de pollution caractérise quelques agglomérations, notamment celles de, Douar Kharrouba et le domaine Habib au Nord-est du secteur d'étude mais également l'agglomération de Hassi Ameer au sud est du secteur étudié.

- Une pollution industrielle :

Les principales sources de pollution industrielle sont implantées dans la zone industrielle de Hassi Ameer. La variété des unités industrielles peut causer différents types de pollutions.

Certaines entreprises, non raccordées au réseau d'assainissement (inaccessible, obstrué, etc.) peuvent faire usage de fosses ou des puisards secs, ou évacuent l'eau usagée dans des réservoirs septiques. Tout ceci peut conduire à la contamination des sources souterraines.

- Une pollution agricole :

L'agriculture peut contribuer à la pollution des eaux de la nappe à cause de l'utilisation parfois irrationnelle des engrais et des pesticides que les agriculteurs ajoutent afin de fertiliser les sols et d'augmenter la productivité de la parcelle. Il faudrait contrôler cet ajout suivant la pédologie du terrain et les besoins de la plante en nitrate. Il faudrait également maîtriser les quantités d'eau afin de limiter le phénomène de lessivage.

Dans le secteur étudié, les fermes, les terrains agricoles et les abattoirs sauvages situés au Nord-Ouest du secteur d'étude ainsi qu'à l'Est peuvent être des points majeurs de pollution d'origine agricole.

III.2.1. Analyse des éléments indicateurs de pollutions dans le secteur d'étude :

Pour apprécier l'effet potentiel de la pollution des eaux souterraines dans le secteur d'étude, nous avons procédé à l'étude de certains éléments indicateurs de la pollution, contenus dans les eaux souterraines, afin d'évaluer le degré de vulnérabilité de la nappe à ces types de pollution.

Comme cité plus haut, dans le cadre de ce travail, nous avons effectué quinze prélèvements dans la zone industrielle et ses alentours. Pour chaque point d'eau, en plus des paramètres étudiés en chapitre II, deux types d'éléments indicateurs de pollutions ont été dosés (tableau n° 27) :

- des éléments indicateurs de pollution organique ; les nitrates, les nitrites, l'ammonium, les phosphates, la matière organique acide, la matière en suspension, la silice et la turbidité, analysés au sein du même laboratoire (ANRH-DRO) que les éléments précédent.

- onze éléments indicateurs de pollution métallique ; à savoir, le cadmium, le chrome, le cobalt, le cuivre, le fer, le manganèse, le molybdène, le nickel, le plomb, le sélénium et le zinc. L'analyse de ces éléments métallique a été effectuée par ICP-MS au niveau du laboratoire du " Servicios Centrales de Investigación" de l'Université d'Almeria-Espagne *

La présence de ces éléments dans l'eau ou de leur non-conformité aux normes de potabilité pourrait informer sur la propreté ou non à tel ou tel usage (eau potable, industrie, etc.)

* Ces analyses ont pu être réalisées grâce aux moyens mis à notre disposition dans le cadre du fonctionnement du projet AECI (PCI méditerranéen) D/026160/09 liant l'Université d'Oran et l'Université d'Almeria.

Tableau n° 27 : Résultats des analyses des éléments indicateurs de pollution (mg/l)

	NO ₃	NO ₂	NH ₄	PO ₄	MOA	MES	SiO ₂	Turb	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Se	Cd	Pb
P1	92	0.04	0.05	0.09	4.8	2	27.3	1	0.00613	0.00172	0.05891	0.00407	0.00194	0.07817	0.00002	0.00069
P2	55	0.01	0.06	0.17	4.4	5	29.7	3	0.00117	0.00205	0.03455	0.00478	0.00489	0.07138	0.00002	0.00053
P3	97	0	0.07	0.09	4.3	5	28.6	2	0.00023	0.00255	0.03815	0.00357	0.00672	0.066697	0.00001	0.00023
P5	100	0.01	0.05	0.03	4.5	2	24.1	1	0.00019	0.00194	0.08354	0.00295	0.01088	0.07028	0.00001	0.000039
P6	50	0	0.08	0.08	2.2	2	23.5	1	0.00106	0.002	0.03674	0.0035	0.00471	0.04574	0.00002	0.00039
P7	58	0.06	0.07	0.05	7.1	2	22.9	1	0.00014	0.002	0.04782	0.009	0.01346	0.1264	0.00002	0.00022
P8	112	0.02	0.06	0.05	3.7	2	23.3	1	0.00015	0.04223	0.04514	0.00456	0.00299	0.05504	0.00002	0.00046
P9	84	0.01	0.07	0.04	5.9	5	32.7	2	0.00032	0.00211	0.04963	0.0033	0.01428	0.1168	0.00003	0.00033
P10	94	0	0.06	0.05	5.3	2	26.6	1	0.00016	0.00241	0.08354	0.00339	< limite de detection	0.1097	0.00001	0.00025
P11	55	0.04	0.06	0.15	2.8	2	27.3	1	0.00018	0.00319	0.05887	0.00475	0.00642	0.05119	0.00002	0.00035
P12	101	0.02	0.09	0.08	4.3	5	21.2	2	0.00021	0.00273	0.08321	0.00311	0.01658	0.09136	0.00001	0.00035
P13	128	0	0.05	0.05	2.7	2	14.4	1	0.00008	0.00262	0.06394	0.00359	0.00217	0.05287	0.00005	0.00026
P14	46	0.2	0.09	0.04	4.8	2	20.9	1	< limite de detection	0.3872	0.03056	0.00316	< limite de detection	0.09287	0.00001	0.00016
P15	71	0.01	0.07	0.11	2.2	5	22	2	0.00028	0.00289	0.05219	0.00448	0.00738	0.04239	0.00001	0.000092

III.2.2. Les éléments nutritifs :

a. Les nitrates :

L'altération "nitrates" est prise en compte pour un classement synthétique, ainsi que pour des usages des eaux "potabilisation", "abreuvement" et pour déterminer l'état patrimonial.

Les données recueillies sont traitées à l'aide d'une grille de qualité générale. Les seuils de classement des nitrates sont discutés dans le tableau n° 28.

Tableau n° 28 : Seuils de classes de qualité pour les nitrates.

Classes	Nitrates	Echantillons
Bleu : Eau de très bonne qualité dont la composition est naturelle ou sub-naturelle.	< 10 mg/l	
Vert : eau de bonne qualité, proche de l'état naturel mais avec détection d'une contamination d'origine anthropique.	10 - 20 mg/l	
Jaune : Eau de qualité passable. Dégradation significative par rapport à l'état naturel.	20 – 40 mg/l	
Orange : Eau de qualité médiocre. Dégradation importante par rapport à l'état naturel.	40 – 50 mg/l	P6, P14.
Rouge : Eau de mauvaise qualité. Dégradation importante par rapport à l'état naturel.	>50 mg/l	P1, P2, P3, P5, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P15.

Source : Rapport sur la qualité de l'eau et de l'assainissement en France, Gérard Miquel, tome II.

Remarque : Il s'agit du classement pour l'état chimique des eaux.

On note qu'il n'existe que deux classes de qualité dans le secteur d'étude ; orange et rouge. Donc la majorité des eaux dépassent le seuil de 50 mg/l. Certains excèdent même la teneur de 100 mg/l.

La figure n° 42 permet de visualiser les variations spatiales des teneurs en nitrates. D'après les résultats des analyses, on a constaté pour l'ensemble des points d'eau une teneur élevée en nitrates dépassant les normes de potabilité, à l'exception de deux points, P14 avec 46 mg/l et P6 avec 50 mg/l. Elle atteint son maximum au P13 (128 mg/l).

Les plus faibles teneurs en nitrates sont centrés autour des points P6 et P14.

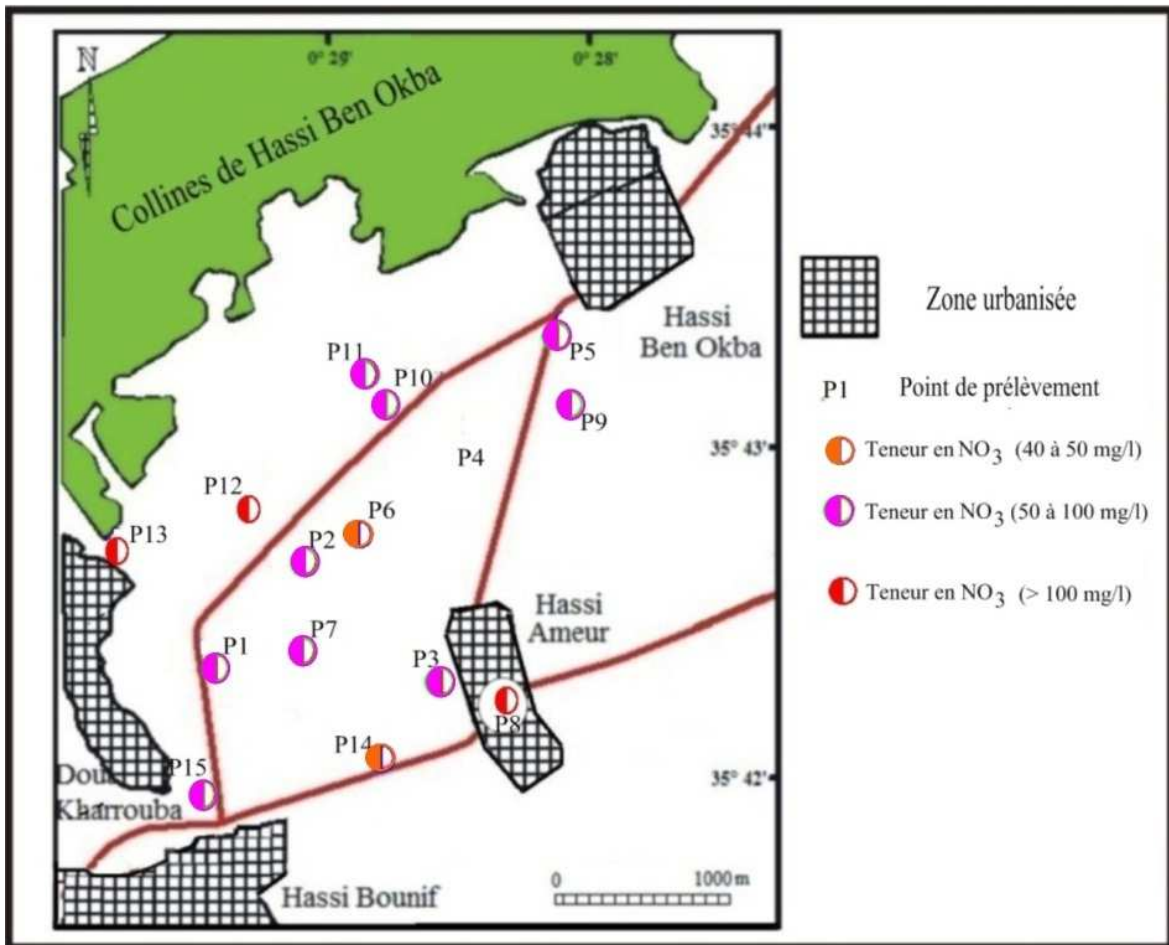


Figure n° 42 : Carte des teneurs en nitrates (mg/l).

b. Les nitrites :

Contrairement aux nitrates, les teneurs en nitrites, dans tous les points d'eau, sont comprises dans les normes de potabilité (< 0.1mg/l). Elles s'échelonnent entre 0 mg/l et 0.06 mg/l pour l'ensemble des points d'eau étudiés, à l'exception du point P14, caractérisé par une teneur en NO_2 atteignant 0.2 mg/l. Cette valeur dépassant les normes de l'OMS, elle est très élevée par rapport aux autres valeurs (fig. n° 43).

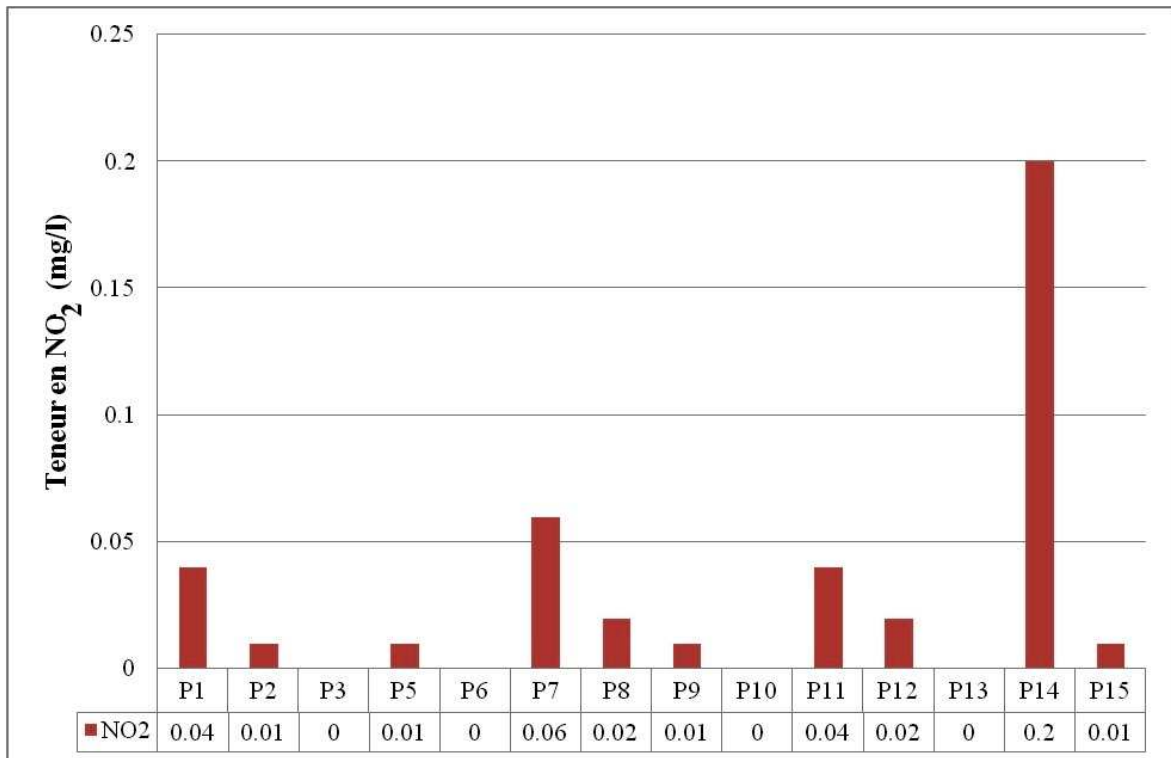


Figure n° 43 : Histogramme illustrant les variations des teneurs en nitrites (NO_2) dans les points d'eau étudiés.

c. L'ammonium :

Dans notre secteur d'étude, les résultats obtenus sont très inférieurs aux normes de potabilité admises (0.5 mg/l). Les teneurs en NH_4 s'échelonnent entre 0.05 et 0.09 mg/l

d. Les phosphates :

Pour tous les points d'eau; les teneurs restent inférieures aux normes de potabilité (0.4 mg/l). Les teneurs en phosphates s'échelonnent entre 0.03 mg/l au P5 et 0.17 mg/l au P2.

II2.3. Les matières organiques acides :

Les résultats d'analyse indiquent que les eaux souterraines du secteur étudié présentent des teneurs élevées en matières organiques acides. Les teneurs s'échelonnent entre 2.2 mg/l au P6, P15 et 5.9 mg/l au P9.

II.2.4 Les matières en suspension :

Les teneurs en MES des eaux souterraines du secteur étudié ne sont pas très élevées. Les valeurs varient entre 2 et 5 mg/l.

III.2.5. La silice :

Les composés siliceux représentent environ 28 % de la lithosphère (Quartz, sables, roches ignées, etc.). (Rodier, 2010). La silice est rencontrée dans l'eau, soit à l'état dissous (ionique), soit à l'état colloïdal, soit en suspension ; les eaux des régions granitiques peuvent en contenir plusieurs dizaines de milligrammes par litre. Il n'y a pas de valeur maximale recommandée par l'OMS. Cependant, il faut s'assurer que les concentrations ne puissent pas entraîner, directement ou indirectement, un risque pour la santé publique. Une eau potable de bonne qualité ne contient pas plus de 20 mg/l de silice.

Dans l'industrie, il existe un problème pour les installations de refroidissement et les eaux de chaudières à haute pression ; en effet, la silice forme des dépôts extrêmement durs sur les tubes des surchauffeurs et sur les turbines.

Dans notre secteur d'étude, les valeurs des teneurs en silice s'échelonnent entre 14.4 mg/l (P13) et 32.7 mg/l (P9).

L'ensemble des points de prélèvement, à l'exception du point P13, présentent des teneurs en SiO₂ supérieures à la valeur maximale préconisée.

III.2.6. Les micropolluants minéraux : "les métaux lourds" :

Les micropolluants minéraux étudiés dans ce chapitre sont : le cadmium, le plomb, le chrome, le fer, le manganèse, le sélénium, le zinc, le cuivre et le cobalt.

L'évaluation de la qualité des eaux des points étudiés vis-à-vis des micropolluants minéraux est cependant très délicate. La présence de l'un de ces micropolluants dans un échantillon d'eau peut avoir plusieurs origines, soient :

- naturelle, et alors liée au contexte géologique particulier de l'aquifère ;
- elle résulte d'un apport par les activités anthropiques (voir III.1.3.4.2) ;
- son origine est mixte, c'est à dire qu'elle résulte à la fois d'un contexte naturel favorable à sa présence auquel s'ajoute une pollution.

Certains métaux (Fer, zinc, manganèse, etc.) ne produisent que des inconvénients d'aspect ou de goût ; l'eau doit être traitée pour être potable, ou utilisée en l'état pour

d'autres usages. Les métaux lourds, comme le Mercure, le Cadmium, le Plomb, le Chrome, sont toxiques et rendent l'eau inutilisable pour l'usage domestique et l'agriculture.

III.2.6.1. Discussion et interprétation des résultats :

Le Cadmium :

Les teneurs en cadmium pour l'ensemble de points d'échantillonnage s'échelonnent entre 0.01 µg/l et 0.05 µg/l. La contamination par le cadmium reste faible si l'on en juge par la valeur maximale admissible, qui est de l'ordre de 3 µg/l, pour cet élément pour les eaux potables.

Le Chrome :

Les concentrations en chrome enregistrées au niveau des points de prélèvement sont très faibles et ne présentent aucun risque sur la santé. La valeur maximum en chrome est enregistrée au niveau du point P1 avec 6.13 µg/l.

Le Cobalt :

Pour la majorité des points d'eau étudiés, les valeurs de cobalt sont inférieures à la limite de détection. Certains points sont caractérisés par de faibles teneurs en cobalt si l'on juge par la valeur limite qui est de l'ordre de 1 mg/l. Le point P14 présente un teneur supérieure aux autres points : 7.28 µg/l.

La valeur enregistrée dans ce point d'eau peut être expliquée par une origine anthropique du cobalt.

Le Cuivre :

Les concentrations en cuivre restent très faibles par rapport à la concentration maximale admissible pour l'élément cuivre dans les eaux d'alimentation (1 mg/l). La valeur maximale est de l'ordre de 5.94 µg/l (P4) et la valeur minimale est de l'ordre de 2.95 µg/l (P5).

Le Manganèse : (fig. n° 44)

Dans la zone d'étude, les résultats des analyses montrent la présence de faibles teneurs en manganèse pour la majorité des puits d'échantillonnage. Les valeurs s'échelonnent entre 1.72 µg/l (P1) et 3.19 µg/l (P3). Cependant, les points P7 (42.23 µg/l)

et P14 (387.2 $\mu\text{g/l}$) sont caractérisés par des teneurs très élevées par rapport aux autres points.

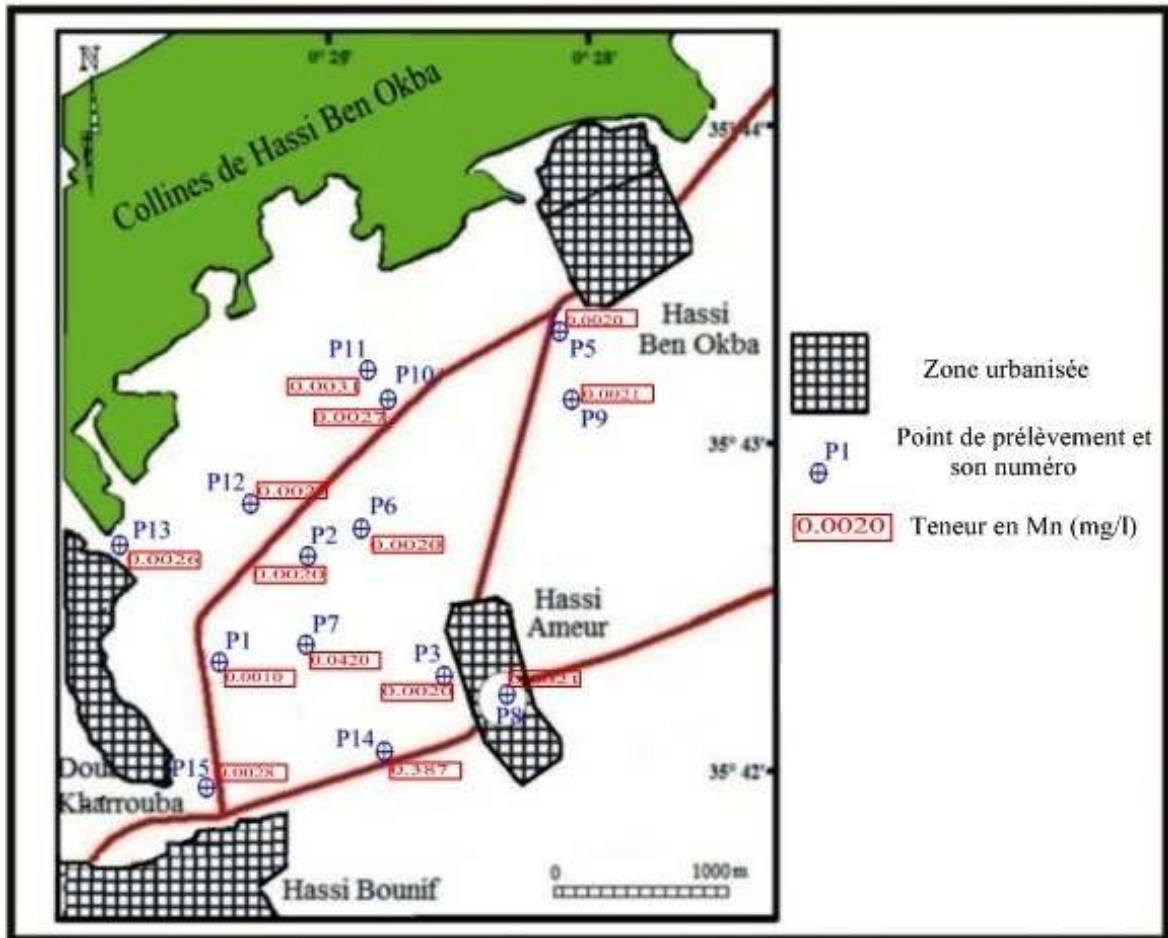


Figure n° 44 : Carte des teneurs en Manganèse (mg/l)

Le Fer :

Les résultats des analyses permettent de constater de faibles teneurs en fer : toutes des valeurs sont inférieures à 83.54 $\mu\text{g/l}$. Les teneurs maximales sont trouvées aux points P5 et P10 et sont inférieures à la norme de potabilité (0.2 mg/l).

Le Plomb :

Les résultats des analyses permettent de constater de faibles teneurs en plomb pour l'ensemble des points d'eau.

Le Sélénium : (fig. n° 45)

Les résultats des analyses témoignent d'une présence importante, voire dangereuse du sélénium dans les points eaux étudiés. Les résultats sont compris entre 42.39 $\mu\text{g/l}$, pour le point P15, et 126.40 $\mu\text{g/l}$, pour le point P7.

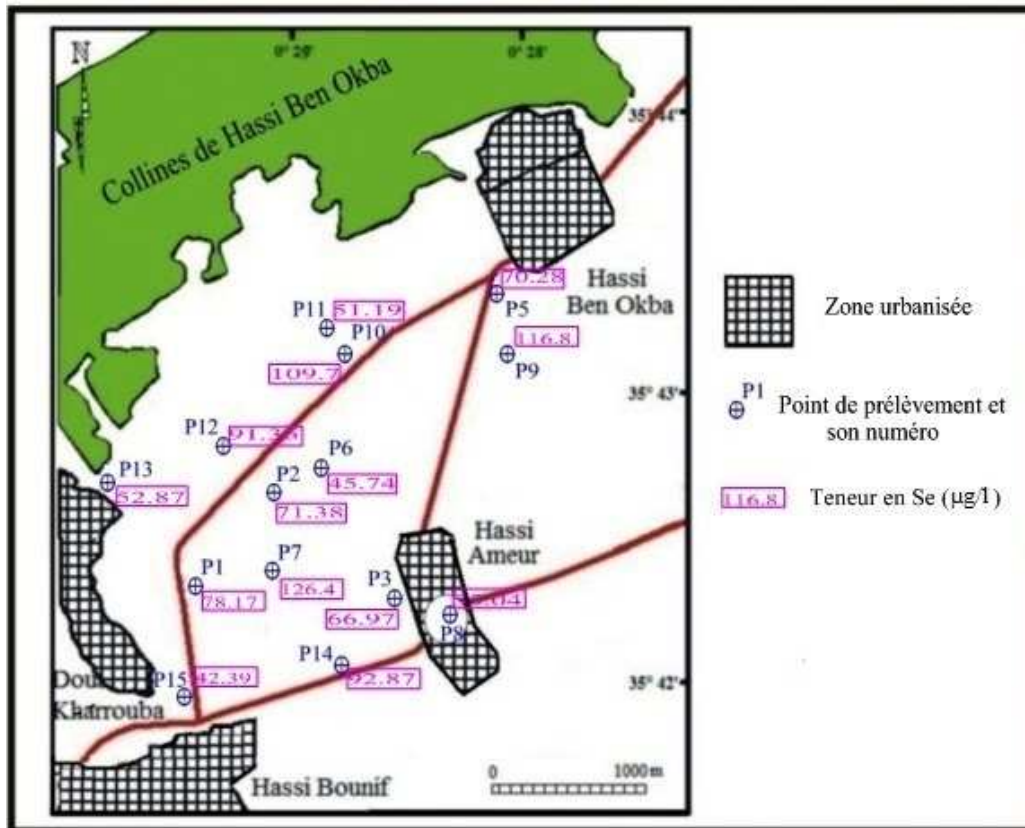


Figure n° 45 : Carte des teneurs en Sélénium ($\mu\text{g/l}$).

Pour rappel, le sélénium se rencontre à l'état de traces dans les pyrites, les minerais sulfurés du cuivre, du plomb, etc. Dans les eaux souterraines, on le retrouve sous forme de sulfures ou associé à des hydroxydes de fer. Le fond géochimique favorable à la présence de minéraux de sélénium est souvent associé à des gisements d'uranium. Une telle association se rencontre dans des grès, sables ou conglomérats à restes de plantes correspondant à d'anciens dépôts fluviaux (BRGM, 2006). En apport anthropique, d'origine industrielle, le sélénium constitue un sous-produit du raffinage du cuivre. Il est utilisé dans la préparation des colorants, en verrerie, en métallurgie et pour le traitement des textiles. L'OMS a retenu comme valeur limite dans l'eau destinée à la consommation humaine le chiffre de 10 $\mu\text{g/l}$. Pour l'irrigation, les eaux contenant plus de 0.5 mg/l ne sont pas utilisables. Dans notre secteur d'étude, les concentrations en cet élément représentent entre 4 et 12 fois la valeur maximale admissible pour les eaux de boisson. L'explication de la raison des fortes teneurs enregistrées en cet élément nécessite une investigation poussée et prolongée.

Le Zinc :

Les teneurs en zinc indiquent de faibles concentrations, particulièrement au niveau des points P10 et P14. Pour les autres points, les valeurs sont comprises entre 1.94 µg/l (P1) et 16.58 µg/l (P12).

Ces teneurs enregistrées au niveau de tous les points restent inférieures à la concentration maximale admissible (CMA) recommandée pour l'élément zinc dans les eaux d'alimentation (3 mg/l).

III.3. Mise en évidence des éléments indicateurs de pollution par un traitement statistique :

Le premier traitement statistique s'est porté essentiellement sur les éléments organiques : NO₃, NO₂, PO₄, NH₄, MES, MOA, SiO₂, la turbidité ainsi que le pH.

Le deuxième prend en compte les métaux lourds, et la minéralisation.

Le troisième englobe les éléments organiques et métaux lourds en plus du pH et de la minéralisation.

Le quatrième, plus global, a concerné les éléments, organiques, métaux lourds, majeurs, pH et minéralisation.

Le traitement statistique des données par l'XLSTAT dans les quatre étapes montre que les résultats obtenus sur deux axes donnent des valeurs inférieures à 60 %, ce qui rend le traitement par A.C.P inopérant. Le traitement se limitera donc aux matrices de corrélation et par la méthode CAH.

III.3.1. Les éléments organiques :

Celles-ci se composent d'une matrice de quatorze échantillons et dix éléments. Les résultats obtenus sur deux axes renseignent sur 58 % de l'information.

III.3.1.1. La matrice de corrélation :

La matrice de corrélation comprend neuf éléments (tableau n° 29). Cette matrice de corrélation permet de constater les résultats suivants :

La turbidité est bien corrélée avec la matière en suspension (MES) ($r = 0.923$).

Le pH est corrélé positivement avec les phosphates (PO₄) ($r = 0.720$).

La minéralisation est bien corrélée avec MOA ($r = 0.912$).

Tableau n° 29 : Matrice de corrélation des éléments organiques indicateurs de pollution.

	NO ₃	NO ₂	NH ₄	PO ₄	MOA	MES	SiO ₂	Turb	pH	Min
NO ₃	1									
NO ₂	-0.478	1								
NH ₄	-0.455	0.463	1							
PO ₄	-0.414	-0.199	-0.074	1						
MOA	-0.054	0.261	0.052	-0.386	1					
MES	-0.001	-0.296	0.322	0.381	0.003	1				
SiO ₂	-0.281	-0.202	-0.098	0.329	0.372	0.380	1			
Turb	-0.124	-0.274	0.191	0.554	0.018	0.923	0.426	1		
pH	-0.555	0.207	-0.019	0.720	-0.011	0.247	0.343	0.487	1	
Min	-0.011	0.444	0.300	-0.538	0.912	-0.078	0.122	-0.119	-0.141	1

III.3.1.2. La méthode CAH

Le graphique ci-dessous (fig. n° 46), correspond à l'un des objectifs du CAH. C'est un dendrogramme qui permet de bien regrouper les individus.

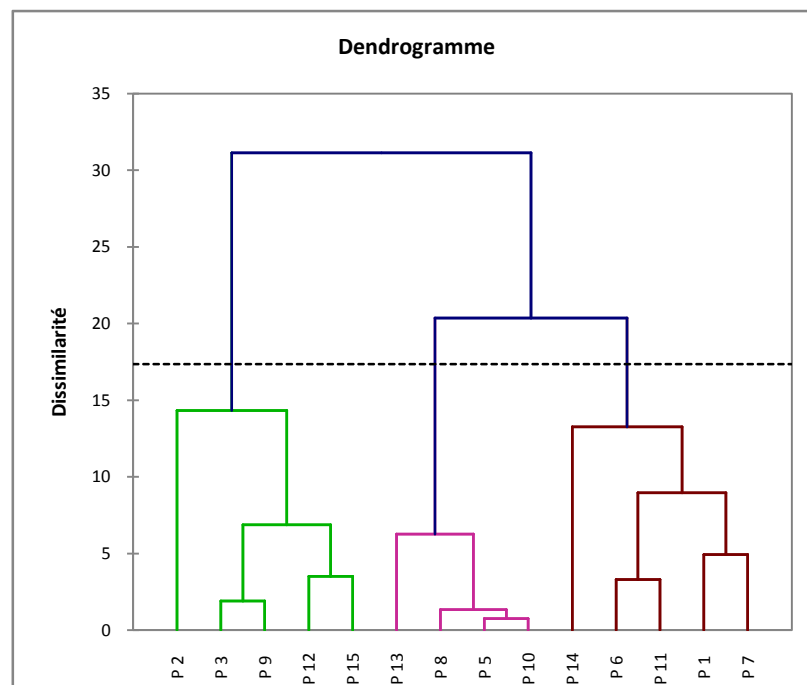


Figure n° 46 : Dendrogramme complet de regroupement des individus pour les éléments organiques.

On déduit de ce dendrogramme, deux grands groupes d'individus, répartis en trois classes :

- le groupe (I), englobe la classe n° 2. Les individus inclus dans ce groupe sont : P2, P3, P9, P12 et P15.
- le groupe (II), englobe deux classes ; classe n° 1 : P1, P6, P7, P11 et P14 et classe n° 3 : P5, P8, P10 et P13.

III.3.2. Les métaux lourds :

III.3.2.1. La matrice de corrélation :

La matrice de corrélation (tableau n° 30), comprend les métaux lourds, ainsi que la minéralisation. Cette matrice montre l'existence de quelques corrélations entre certains éléments :

Le Cuivre est moyennement corrélé positivement avec le Plomb ($r = 0.536$).

Le Sélénium est positivement corrélé avec la minéralisation ($r = 0.908$).

Le Plomb est moyennement corrélé négativement avec la minéralisation ($r = -0.593$).

Tableau n° 30 : Matrice de corrélation des métaux lourds.

	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Se	Cd	Pb	Min
Cr	1								
Mn	-0.147	1							
Fe	0.077	-0.181	1						
Cu	0.186	-0.283	0.386	1					
Zn	-0.253	-0.317	-0.037	-0.241	1				
Se	-0.040	0.227	-0.020	-0.429	0.351	1			
Cd	0.042	-0.221	0.021	0.110	-0.099	-0.116	1		
Pb	0.468	-0.357	0.197	0.536	-0.035	-0.470	-0.137	1	
Min	-0.076	0.397	-0.175	-0.332	0.220	0.908	-0.142	-0.593	1

III.3.2.2. La méthode CAH :

Le dendrogramme de la méthode (fig. n° 47), nous a permis de faire ressortir deux grands groupes :

- un groupe I qui englobe la classe "C1": P1, P2, P6, P8, P11, P13 et P15.
- Un groupe II qui englobe deux classes :
 - o Classe "C2"(individu P14),
 - o Classe "C3". Elle regroupe les individus P3, P5, P9, P10 et P12.

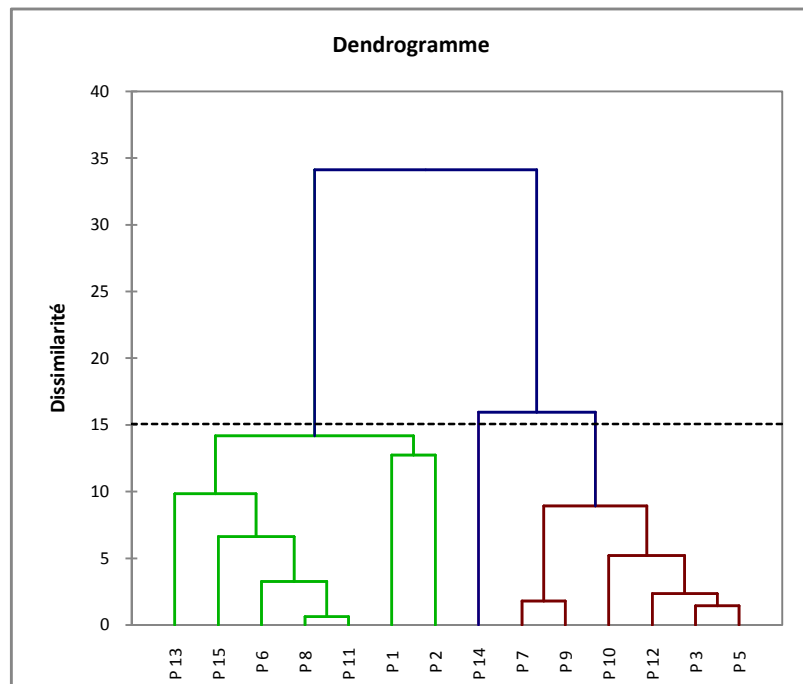


Figure n° 47 : Dendrogramme complet de regroupement des individus pour les métaux lourds.

III.3.3. L'analyse statistique globale :

III.3.3.1. La matrice de corrélation

La matrice de corrélation (tableau n° 31), composée de 18 éléments révèle les résultats suivants :

Les nitrites sont bien corrélés positivement avec le manganèse (Mn) et moyennement avec le sodium ($r = 0.589$).

L'ammonium est moyennement corrélé positivement avec le manganèse ($r = 0.518$).

Les phosphates sont moyennement corrélés positivement avec la turbidité ($r = 0.554$) et le fer ($r = 0.602$), le cuivre ($r = 0.736$) et le pH ($r = 0.720$). Ils sont négativement corrélés avec les chlorures ($r = -0.533$).

Les matières organiques acides (MOA) sont bien corrélés positivement avec le sélénium ($r = 0.941$), le sodium ($r = 0.798$), les chlorures ($r = 0.892$) et la minéralisation ($r = 0.901$).

Les matières en suspension (MES) sont bien corrélées positivement avec la turbidité ($r = 0.923$). Celle-ci est corrélée positivement avec le fer ($r = 0.680$).

Le manganèse est moyennement corrélé avec le sodium ($r = 0.541$).

Le sélénium est bien corrélé positivement avec le sodium ($r = 0.761$), les chlorures ($r = 0.965$) et la minéralisation ($r = 0.908$).

Il existe aussi de bonnes corrélations entre les chlorures, le sodium et la minéralisation.

Tableau n° 31 : Matrice de corrélation globale.

	NO ₃	NO ₂	NH ₄	PO ₄	MOA	MES	Turb	Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	HCO ₃	Mn	Fe	Cu	Se	Cd	Min
NO ₃	1																		
NO ₂	0.478	1																	
NH ₄	0.455	0.463	1																
PO ₄	0.414	0.199	0.074	1															
MOA	0.054	0.261	0.052	0.386	1														
MES	0.001	0.296	0.322	0.381	0.003	1													
Turb	0.124	0.274	0.191	0.554	0.018	0.923	1												
Ca	0.600	0.290	0.208	0.414	0.259	0.171	0.283	1											
Mg	0.338	0.440	0.318	0.043	0.665	0.264	0.293	0.420	1										
Na	0.202	0.589	0.381	0.451	0.798	0.097	0.109	0.096	0.828	1									
Cl	0.012	0.345	0.313	0.533	0.892	0.018	0.088	0.436	0.535	0.804	1								
SO ₄	0.106	0.188	0.119	0.133	0.272	0.176	0.151	0.277	0.488	0.523	0.100	1							
HCO ₃	0.624	0.604	0.530	0.124	0.110	0.093	0.187	0.799	0.708	0.523	0.087	0.282	1						
Mn	0.426	0.957	0.518	0.271	0.180	0.228	0.211	0.300	0.414	0.551	0.318	0.065	0.646	1					
Fe	0.554	0.366	0.304	0.262	0.069	0.136	0.236	0.174	0.084	0.541	0.148	0.129	0.093	0.181	1				
Cu	0.242	0.154	0.336	0.736	0.305	0.067	0.237	0.488	0.069	0.165	0.513	0.387	0.169	0.283	0.386	1			
Se	0.089	0.278	0.226	0.429	0.941	0.036	0.005	0.391	0.558	0.761	0.965	0.087	0.044	0.227	0.020	0.429	1		
Cd	0.332	0.228	0.404	0.092	0.147	0.181	0.124	0.048	0.219	0.151	0.144	0.003	0.234	0.221	0.021	0.110	0.116	1	
Min	0.011	0.444	0.300	0.538	0.912	0.078	0.168	0.265	0.675	0.899	0.949	0.315	0.235	0.397	0.175	0.332	0.908	0.142	1

III.3.3.2. L'analyse globale par la méthode de CAH :

Cette classification ascendante hiérarchique à travers les deux dendrogrammes de la figure n° 48, nous permet de faire ressortir deux grandes groupes :

- Le groupe I qui englobe la classe (C2) du dendrogramme, avec les individus suivants : P1, P2, P3, P6, P8, P11, P13 et P15.
- Le groupe II qui englobe les deux classes ; la classe "C1" (P7 et P14) et la classe "C3" (P5, P9, P10 et P12).

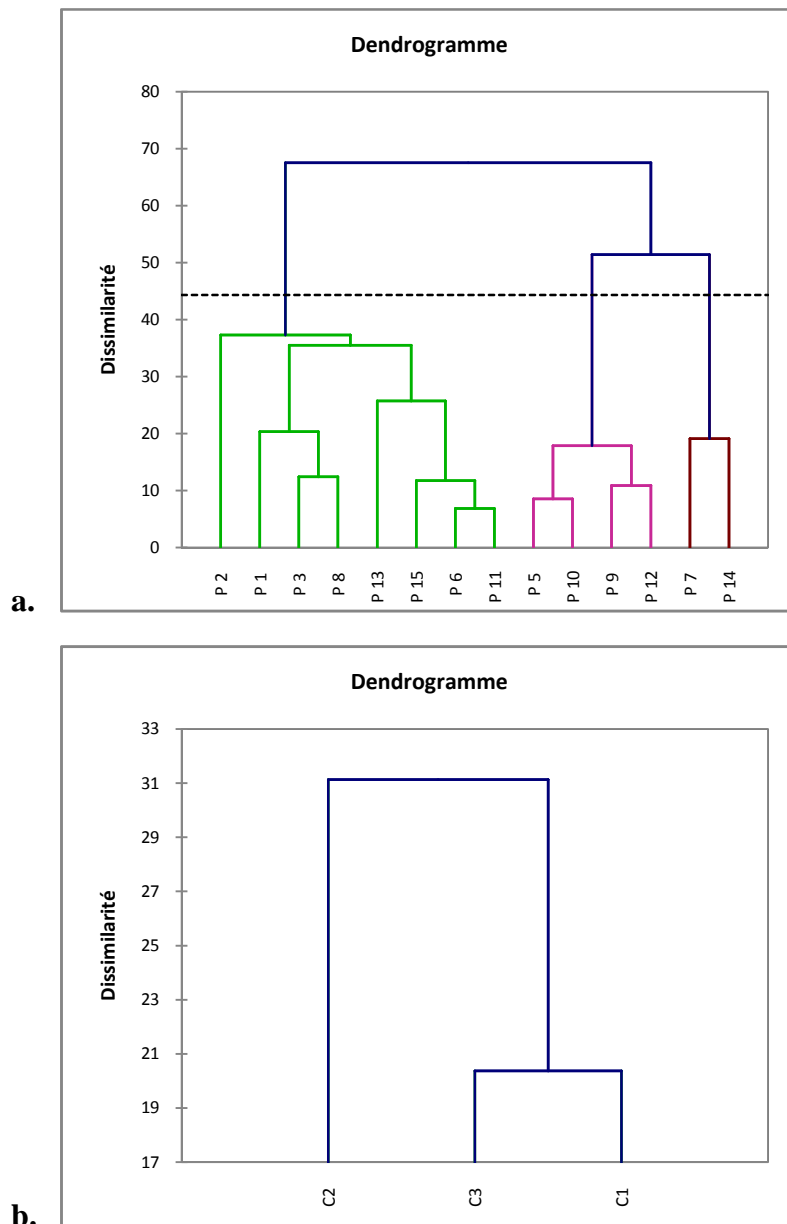


Figure n° 48 : a. Dendrogramme complet.

b. Dendrogramme de regroupement des individus pour l'analyse globale.

Conclusion

La caractérisation de la qualité des eaux de la nappe étudiée, du point de vue caractérisation et étude des éléments indicateurs de pollution, a permis de délimiter les points affectés par tel ou tel élément indicateur de pollution.

La confrontation des teneurs en éléments indicateurs de pollution aux normes de potabilité permet de faire ressortir les résultats suivants :

Pour les éléments nutritifs, les nitrates sont détectés avec des teneurs dépassant les normes de potabilité pour l'ensemble des points d'eaux sauf pour les points P6 et P14 (≤ 50 mg/l).

Pour les autres d'éléments, les normes sont respectées, sauf pour le point P14 qui se caractérise par une teneur en NO_2 dépassant la norme de potabilité.

L'étude des résultats des analyses métalliques des échantillons révèle, d'une manière globale, la présence de teneur du sélénium dépassant très fortement les normes OMS de potabilité, entre 2 et 12 fois la valeur maximale admissible.

Les autres métaux lourds présentent des teneurs inférieures aux normes de potabilité, sauf pour le Mn dont les teneurs moyennes sont élevées, point (point P7) par rapport aux autres points, et dépassent les limites de potabilité pour le point P14.

A cet effet, l'utilisation des eaux de la nappe étudiée est fortement déconseillée pour l'industrie, surtout agro-alimentaire, ou comme eau de bain. Même en cas de traitement des eaux, ce traitement doit être spécifique à l'élimination des métaux lourds incriminés.

Le traitement statistique des données globales introduites dans ce chapitre à travers la méthode de classification ascendante (CAH), nous a permis de faire ressortir deux grandes groupes d'individus, répartis en trois classes :

Le premier groupe (G I), englobe la classe (C2) du dendrogramme, avec les individus P1, P2, P3, P6, P8, P11, P13 et P15.

Le deuxième groupe (G II) : englobe la classe "C1" (P7 et P14) et la classe "C3" (P5, P9, P10 et P12).

Introduction

La protection de la qualité des ressources en eau est devenue une des priorités dans plusieurs pays dans le monde, en raison d'une part de leur rareté et d'autre part de leur confrontation aux multiples sources de pollution : rejets d'eaux industrielles, décharges brutes, engrais, etc.

La protection des ressources en eaux souterraines nécessite au préalable la caractérisation du degré de leur vulnérabilité à la pollution.

La prévention contre la pollution demeure la solution la plus avantageuse pour la sauvegarde de la ressource. De ce fait, l'élaboration d'une carte de vulnérabilité à la pollution représente la première démarche pour la prévention de cette ressource.

L'objectif de ce chapitre est d'appliquer une méthode d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe étudiée par approche cartographique.

IV.1. Notions générales et méthodologie :

IV.1.1. Notions de vulnérabilité et risque :

La notion de vulnérabilité est différente de la notion de risque. Un aquifère peut être vulnérable mais en l'absence de pression anthropique ne pas être atteint par une pollution. Autrement dit, la notion de vulnérabilité ne dépend que des seules conditions physiographiques et hydrogéologiques du milieu, elle n'inclut pas le degré d'exposition aux risques de pollution.

On rappelle que le risque est la probabilité qu'un effet indésirable se réalise dans des conditions d'exposition données. Ce n'est pas tant la présence de polluants (exemple : fuite d'hydrocarbures provenant de cuves) qui pose problème mais le fait que cette pollution soit mobilisable (exemple : propagation rapide du polluant vers la nappe libre non protégée) et donc qu'elle risque de porter préjudice à des enjeux (exemple : captage pour l'alimentation en eau potable). Ainsi le risque découlant de l'aléa, de l'enjeu et de la vulnérabilité donnés en exemple est l'altération du captage pour l'alimentation en eau potable voire son arrêt (eau rendue impropre à la consommation) par l'arrivée d'un polluant au sein de l'aquifère.

La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation avec la nappe d'eau souterraine procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions suivant les caractéristiques de ce milieu. La vulnérabilité peut être définie à trois niveaux distincts.

Au premier niveau, la vulnérabilité se définit comme l'aptitude d'un système en eau souterraine à être contaminé, c'est-à-dire son inaptitude à être protégé d'une contamination. Ce phénomène est lié à la dynamique externe au système, donc à différentes conditions influençant la pénétration du contaminant dans le système.

Au second niveau, la vulnérabilité intègre l'aptitude des eaux à propager et à conserver la contamination. C'est la dynamique interne du système. Les conditions existant dans le milieu aquifère conditionnent le transport, la dispersion et la persistance du contaminant.

Le troisième niveau prend en considérations les caractéristiques polluantes du contaminant liées aux effets de gêne et de nuisance aux concepts de normes de seuils, et l'aptitude ou inaptitude à l'usage prévu. Ce niveau est donc celui de l'utilisation de l'eau comme source d'alimentation en eau potable, usage pour lequel l'eau doit répondre à certains critères.

La vulnérabilité définie au premier niveau n'autorise aucune pénétration de

contaminant dans le système. Au contraire, la vulnérabilité définie au troisième niveau autorise une entrée du contaminant dans le système, à condition que la concentration en contaminant dans l'eau prélevée dans le système ne rende pas celle-ci inapte à l'utilisation envisagée.

Il apparaît tout de suite que le premier niveau (type de gestion écologique ou environnementale) sera le plus strict, mais sera aussi de ce fait celui qui permettra la conservation de la ressource pour toute utilisation future. Le second niveau est celui utilisé généralement pour la définition des périmètres de protection des captages, qui est un cas particulier de protection des eaux souterraines.

IV.1.2. Types de vulnérabilité :

On peut distinguer deux types de vulnérabilité ; une vulnérabilité intrinsèque et une vulnérabilité spécifique.

a. La vulnérabilité intrinsèque est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines ;

b. La vulnérabilité spécifique est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine au polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

IV.1.3. Les critères de vulnérabilité :

Dans le cadre de ce travail, c'est la vulnérabilité intrinsèque, telle que décrite ci-dessus, qui va être l'objectif de l'approche de cartographie. Pour qualifier cette vulnérabilité un certain nombre de critères sont nécessaires.

IV.1.3.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque : (tableau n° 32)

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

a. Critères relatifs au sol :

Ruissellement – infiltration : le ruissellement et l'infiltration efficace (quantité d'eau s'infiltrant jusqu'à la nappe) sont représentatifs de la recharge de la nappe. Ils sont étroitement liés à la topographie et à la nature des formations superficielles et peuvent être représentés dans l'espace grâce à la méthode dite des "indices de persistance des réseaux". Cette méthode permet la représentation de zones de recharge préférentielle de la nappe. Elle se base sur la comparaison de la topographie traduite en zones potentiellement favorables au ruissellement ou à l'infiltration (à partir du traitement du MNT) avec le réseau hydrographique pris comme représentatif de la réalité de la répartition du ruissellement et de l'infiltration.

Couverture pédologique : la nature, la texture, la teneur en argiles et en matière organique, ainsi que la puissance (ou épaisseur) et à la perméabilité verticale des sols régulent la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la zone non saturée.

b. Critères relatifs à la zone non saturée :

Profondeur de la nappe libre (ou épaisseur de la zone non saturée) : l'épaisseur de la Z.N.S conditionne le temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physico-chimiques avec l'encaissant) et donc sa possible dégradation en cours de transfert.

Amplitude de battement de la nappe : l'amplitude de battement de la nappe, dans la mesure où elle est significative, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe (sol + ZNS). De ce fait elle peut devenir un critère de vulnérabilité.

Perméabilité verticale de la ZNS : elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe.

Structure de la ZNS : les variations de faciès, l'épaisseur des discontinuités de faciès et leur position dans le profil vertical, la texture, la teneur en matière organique et en argile des formations, sont autant de facteurs qui conditionnent la migration de fluides vers la nappe.

c. Critères relatifs la zone saturée :

Type de la nappe (libre ou captive) : l'absence d'horizon imperméable entre la surface et le toit d'une nappe libre confère un caractère plus vulnérable qu'une nappe captive protégée par des formations imperméables.

Paramètres hydrodynamiques des formations aquifères (transmissivité (T), perméabilité (K), coefficient d'emmagasinement (S), gradient hydraulique(i) : ils déterminent la vitesse de migration des polluants dans la nappe et les temps de résidence de ceux-ci dans la zone saturée.

Piézométrie : elle rend compte de la géométrie de la nappe et de son fonctionnement hydrodynamique qui peuvent évoluer au cours d'un cycle hydrologique complet. Entre les périodes de hautes eaux et de basses eaux par exemple, les directions d'écoulement et/ou les relations eaux superficielles/eaux souterraines peuvent s'inverser.

Direction et sens d'écoulement : ils déterminent les espaces susceptibles d'être atteint par un polluant une fois que celui-ci atteint la nappe.

Type de système hydrogéologique : la vulnérabilité d'un système hydrogéologique peut être appréhendée à partir de la connaissance de sa réactivité aux impulsions pluviométriques. Un système au caractère transmissif fort se caractérise par des temps de transfert rapides des eaux depuis la surface vers la zone saturée et par de faibles temps de séjour. Il s'agit par exemple des systèmes carbonatés fortement karstifiés. Un système au caractère inertiel et/ou capacitif fort se caractérise par des temps de transfert et des temps de séjours longs.

Relation nappe/cours d'eau : les relations entre les eaux superficielles et les eaux souterraines peuvent être de deux types, drainage ou alimentation, et conditionnent la possibilité de contamination des eaux souterraines à partir des eaux superficielles.

Epaisseur de l'aquifère : (quantité de réserve) : la quantité d'eau stockée dans l'aquifère détermine les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe.

Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci. Cet horizon va déterminer le caractère libre ou captif de la nappe.

d. Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone Saturée :

Fracturation (directions et densité). Des discontinuités verticales telles que les failles peuvent, dans certaines conditions, jouer le rôle de drain et augmenter très sensiblement les vitesses d'infiltration depuis la surface vers la nappe.

Recharge : il s'agit de la quantité d'eau atteignant la Zone Saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette). Elle dépend de l'infiltration efficace et de sa répartition dans l'espace et dans le temps, donc du climat (ETP, précipitations), mais également de la

topographie et de la nature des formations. Elle peut être appréhendée à partir de la représentation de ces différents éléments constitutifs. Elle constitue un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

Tableau n° 32 : Critères de vulnérabilité intrinsèque.

Critères de vulnérabilité intrinsèque		
Sol	Zone Non Saturée (ZNS)	Zone Saturée
Ruissellement-infiltration Pédologie : perméabilité verticale des sols, nature et texture des sols	Profondeur de la nappe libre Temps de transfert : perméabilité verticale Structure de la ZNS : variation de facies, épaisseur des discontinuités de facies, position dans le profil vertical, texture, teneur en m.o. et argile	Type de nappe Temps de résidence dépend des paramètres hydrodynamiques des formations aquifères Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci Relation eaux souterraine/ eaux superficielles
		Piezométrie : évolution des sens et direction d'écoulement selon la période du cycle hydrologique épaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)
		Type de système hydrogéologique : caractères plus ou moins capacitif et transmissif Direction et sens d'écoulement
Battant de nappe		
Recharge : quantité d'eau atteignant la ZS sur une période donnée (recharge annuelle nette)		
Fracturation, directions et densité		

IV.1.4. Méthodologie de cartographie de la vulnérabilité des aquifères : (tableau n° 33)

Les méthodes d'évaluation, bien que devant être précises, fiables et faciles d'utilisation, se doivent aussi d'être simples, rapides et peu onéreuses, même (ou surtout) si elles ne sont que des études préliminaires. Celles-ci peuvent être désirées pour une décision de planification d'aménagement, pour une présélection de sites, pour un travail de première approche ou même pour l'implantation d'un captage en un lieu de risque minimal. Elles

doivent être avant tout des outils de gestion pratiques et souples afin d'être utilisées par le plus grand nombre d'intervenants. Elles doivent être simples d'utilisation afin d'être appliquées dans tous les cas, sans réticences ou restrictions, et ainsi répondre à leurs finalités.

Les paramètres utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité sont répertoriés dans le tableau 33. Ils incluent, entre autres, les caractéristiques du sol, les caractéristiques hydrologiques de la zone saturée et non saturée, la recharge nette, la profondeur de l'eau, et la perméabilité des aquifères. Certains auteurs ont également ajouté d'autres paramètres, qui sont beaucoup plus difficiles à collecter et souvent peu disponible dans certains contextes.

Tableau n° 33 : Principales méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines (Civita, 1993).

METHOD		BASIC PARAMETERS													
REFERENCE	TYPE	PRECIPITATION RATE & CHEMICAL COMPOSITION	TOPOGRAPHIC SURFACE SLOPE VARIABILITY	STREAMFLOW NETWORK DENSITY	THICKNESS, TEXTURE & MINERALOGY	EFFECTIVE MOISTURE	PERMEABILITY	PHYSICAL & CHEMICAL PROPERTIES	AQUIFER CONNECTIONS TO SURFACE WATER	NET RECHARGE	CHARACTERISTICS OF THE UNSATURATED ZONE	DEPTH TO WATER	WATER LEVEL CHANGES	HYDROGEOLOGICAL FEATURES	AQUIFER HYDRAULIC CONDUCTIVITY
Albinet & Margat (1970) B.R.G.M. (1976...)	HCS									•		•	•		•
Vrana (1968) Olmer & Rezac (1974)	HCS											•			•
Fenge (1976)	RS				•						•	•	•	•	•
Josopait & Schwerdtfeger (1979)	HCS										•	•	•		•
Zampetti (1983) Fried (1987)	AR											•	•		
Villumsen et al (1983)	RS				•							•	•	•	•
Haertle (1983)	MS											•	•		
Vrana (1984b)	HCS	•			•							•			•
Subirana Asturias & Casas Ponsati (1984)	HCS									•		•	•		•
Engelen (1985)	MS									•		•	•		•
Zaporozec (1985)	RS				•	•	•	•				•	•		•
Breeuwmsa et al (1986)	HCS				•	•	•	•	•	•	•	•	•		•
Sotornikova & Vrba (1987)	RS							•				•	•	•	
Ostry et al (1987)	HCS				•			•				•			•
Ministry Flemish Comm. (1986) Goossens & Van Damme 1987)	MS				•			•				•			•
Carter et al (1987) Palmer (1988)	MS				•		•	•							•
Marcolongo & Pretto (1987) Method 1	RS				•				•	•	•				
Marcolongo & Pretto (1987) Method 2	AR						•				•	•	•		
GOD - Foster (1987)	RS											•	•		•
Schmidt (1987)	RS				•							•	•		
Trojan & Perry (1988)	PCSM	•	•				•				•	•	•		•
Civita in Benacchio et al (1988)	HCS									•		•	•		•
DRASTIC - Aller et al (1987)	PCSM		•		•						•	•	•		•
SINTACS - Civita (1990a)	PCSM		•	•	•					•	•	•	•		•

Explanation: AR - analogical relations, HCS - hydrogeological complex and setting, MS - matrix system, PCSM - point count system model, RS - rating system.

Les techniques d'évaluation peuvent être regroupées en trois groupes de base :

- 1 - Les méthodes de cartographie des complexes hydrogéologiques (HCS).
- 2 - Les méthodes à cotation numérique (MS, RS, PCSM).
- 3 - Les modèles mathématiques (AR).

Il est important de noter que l'élaboration d'une carte de vulnérabilité peut varier d'un concepteur à l'autre, la détermination des indices étant parfois subjective. Elle peut aussi varier en fonction du type et de la quantité d'information disponible, des erreurs occasionnées sur la prise de données, et de la méthode de détermination des paramètres (un bon exemple est celui de la recharge). Il est possible d'élaborer une carte de vulnérabilité générale, avec peu d'information puis de compléter ou de modifier cette carte en fonction des nouvelles données.

Parmi les méthodes à cotation numérique, une méthode à "index avec pondération des critères" (point count system model - PCSM) est d'usage très courant au niveau international et a été appliquée à plusieurs aquifères en Algérie. C'est la méthode **DRASTIC**.

Cette méthode a été développée pour l'US Environmental Protection Agency en 1985 par Aller et al. (1987). Elle est identifiée sous le sigle *DRASTIC*, correspondant à l'acronyme des lettres initiales de sept paramètres utilisés pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères, à savoir :

- (D): Profondeur de la surface de la nappe (ou Depth);
- (R): Recharge nette;
- (A): Nature lithologique de l'aquifère;
- (S): Sol (granulométrie et faciès);
- (T): Topographie des terrains;
- (I): Impact de la zone non saturée (lithologie et épaisseur);
- (C): Conductivité hydraulique (perméabilité) de la zone saturée.

La méthode est basée sur l'attribution d'une notation aux différents paramètres utilisés (variant généralement entre 1 et 10) et leur groupement dans des classes différentes. Une pondération est également attribuée selon l'importance relative de chacun des paramètres utilisés. Une fois les différentes classes définies et leurs notes attribuées, la méthode détermine l'indice DRASTIC (I_d) qui permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de la nappe. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice (I_d) calculé est élevé. Cet indice est défini de la manière suivante:

$$\text{Id} = (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w)$$

Avec :

D, R, A, S, T, I, C : représentent les paramètres DRASTIC définis précédemment r et w : représentent respectivement le poids et la note attribués à chaque paramètre DRASTIC.

L'établissement de la carte de vulnérabilité d'une nappe à la pollution consiste à reporter dans l'espace les valeurs de l'indice DRASTIC (Id) et leur regroupement dans cinq classes différentes.

Les paramètres les plus importants ont une pondération de 5; le moins significatif, un poids de 1. Plus l'indice DRASTIC est élevé, plus le risque de contamination des eaux souterraines est élevé.

L'indice DRASTIC fournit seulement un outil d'évaluation relative et n'est pas conçu pour fournir des réponses absolues. Les résultats (indices et classes de vulnérabilité) restent impossibles à interpréter physiquement. En fait, si la méthode DRASTIC est de mise en œuvre relativement aisée, il se trouve souvent que la disponibilité simultanée des données relatives aux sept paramètres indispensables ne soit pas au rendez-vous. Ceci pousse souvent les utilisateurs de cette méthode à parer à cette difficulté en recourant à des estimations et des ajustements, parfois aléatoires, des paramètres manquants réduisant ainsi de beaucoup la pertinence de la méthode.

A cet effet, vue la difficulté d'acquérir ou de disposer de données fiables relatives aux paramètres DRASTIC dans notre secteur d'étude, nous avons eu recours à une méthode qui nous a paru plus intéressante, en raison de sa structure simple et pragmatique. C'est la méthode intitulée "G.O.D". Elle présente l'avantage de ne mettre en œuvre que trois paramètres au lieu des sept de la précédente méthode. C'est une méthode à cotation numérique mais à "système de classement" (rating systems - RS). Pour rappel, les systèmes de classement simple sont largement dérivés des systèmes de Legrand (1964 et 1983). Une plage fixe est donnée à n'importe quel paramètre qui est jugé nécessaire et suffisant pour l'évaluation de la vulnérabilité. La gamme est bien divisée, en fonction de l'intervalle de variation de chaque paramètre. La somme des points de classement donne l'évaluation requise pour tout point ou zone. Le score numérique final est divisé en segments (du minimum au maximum) exprimant un degré de vulnérabilité relative.

IV.1.4.1. Présentation de la méthode G.O.D (figure 49).

La méthode a été proposée par S. Foster (1987). Elle utilise une approche où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée (au sens de pénétration du polluant) et de la capacité d'atténuation que présente la couche sus-jacente à la zone saturée.

L'approche employée pour ce modèle a recours à trois paramètres :

- Le premier réside dans l'identification du type d'aquifère, en fonction de son degré de confinement (**G**roundwater occurrence) (**G**).
- Le deuxième est défini par les caractéristiques des couches surmontant la zone saturée de l'aquifère en ce qui a trait à leur degré de porosité relative, à leur perméabilité et à leur contenu en eau (**O**verall aquifer class) (**O**).
- Le troisième correspond à la profondeur à la nappe (**D**epth to groundwater table) (**D**).

L'indice de vulnérabilité (IGOD) est obtenu par la multiplication des indices de chacun de ces trois paramètres.

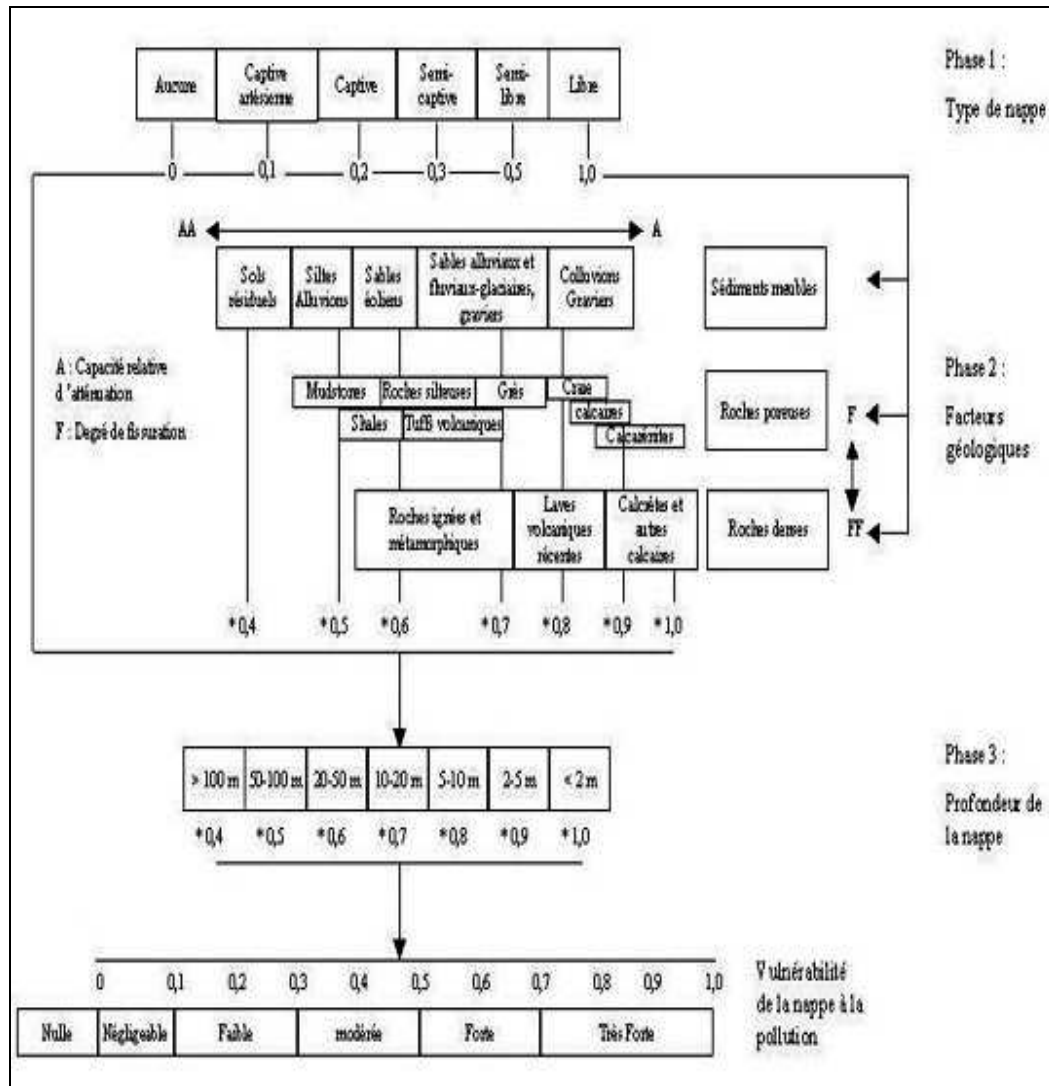


Figure n° 49: Méthode GOD pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la contamination (S. Foster, 1987).

IV.2. Mise en œuvre de la méthode GOD

Comme signalé plus haut, sur la base de la faible densité de nombre de paramètres pertinents dans notre secteur, notre choix s'est porté sur la méthode d'évaluation G.O.D.

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères par la méthode GOD a été faite par le calcul de l'indice GOD (IG). Le calcul de l'indice GOD est donné par la formule suivante :

$$IG = Ca \times C1 \times Cd$$

Avec

- **Ca**: Type d'aquifère.

- **C1**: Lithologie de l'aquifère (essentiellement la zone non saturée).
- **Cd**: Profondeur de la nappe.

Chaque critère est cartographié avec un index ou cote allant typiquement de 0 à 1 pour le paramètre G et de 0,4 à 1 pour les paramètres O et D.

Les cartes ainsi obtenues permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index.

IV.2.1. Acquisition et description des paramètres G.O.D :

Il s'agit ici de présenter les différentes données utilisées pour l'évaluation des différents paramètres.

L'identification et évaluation des paramètres requièrent des connaissances de la géologie et de l'hydrogéologie du secteur investigué. Ces informations sont le plus souvent contenues dans des rapports, des mémoires ou des banques de données.

Dans certains cas, les données disponibles pour la réalisation des cartes de vulnérabilité étant peu nombreuses ou imprécises, il a fallu faire des campagnes de terrain ou poser des hypothèses, comme c'est le cas dans l'identification de l'influence de la zone non saturée, où on dispose des coupes lithologiques au niveau des forages et des sondages et des coupes géologiques à travers le secteur d'étude, ce qui nous a permis de délimiter les matériaux et donc de déterminer le paramètre (O).

IV.2.1.1. Type d'aquifère (G) :

Le type d'aquifère constitue l'un des facteurs importants contrôlant la vulnérabilité des aquifères. Les nappes libres sont les plus vulnérables par rapport aux pollutions de surface que les nappes semi-captives ou captives. La présence d'une couche à faible perméabilité peut rendre l'aquifère captif et donc limiter la traversée du polluant vers l'aquifère.

IV.2.1.2. Impact de la zone vadose (O) :

C'est un paramètre très important dans la méthode G.O.D. La zone vadose comprend l'ensemble des niveaux du sous-sol et du sol situés au-dessus de la nappe. Cette zone est aussi caractérisée par un fort degré d'hétérogénéité qui peut rendre très aléatoire la

transposition à des bassins de plusieurs dizaines de km² de valeurs de paramètres obtenues sur échantillons à l'échelle d'une parcelle par exemple.

Pour l'application de la méthode G.O.D, la zone vadose correspond à la portion souterraine du terrain comprise entre le sol et le niveau de la nappe d'eau souterraine (fig. n° 50).

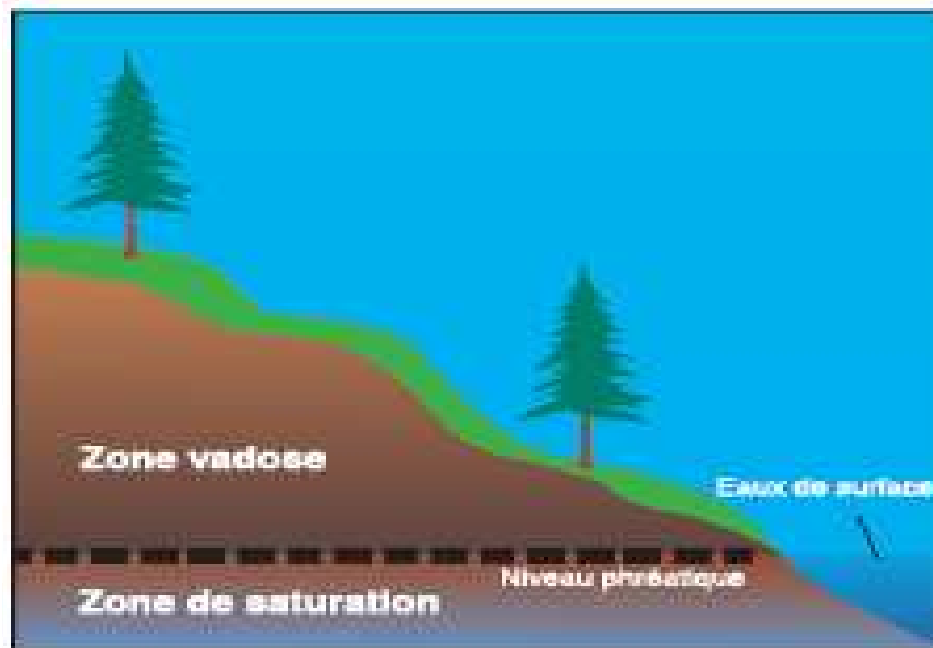


Figure n° 50 : Schéma illustrative de la zone vadose (zone non saturée).

Dans le détail, le comportement de chaque matériau aquifère est particulier vis à vis du risque d'acheminement de toute pollution potentielle :

➤ **Argiles schisteuses massives :**

Dans les couches épaisses d'argiles schisteuses indurées seule une petite quantité d'eau est stockée dans les fractures et les feuillets quand ils existent suite à une pollution potentielle faible. La pollution potentielle est influencée par le degré de saturation.

➤ **Roches métamorphiques et éruptives :**

Les roches consolidées métamorphiques ou éruptives qui originellement contiennent ou pas une faible porosité primaire et qui contiennent l'eau seulement dans les fractures à l'intérieur de la roche ou les forages ou les puits donnent de faibles débits et la pollution potentielle est fonction du degré de fracturation.

➤ **Roches métamorphiques et éruptives altérées :**

Ce sont des roches altérées ou non consolidées qui dérivent et se trouvent sur des roches consolidées saines. En plus des vides créés par l'altération, elles possèdent une porosité primaire. Par conséquent, la pollution potentielle peut être nettement plus importante.

➤ **Séquences de couches de grés, calcaires et d'argiles schisteuses :**

Ce sont généralement des séquences de couches peu épaisses de roches sédimentaires. La pollution potentielle varie en fonction du degré de fracturation.

➤ **Grés massifs :**

Les couches de grés consolidés, généralement plus épaisses que le type précédent ; contiennent une porosité primaire et une porosité secondaire. La pollution potentielle est largement contrôlée par ces deux types de porosité.

➤ **Calcaires massifs :**

Les couches de calcaires et de dolomies caractérisées par des bancs généralement épais comme "grès massif". La pollution potentielle est largement fonction du degré de fracturation, des cavités et du nombre de dolines.

➤ **Sables et graviers :**

En général, dans les couches non consolidées formées de sables et de graviers qui contiennent beaucoup de particules fines ; plus les matériaux sont propres et grossiers, plus la pollution potentielle est importante.

➤ **Basalte :**

Ce sont des formations éruptives consolidées qui contiennent des fractures et une porosité de fente en général. La pollution potentielle dépend des intercommunications des ouvertures qui se sont formées lors du refroidissement des laves. Le polluant a peu de chance d'être atténué une fois celui-ci à l'intérieur des fractures.

IV.2.1.3. Profondeur de la nappe (D) :

Elle est représentée par la distance séparant le niveau du sol et le niveau piézométrique de la nappe. Dans le cas d'une nappe libre, la profondeur de l'eau représente

la portion du sol entre la limite de la couche végétale, à la surface du sol, et la surface libre de la nappe ; alors que dans le cas d'une nappe captive, elle représente la tranche du sol entre la couche végétale et le substratum supérieur (toit) de l'aquifère.

La profondeur de l'eau, est un paramètre très important de la méthode GOD, parce qu'il représente l'épaisseur que va traverser un polluant avant d'arriver à l'aquifère.

En général, il y a de fortes chances que le polluant s'atténue au fur et à mesure que la profondeur de la nappe augmente et donc plus le niveau d'eau est profond plus la durée de traversée du polluant est grande.

La méthode GOD suppose que le polluant est déversé à la surface du sol, entre dans le sol, traverse la zone non saturée et atteint le niveau piézométrique soit l'aquifère (S.S).

Les valeurs références des côtes des trois paramètres sont représentées au tableau de la figure n° 49.

IV.2.2. Traitement des données :

L'application de la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité et le traitement des données ne peut être possible sans l'utilisation des fonctionnalités des systèmes d'information géographique (SIG), en raison de la masse importante des données nécessaires et par la mise en œuvre de la spécialisation numérique du potentiel de contamination des eaux souterraines.

La démarche générale suivie peut être synthétisée par l'illustration n° 51.

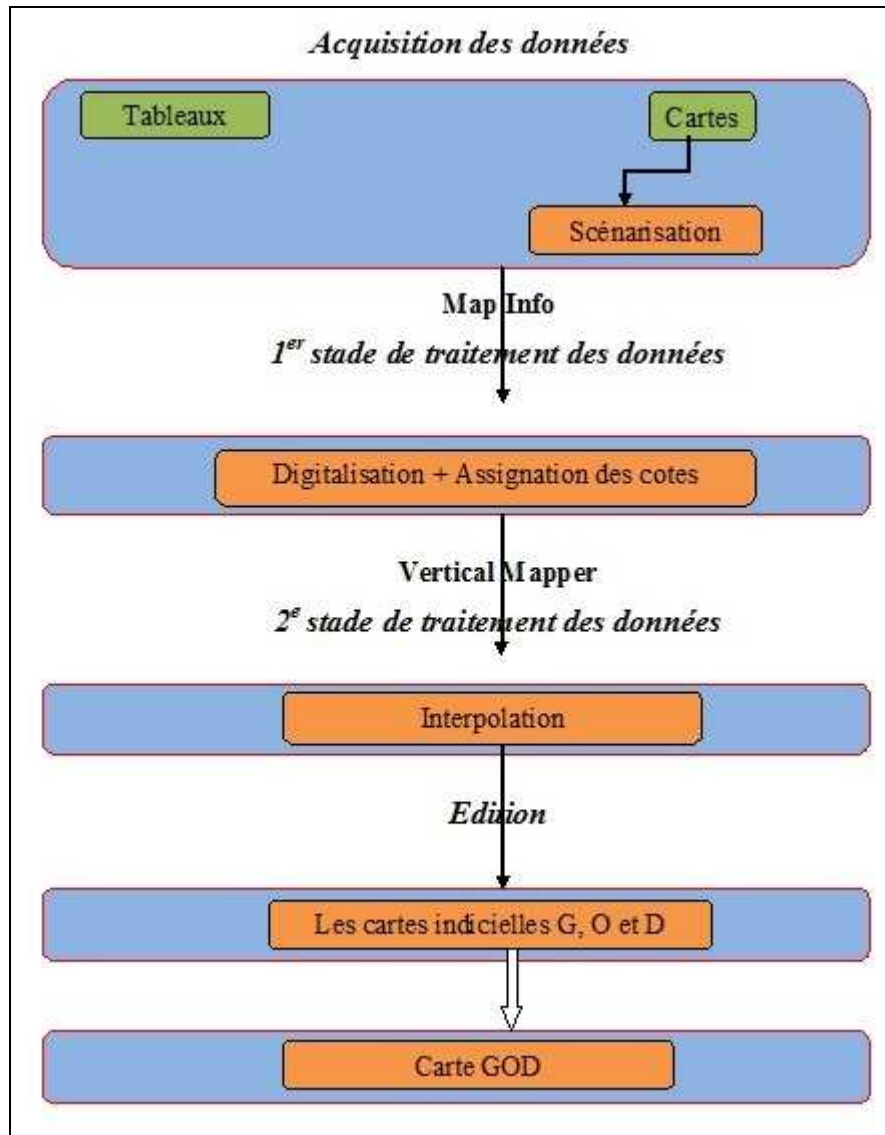


Figure n° 51 : Les étapes d'élaboration de la carte G.O.D.

Dans ce travail, toutes les données ont été traitées avec "MapInfo" et l'une de ces fonctionnalités "Vertical Mapper".

Les couches d'informations ont été traitées sous forme de tables à l'aide de "MapInfo".

Les opérations d'établissement des cartes paramétriques ainsi que leurs croisements ont été effectués au moyen de la fonctionnalité "Vertical Mapper".

IV.2.3. Application et résultats :

Toutes les opérations de croisement et de reclassification ont été effectuées au moyen du logiciel "Vertical Mapper" sur des images raster. Pour ce faire, les cartes paramétriques du modèle GOD ont été réalisées séparément moyennant une analyse spatiale monocouche.

IV.2.3.1. Type d'aquifère (G) :

L'observation des données des coupes des sondages, des forages et des coupes géologiques réalisés à travers la région (voir chapitre I), a indiqué que la nappe est en régime libre sur toute l'étendue de la zone d'étude. A cet effet, une cote = 1 a été affectée à l'ensemble du secteur.

La carte indicielle du paramètre "type d'aquifère" (G) se présente comme suit (fig. n° 52) :

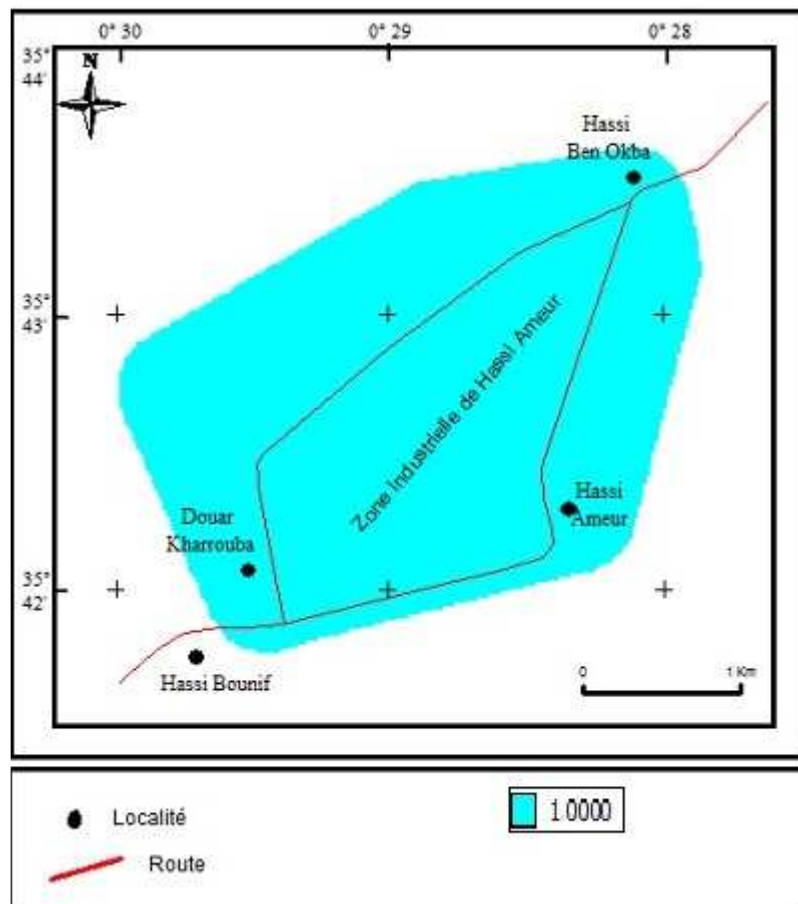


Figure n° 52 : Carte indicielle du paramètre "type d'aquifère" (G) dans le secteur d'étude.

IV.2.3.2. La zone non saturée (O):

La carte de la zone non saturée est réalisée, sur la base des données géologiques des deux cartes géologiques de Saint-Cloud (1/50.000) et d'Oran (1/50.000) et de celles des sondages et forages exécutés à travers le secteur étudié. En fonction des faciès trouvés dans la zone non saturée, des cotes ont été attribuées conformément à la méthode GOD (fig. n° 49).

Trois classes d'indices peuvent être distinguées : la classe 1 correspond à la cote 0.6, la classe 2 correspond à la cote 0.7 et la classe 3 correspond à la cote 0.75.

La carte indicielle est représentée en figure n° 53.

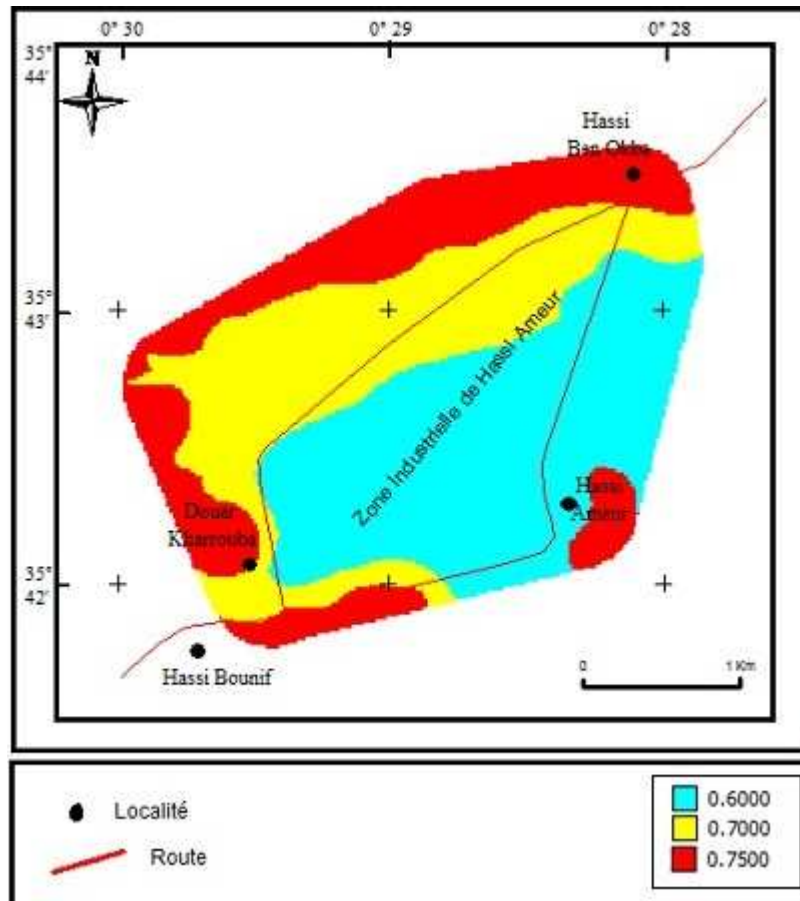


Figure n° 53 : Carte indicielle du paramètre "impact de la zone vadose" (O) dans le secteur d'étude.

IV.2.3.3 Profondeur à la nappe (D) :

Dans notre secteur, les valeurs de profondeur relevées au niveau des différents points (puits, forages), lors de la campagne piézométrique réalisée en février 2012, sont comprises entre 3.25 et 21 m. L'interpolation des données de profondeur a été exécutée par emploi de la méthode du "Naturel Neighbour" incluse dans la fonction "Interpolation" de "Vertical mapper".

Une classification de chaque pixel est ensuite effectuée en fonction du système de cotation de la méthode GOD à l'aide de la fonctionnalité "Reclass".

Le résultat de l'interpolation est une carte en courbes hydro-isobathes du toit de la nappe, exprimée par l'indice correspondant de la méthode GOD.

Trois classes peuvent être identifiées :

- Classe 1, correspondant à la cote 0.9.
- Classe 2, correspondant à la cote 0.8.
- Classe 3, correspondant à la cote 0.6.

La carte indicielle du paramètre "profondeur" (D) est présentée en figure n° 54.

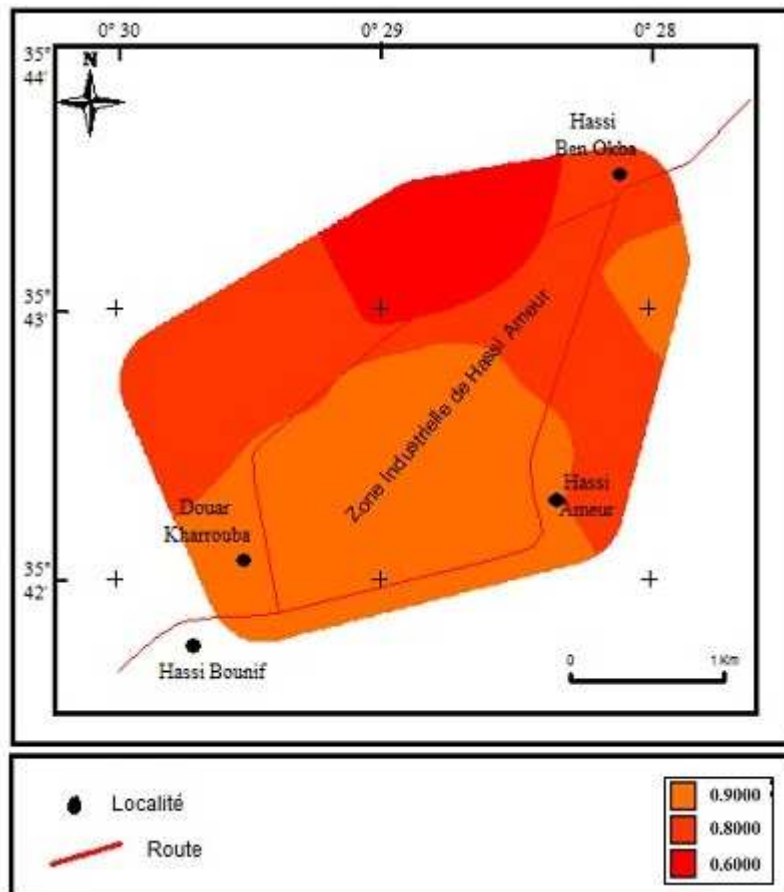


Figure n° 54 : Carte indicielle du paramètre "profondeur" (D) dans le secteur d'étude.

IV.2.4. Elaboration de la carte de vulnérabilité du secteur d'étude :

L'indice de vulnérabilité (IG) relatif à la méthode GOD est calculé par la multiplication des trois paramètres indiciels. Une multiplication des pixels superposés des trois cartes indicielles (G, O, D) est effectuée en fonction du système de cotation de la méthode GOD à l'aide de fonctionnalité "calculator".

L'intérêt de la codification des classes GOD correspondantes est lié aux choix de l'utilisateur dans la caractérisation de la vulnérabilité des eaux souterraines.

La carte finale de vulnérabilité par la méthode GOD est présentée en figure n° 55.

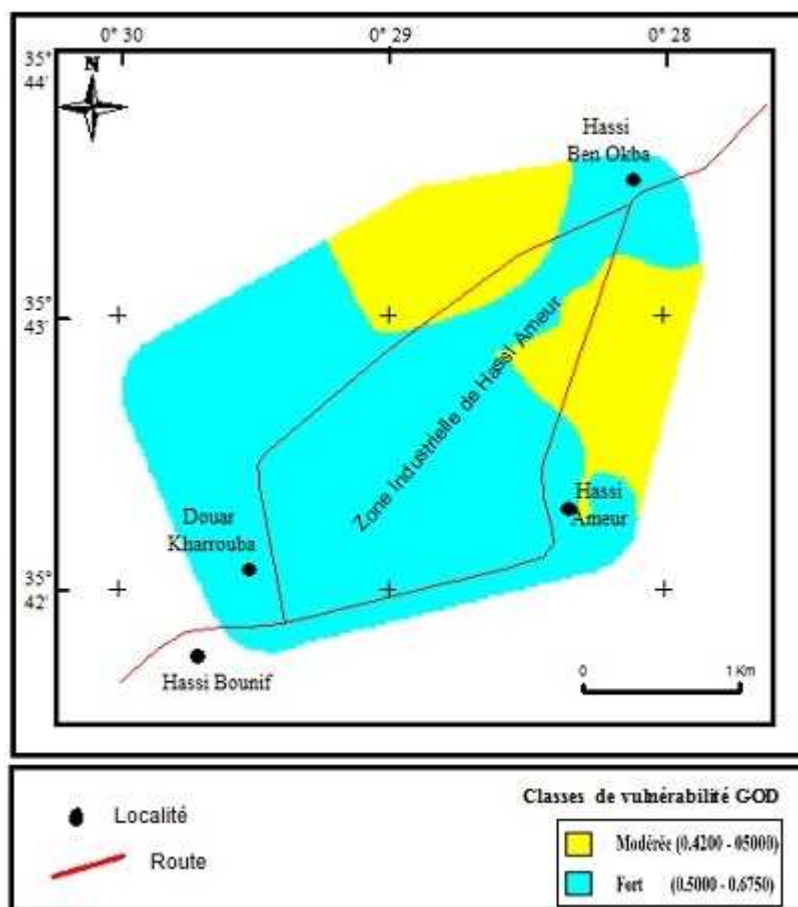


Figure n° 55 : Carte de vulnérabilité à la pollution de la région de Hassi Ameur, établie par la méthode GOD.

L'analyse de la carte de vulnérabilité établie par la méthode GOD pour la région de Hassi Ameur, révèle deux degrés de vulnérabilité, l'un est modéré et l'autre fort.

Ces degrés constituent les deux classes qui se présentent de la manière suivante :

La classe "vulnérabilité forte" correspond à la plus grande partie de la zone cartographiée. Elle est localisée dans la majeure partie de la zone industrielle, ainsi que dans les zones suivantes :

- la zone Ouest, Sud-Ouest de la zone industrielle correspondant à l'emplacement du Douar Kharrouba ;
- la zone Nord-Est de la zone : agglomération de Hassi Ben Okba ;
- la zone Sud de la zone incluant l'agglomération de Hassi Ameur.

La classe "vulnérabilité modérée" représente une proportion moins importante que la classe précédente et occupe un espace localisé dans les zones agricoles situées au Nord (coïncidant avec la zone où la nappe est la plus profonde) et à l'Est de la zone industrielle.

Comme le paramètre "G" est identique sur toute la région étudiée, la variabilité de l'indice GOD ne peut être expliquée que par la variation respective des deux paramètres restants.

Conclusion

Ce chapitre a permis de réaliser une approche de la cartographie de la vulnérabilité des eaux de la nappe étudiée à la pollution.

Cette cartographie par la méthode GOD a permis de faire une estimation rapide de la vulnérabilité à la pollution.

L'application de cette méthode à l'aide d'un SIG "*MapInfo*" a permis de distinguer deux classes de vulnérabilité ;

Une classe forte qui occupe une grande partie de la zone cartographiée. Elle est localisée dans la majeure partie de la zone industrielle, ainsi que dans les zones urbanisées de Hassi Ben Okba, Douar Kharrouba et au Sud de la zone industrielle.

Une classe modérée de vulnérabilité qui représente une proportion moins importante que la classe précédente et occupe un espace localisé dans les zones agricoles situées au Nord et à l'Est de la zone industrielle.

Conclusion générale :

Au cours de ce travail, nous avons d'abord eu à présenter les contextes géographique, morphologique, hydrologique et climatique de la région incluant notre secteur d'étude.

Sur le plan climatique, cette étude, nous a permis de déterminer les principales caractéristiques climatologiques de la région d'étude. Un climat méditerranéen de type semi-aride a été mis en évidence avec une période sèche qui s'étend du mois de mai au mois de septembre et une période humide (pluvieuse) qui s'étend du mois d'octobre au mois d'avril.

L'étude géologique, basée sur les travaux de plusieurs auteurs ayant étudié la région, a mis en évidence une structure constituée par deux grands ensembles géologiques.

Un substratum anté à synchro nappe, affleurant dans le Djebel Murdjadjo, le Djebel Khar et dans les Monts d'Arzew, représenté par des massifs schisteux autochtones d'âges permo-triasique, jurassique et crétacé, fortement affectés par l'orogénèse alpine.

Un remplissage (couverture) post-nappe, avec une forte extension dans les zones basses du domaine. Dans ce remplissage on distingue quatre cycles :

- Le premier cycle miocène post-nappes (M1), formé de dépôts continentaux, constitués d'alternance de conglomérats et de marnes parfois gypseuses, bien développés sur les côtes.
- Le deuxième cycle miocène post-nappes (M2), débute généralement dans le bassin du Chélif par une importante série détritique gréso-sableuse et constitué par des formations médianes constituées de marnes bleues et des formations terminales, constituées par une série des tripolis et la série des gypses.
- Le troisième cycle post-nappes –pliocène- (P1), représenté dans le bassin du Bas Chélif par la succession classique des marnes bleutées "plaisanciennes" et des grès marins "astiens" puis continentaux.
- Le quatrième cycle post nappes (Calabrien), d'abord lumachellique ou conglomératique passe progressivement à des grès dunaires et représentent le dernier épisode marin de quelque importance sur le littoral Oranais.

La structure générale de la région d'étude montre que les séries néogènes qui forment le substratum sont quasi-horizontales dans les régions des plateaux et affectées de plis simples dans les régions des collines ou de dépressions.

Sur le plan hydrogéologique, les aspects lithologiques et structuraux des grandes formations géologiques de la zone d'étude déterminent un ensemble aquifère constitué par les grès lumachelliques et grès jaunes du Calabrien et les grès du Pliocène "Astien".

Cet ensemble Astien – Calabrien forme un réservoir contenant une nappe libre à grande extension, surmontant un substratum constitué par les marnes du Miocène supérieur et du Pliocène inférieur.

L'étude piézométrique, à travers la cartographie piézométrique indique une surface piézométrique, caractérisant une nappe radiale, à écoulement de direction Nord-Ouest / Sud-Est, légèrement convergente vers le secteur de l'agglomération de Hassi Aneur. La pente de cette nappe présente une morphologie assez régulière.

Concernant le contexte industriel, la zone industrielle a été créée en 1973 pour renforcer les fonctions productives des communes de l'ouest algérien sans prendre en considération la notion du risque pouvant se produire. Au cours de ces dernières années, la zone industrielle est devenue plus étendue, lourde et complexe par les nouvelles activités, ce qui pourrait avoir une incidence sur le contexte environnemental général de la région.

L'étude hydrochimique a permis de caractériser les principaux paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau prélevée.

Au cours de la campagne de terrain (période du 24/25 février 2012), les variations des différents paramètres chimiques paraissent peu importantes. L'utilisation de la cartographie hydro chimique permet de bien caractériser l'évolution spatiale de certains éléments majeurs.

Les mesures de la conductivité électrique des eaux de la nappe indiquent des valeurs de conductivité plus élevées, enregistrées à l'intérieur de la zone industrielle, P7 (cond = 6110 μ S/cm) et P14 (cond = 5270 μ s/cm).

Les eaux étudiées présentent une minéralisation variable, la forte minéralisation s'observant au sein de la zone industrielle, centrée sur P7 (4638 mg/l). La valeur de minéralisation la plus faible est enregistrée au point de prélèvement P6 (Min = 1822 mg/l). La minéralisation totale peut atteindre jusqu'à 15844 mg/l dans d'autres endroits de la zone industrielle.

Tenant compte de l'effet des conditions géologiques et hydrogéologiques, ainsi que de l'effet anthropique, cette étude hydrochimique a permis de mettre en évidence l'hétérogénéité de la plupart des paramètres physico-chimiques ayant une influence sur l'évolution et la qualité des eaux.

La représentation des échantillons dans les diagrammes de Piper et de Schoeller et Berkaloff montre que les eaux du secteur d'étude présentent globalement, un faciès chloruré sodique, voire calcique ou magnésien.

Le traitement statistique des données a permis de trouver, à travers la matrice, quelques corrélations des éléments entre eux.

L'étude indique aussi que la minéralisation des eaux du secteur d'étude est fortement contrôlée par le sodium, le magnésium, les sulfates et les chlorures.

Le traitement statistique des données par l'ACP a permis de faire ressortir cinq groupes d'individus.

L'étude par le CAH, permis de faire ressortir deux grandes groupes, répartis en quatre sous groupes, identiques à celles déduites de l'ACP, où les groupes 2 et 3 de l'ACP, sont regroupés dans le même groupe dans le CAH.

Les classifications de Riverside ont montré que les eaux des puits de la région présentent un risque d'alcalinité et de salinisation. Elles sont faiblement recommandées pour l'irrigation.

La caractérisation de la qualité des eaux de la nappe étudiée, du point de vue caractérisation et étude des éléments indicateurs de pollution, a permis de délimiter les points affectés par tel ou tel élément indicateur de pollution.

La confrontation des teneurs en éléments indicateurs de pollution aux normes de potabilité permet de faire ressortir les résultats suivants :

Pour les éléments nutritifs, les nitrates sont détectés avec des teneurs dépassant les normes de potabilité pour l'ensemble des points d'eaux sauf pour les points P6 et P14 (≤ 50).

Pour les autres d'éléments, les normes sont respectées, sauf pour le point P14 qui se caractérise par une teneur en NO_2 dépassant la norme de potabilité.

L'étude des résultats des analyses métalliques des échantillons révèle, d'une manière globale, la présence de teneurs en sélénium représentant, selon les normes de l'OMS, entre 4 et 12 fois la valeur maximale admissible pour les eaux de boisson. La raison de ces fortes teneurs reste énigmatique et ne peut être expliquée que suite à investigations plus poussées sur site.

Les autres métaux lourds présentent des teneurs inférieures aux normes de potabilité, sauf pour le Manganèse dont les teneurs moyennes sont élevées, point P7, par rapport aux autres points, et dépassent les limites de potabilité au point P14.

L'utilisation des eaux de la nappe étudiée, présentant des métaux lourds, est déconseillée pour l'industrie, surtout agro-alimentaire, ou comme eau de bain, sauf en cas de traitement spécifique et adapté de ces eaux.

Le traitement statistique des données globales introduites dans ce chapitre à travers la méthode de classification ascendante (CAH), nous a permis de faire ressortir deux grandes groupes d'individus, répartis en trois classes, lesquelles ;

Le premier groupe (G I), englobe la classe (C2) du dendrogramme, avec les individus suivants : P1, P2, P3, P6, P8, P11, P13 et P15.

Le deuxième groupe (G II) : englobe les deux classes ; classe "C1" (P7 et P14) et la classe "C3" (P5, P9, P10 et P12).

La caractérisation de la vulnérabilité des eaux de la nappe étudiée à la pollution, s'effectuée sous la notion d'une vulnérabilité intrinsèque. Cette étude a permis de réaliser une approche cartographique de la vulnérabilité des eaux de la nappe à la pollution.

Cette cartographie par la méthode GOD a permis de faire une estimation rapide de la vulnérabilité à la pollution.

L'application de cette méthode à l'aide d'un SIG "MapInfo" a permis de distinguer deux classes de vulnérabilité ;

Une zone à forte vulnérabilité occupe la grande majorité de la zone cartographiée. Elle est localisée dans une grande partie de la zone industrielle, ainsi que dans les zones urbanisées de Hassi Ben Okba, Douar Kharrouba et au Sud de la zone industrielle.

Une classe à vulnérabilité modérée qui occupe un espace localisé dans les zones agricoles situées au Nord et à l'Est de la zone industrielle.

Annexe n° 03: Forage de Hassian Ettoual (In Agep. Sogreah, 1997).

Log	Prof (m)		
	0	Encroûtement rosé puis blanchâtre	Alluvions quaternaires
	7.68	Argile ocre souvent sableuse et grès tendre	
	21.65	Argile ocre et graviers calcaires	
	25.10	Argile blanche et jaune	Pliocène
	26.70	Calcaire blanc parfois argileux à débris de coquilles	
	35.42	Argile blanche puis marron	
	46.80	Calcaire blanc souvent marneux et argile blanche	
	75.60	Argile grise à niveaux gypseux	
	82.30	Gypse massif	Miocène sup
	135.50	Gypse avec passées marneuses	
	175.45	Perte totale à 176.80	
	183.25	Gypse macro-cristallin fissuré à intercalations argilo-sableuses ocre.	

Liste des abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales.

AECI : Agencia Española de Cooperación Internacional.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique.

MNT : Modèle Numérique du Terrain.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

ONM : Office National de la Météorologie.

SEQ : Système d'Evaluation de la Qualité.

SERSID : Société d'Engineering et de Réalisations Sidérurgiques.

SGI : Société de gestion de la zone industrielle de Hassi Ameer.

SIG : Système d'Information Géographique.

USDA : United States Department of Agriculture.

Références bibliographiques

- Agep-Sogreah. (1997) : Etudes d'assainissement du groupement d'Oran, Mission B : Drainage de la zone Sud du PUD, Vol III, Texte provisoire Ingenierie. Grenoble.
- Alamy Z et Langevin C. (1989) : Cartographie multicritères. Aptitudes des sols. Etude méthodologique. BRGM 30306 ENV 4S 89.
- Allier D., Vittecoq B., Mardhel V. (2008) : Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique BRGM/RP-56283-fr.
- ANRH. (2009) : Réalisation de la Carte des Ressources en Eau Souterraines du Nord de l'Algérie.
- ANRH. (2012) : Résultats des analyses chimiques fondamentales et complémentaires.
- Aissaoui A. (2010) : Etablissement d'une carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du Plateau d'Oran : Application de la méthode GOD.
- Bakalowicz M. (1976) : Géochimie des eaux karstiques : une méthode d'étude de l'organisation des écoulements souterrains. Actes coll. Hydol. Pays Calcaires, Besançon-Neuchatel.
- Bézèlgues S et Dougaparsad M. (2002) : Suivi piézométrique des nappes de Grande-Terre et de Mairie-Galante (Guadeloupe), compte rendu des données acquises en 2001 BRGM/RP 51 445 FR.
- Belzègues S et E. des Garets. (2002) : Cartographie de la vulnérabilité des nappes de grande-terre et de Marie-Galante (Guadeloupe). BRGM/RP-51783-FR.
- Boulaine J., Gourinard Y. Nicod A., Bouillon M., Perrodon A. (1957) : Notice explicative de la carte géologique de l'Algérie 1/50.000. 154. Saint Cloud. Edition. Service de la carte géologique de l'Algérie.
- BRGM. (2008) : Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique Rapport final /RP-56283-FR.
- BRGM. (2006). Qualité naturelle des eaux souterraines. Méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français. Guide technique, 238 p. BRGM éditions, Orléans.
- Carpentier F.G. (2006) : Introduction aux analyses multidimensionnelles.
- Castany G. (1982) : Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edition Dunod, Paris.
- Chaumont M. et Paquin C. (1971) : Notice explicative de la carte pluviométrique de l'Algérie au 1/500 000. Moyennes 1913/1963. Pub. Soc. Hist. Natu. De l'Afrique du Nord. Faculté des sciences d'Alger. 24p.

- Dassargues A and Gogu R. (1998b): A short overview on groundwater vulnerability assessment (basic statements for use in the framework of the COST 620 Action). Work : Vulnérabilité et protection des eaux karstiques. Neuchatel (Suisse).
- ENRENAD. (1998) : Évaluation de l'état environnemental de l'unité de mécanique lourde et de chaudronnerie sous pression de l'entreprise SIMAS Hassi Ameur- Wilaya d'Oran.
- Fenet B. (1975) : Recherche sur l'alpinisation de la bordure septentrionale du bouclier africain à partir d'un élément de l'Orogenèse nord-maghrébin : Les Monts du Djebel Tessala et les Massifs du littoral oranais. Thèse de doctorat Es Sciences.
- Foster S. (1987): Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy vulnerability of soil and Grounwater to pollutants. RIVM. TNO COMITTE on hydrological Research, pp. 69-86.
- Gabriel Etienne A., Kouassi D., Boyossoro Hélène K., Brou Dibi., Mahaman Bachir Saley., Biemi J. (2009) : Contribution des Méthodes de Vulnérabilité Intrinsèque DRASTIC et GOD à l'étude de la Pollution par les Nitrates dans la Région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)
- Gourinard Y. (1952) : Le littoral oranais (mouvements verticaux et anomalies gravimétriques). Congrès. Géol. Inter. Alger, Monographie régionales (1), 22, 63 p.
- Gourinard Y. (1958) : Recherches sur la géologie du littoral Oranais II. Epeirogenesis et nivellements. Publication du service de la carte géologique de l'Algérie.
- Gremion F. 2003: Analysis of microbial community structures and functions in heavy metal-contaminated soils using molecular methods. Thèse de Doctorat. Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 122 p.
- Guillemin C et Roux J.C. (1992) : La pollution des eaux souterraines. Manuels et Méthodes, n° 23, éd. BRGM.
- Haddar L. (1986) : Contribution à l'étude hydrogéologique du piémont du Djebel Khar entre le lac Telamine et Hassi Ameur. Mém. Ing. Université d'Oran.
- Hamel D., Paradis E., Bourque M., Savard M., Nastev M., Lefebvre R., Martel R et Murat V. (2003) : Vulnérabilité à la nappe des aquifères du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD 14p.
- Hassani M.I. (1987) : Hydrogéologie d'un bassin endoréique semi-aride. Le Bassin Versant de la grande Sebkhha d'Oran (Algérie). Doctorat 3ème cycle. Université de Grenoble. 304 p.
- Hassani M.I. (2009) : Vulnérabilité et protection des eaux souterraines, photocopié cours du magister "Qualité et protection des eaux souterraines", 45 p.

Lallemand-Barrés. (1994) : Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Etude documentaire préliminaire. Rapport BRGM R 37928.

LTPO. (1984) : Implantation d'équipements au sein des ateliers E.N.C.C. Hassi Aneur. Oran

Mardhel V. (2001) : Evaluation et cartographie de la vulnérabilité des grands aquifères de l'île et la réunion –Etude de l'aquifère de la plaine des Galets (rive droite de la rivière des Galets). Rapport BRGM/RP-50590-Fr-00SGR/REU 40, 98 p., 62 fig., 4 tab. 1 annexe.

Miquel G. (2003) : Rapport sur la qualité de l'eau et de l'assainissement en France, tome II.

Munoz S et Juarez S.R. (1989) : Essai d'adaptation d'une méthode cartographique assistée à l'élaboration de cartes de vulnérabilité au Guatemala. DEA Paris-sud Orsay.

Munoz S et Langevin C. (1991) : Adaptation d'une méthode cartographique assistée à l'élaboration de cartes de vulnérabilité au Guatemala. Hydrogéologie, n° 1.

Murat V. (2000) : Guide d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. Rapport de stage soumis au Ministère de l'environnement du QUEBEC. Mars 2000, 50 p.

OMS. (2006) : Normes internationales pour l'eau de boisson.

ONM. Données climatologies de station d'Es-Sénia (1990-2008).

Perrodon A. (1957) : Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie Occidentale, Publ. Serv. Carte Géol. Algérie, 12, 328 pp.

Pételet-Giraud E., Doerfliger N., Crochet P. (2000) : RISKE : Méthode d'évaluation multicritère de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques. Application aux systèmes des Fontailles et Cents-Fonts (Hérault, S. France) – Soumis à l'hydrogéologie 2000, 1 et 3 ANTEA Montpellier, 2 BRGM Montpellier.

Rodier J. (2010) : L'analyse de l'eau (eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer). Editions Dunod, Paris.

Ricour J. (1998) : Elaboration des cartes de vulnérabilité, de sensibilité à la pollution de la nappe de la craie dans le secteur de Guines (Pas-de-Calais) à l'aide du logiciel Synergis. Rapport 88 NPC 101 BRGM.

Schnebelen N., Platel J.P., Le Nindre Y. et Baudry D. avec la collaboration de Hoarau A., Dufour P. et Benhammouda S. (2002) : Gestion des eaux souterraines en aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise- Rapport BRGM/RP -51178-Fr.

SGI. (2009) : Zone industrielle de Hassi Aneur. Plan parcellaire.

Thomas G. (1985) : Géodynamique d'un bassin intramontagneux. Le bassin de bas Chélif occidental (Algérie) durant le mi-plio-quadernaire. Thèse Doc. U de Pau. 594 p. 161 fig. B.

Thinthoin R. (1948) : Les aspects physiques du Tell Oranais Essai de morphologie du pays semi-aride. Thèse doc. Es lettres. Musée d'Oran. 589 p. 86 fig. 83 pl.

Table des matières

Résumé	Pages
Abstract	
ملخص	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	01
CHAPITRE I : Cadre physique de la zone d'étude	
I.1. Cadre géographique	03
I.2. Contexte physique de la région d'étude	04
I.2.1. Aspects morphostructuraux	04
I.2.1.1. Contexte topographique	04
I.2.1.2. Le réseau hydrographique	04
I.2.2. Cadre climatique	05
I.2.2.1. Etude des précipitations	05
I.2.2.2. Etude de la température	08
I.2.2.3. Climat de la région	09
I.3. Cadre géologique	10
I.3.1. Cadre géologique général	10
I.3.2. Lithostratigraphie de la région étudiée	13
I.3.2.1. Les formations anté-nappes	15
I.3.2.1.1. Le Permo – Trias	15
I.3.2.1.2. Le Jurassique	15
I.3.2.1.3. Le Crétacé	15

I.3.2.2. Les formations post-nappes	16
I.3.2.2.1. Le Miocène	16
I.3.2.2.2. Le Pliocène	16
I.3.2.2.3. Le Plio – Pléistocène « Calabrien »	17
I.3.2.2.4. Le Pleisto - Holocène	19
I.3.3. Contexte tectonique	20
I.4. Cadre hydrogéologique	22
I.4.1. Description des principaux aquifères de la région	22
I.4.1.1. Aquifère de l’Astien	23
I.4.1.2. Aquifère de grès lumachelliques du Calabrien	24
I.4.2. Piézométrie du secteur d’étude	24
I.4.3. Paramètres hydrodynamiques	26
I.4.3.1. Transmissivité et perméabilité	26
I.5. Présentation du contexte de la zone industrielle de Hassi Ameer	27
I.5.1. Localisation de la zone industrielle	27
I.5.2. Historique et évolution des activités au sein de la zone industrielle de Hassi Ameer	28
I.5.3. L’occupation du sol et son évolution	30
I.5.3.1. Les cultures et la végétation naturelle	30
I.5.3.2. Les grandes infrastructures et l’habitat dans la zone	32
Conclusion	34
CHAPITRE II : Contexte Hydrochimique	
Introduction	36
II.1. Caractères Organoleptiques	38
II.1.1. La couleur	38
II.1.2. La turbidité	39
II.2. Etude des paramètres physiques	39

II.2.1. Le pH	39
II.2.2. La température	40
II.3. Etude des paramètres chimiques	40
II.3.1. La balance ionique	40
II.3.2. La minéralisation	41
II.3.3. Les cations	42
II.3.3.1. Le calcium	42
II.3.3.2. Le magnésium	43
II.3.3.3. Le sodium et potassium	43
II.3.4. Les anions	44
II.3.4.1. Les chlorures	44
II.3.4.2. Les sulfates	45
II.3.5. Dureté et alcalinité des eaux	46
II.3.5.1. La dureté	46
II.3.5.2. L'alcalinité	47
II.4. Faciés hydrochimiques	48
II.4.1. Interprétation par le diagramme de Schoeller-Berkaloff	49
II.4.2. Interprétation par le diagramme de Piper	52
II.5. Indices de saturation	54
II.6. Etude des valeurs relatives	56
II.6.1. Indice d'échange de base (i.e.b)	56
II.7. Traitement statistique des données hydrochimiques	57
II.7.1. Etude statistique en composante principale	58
II.7.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)	59
II.7.2.1. Principe de l'ACP	59
II.7.2.2. Application de l'ACP	60

II.7.3. Classification Ascendante Hiérarchique	67
II.7.3.1. Avantages de la classification ascendante hiérarchique	67
II.7.3.2. Principe de la méthode	67
II.7.3.3. Méthode d'agrégation pour la Classification Ascendante Hiérarchique	68
II.7.3.4. Résultats pour la Classification Ascendante Hiérarchique dans le secteur d'étude	68
II.8. Evaluation de la qualité des eaux	71
II.8.1. Potabilité des eaux (Norme et qualité)	71
II.8.2. Aptitude des eaux à l'irrigation	71
II.8.2.1. Evaluation de risque d'alcalinité	72
II.8.2.2. Evaluation de risque de salinité (diagramme de Riverside)	73
Conclusion	76
Chapitre III : Pollution des eaux souterraines	
Introduction	78
III.1. Aperçu sur la pollution	79
III.1.1. Définition de la pollution de l'eau	79
III.1. Principaux types de pollution	79
III.1.2.1. Selon l'origine de pollution	79
III.1.2.2. Selon la nature des polluants	81
III.1.2.3. Répartition géographique	81
III.1.2.4. Répartition temporelle	82
III.1.3. Les principaux éléments indicateurs de pollution	82
III.1.3.1. Les éléments nutritifs	82
III.1.3.1.1. Les nitrates	82
III.1.3.1.2. Les nitrites	82
III.1.3.1.3. L'ammonium	82
III.1.3.1.4. Les phosphates	83

III.1.3.2. Les matières organiques	83
III.1.3.3. Les matières en suspension (MES)	83
III.1.3.4. Les métaux lourds	83
III.1.3.4.1. Les principaux éléments toxiques ou indésirables	85
III.1.3.4.2. Les sources de pollution par les métaux lourds	88
III.2. Etude de la pollution dans le secteur d'étude	90
III.2.1. Analyse des éléments indicateurs de pollution dans le secteur d'étude	91
III.2.2. Les éléments nutritifs	93
III.2.3. Les matières organiques acides	95
III.2.4. Les matières en suspension	95
III.2.5. La silice	96
III.2.6. Les micropolluants minéraux "métaux lourds"	96
III.2.6.1. Discussion et interprétation des résultats	97
III.3. Mise en évidence des éléments indicateurs de pollution par un traitement statistique	100
III.3.1. Les éléments organiques	100
III.3.1.1. La matrice de corrélation	100
III.3.1.2. La méthode CAH	101
III.3.2. Les métaux lourds	102
III.3.2.1. La matrice de corrélation	102
III.3.2.2. La méthode CAH	103
III.3.3. l'analyse statistique globale	103
III.3.3.1. La matrice de corrélation	103
III.3.3.2. L'analyse globale par la méthode CAH	106
Conclusion	107
Chapitre IV : Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution	
Introduction	108

IV.1. Notions générales et méthodologie	109
IV.1.1. Notions de vulnérabilité et risque	109
IV.1.2. Types de vulnérabilité	110
IV.1.3. Les critères de vulnérabilité	110
IV.1.3.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque	110
IV.1.4. Méthodologie de cartographie de la vulnérabilité des aquifères	113
IV.1.4.1. Présentation de la méthode G.O.D	117
IV.2. Mise en œuvre de la méthode GOD	118
IV.2.1. Acquisition et description des paramètres GOD	119
IV.2.1.1. Type d'aquifère (G)	119
IV.2.1.2. Impact de la zone vadose (O)	119
IV.2.1.3. Profondeur de la nappe (D)	121
IV.2.2. Traitement des données	122
IV.2.3. Application et résultats	123
IV.2.3.1. Type d'aquifère (G)	124
IV.2.3.2. La zone non saturée (O)	124
IV.2.3.3 La profondeur de la nappe (D)	125
IV.2.4. Elaboration de la carte de vulnérabilité du secteur d'étude	126
Conclusion	129
Conclusion générale	130
Références bibliographiques	
Annexes	

Annexe n° 4: Tableau représentant les types d'activités industrielles dans la zone industrielle de Hassi Ameur (1973-1983).

	Unités	Nature de l'industrie	Mise en production
Unités de production	Complexe (SNM)	Production des réservoirs de pétrole	1975
	Complexe Sonatiba	Matériaux de construction	1975
Unités des services	SERSID SNS	Entrepreneur	1978
	SONELGAZ	Energie	1976
Unités Non Achevées	Complexe ACOTEC	Production des Matériaux taillées	1983
	Unité de fabrication des Plaques	Fabrication des Plaques métalliques	1984
	Unité de récupération du fer	récupération des résidus du fer	1984
	Unité de construction Oran	Matériaux de construction	1983
	Unité Treillis Soudés	Matériaux de construction	1975
	Unité de fabrication du gaz	Fabrication du gaz industriel	1975

Source : Direction de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire d'Oran (ex. DPAT).

Annexe n° 5 : Répartition des unités selon le type d'activité en 2005

Type d'industrie	Nom de l'unité	type
Industrie Métallique	SOTHYOR	Etatique
	OUAMEUR	Privé
	TRAVOSIDER	Etatique
	SIMAS	Etatique
	Groupe Travosider	Etatique
	URF	Etatique
	SNS TPL	Etatique
	ANABIB	Etatique
Industrie de Matériaux De construction	HAROUAL	Privé
	E B T P H	Etatique
	E C O	Etatique
	ECOTEC	Etatique
	ECOURM	Etatique
	ENNAI	Privé
Industrie du plastique Et chimique	BENAISSA	Privé
	HARATE	Privé
	BENYALLES	Privé
	HABOUR	Privé
	SEDJELMALI	Privé
	SOMOTIB	Etatique
Industrie Electrique Et électronique	Moulay Amar	Privé
	ALFATRON	Etatique
	Sarl SAFA	Privé
	SONALGAZ	Etatique
Industrie du bois et de papier	HARAT Habib	Privé
	Sarl INTEMAR	Privé
	BESSAYAH	Privé
	MOBILART	privé
Industrie agroalimentaire	BOURAYOU	Privé
	SALAH	Privé
	Sarl HALL	Privé
	CIVITAL	Privé
	Loukil Nafissa	Privé
Industrie du textile	Maghreb Tapis	Privé
	SOFITEX	Etatique
	SOTITEX	Etatique
	SOFRAMAR	Etatique
Industrie des chaussures et de cuire	LEHABRI Kamel	Privé
	GHOMRI	privé
Industrie des machines	SOFAB	Privé
	POLYOR	Privé
Centre de distribution	BENSAFIA	Privé
	SOFRAMACO	Etatique
	ETT	Etatique
	Sarl SOTRAMAR	Privé

Annexe n° 06: Les activités industrielles dans la zone industrielle de Hassi Ameur (SGI, 2009)

	Unités industrielles	Activité principale
01	SARL "UTAC"	Peau et cuir
02	TMO	Peau et cuir
03	SARL "SMCP"	Peau et cuir
04	UNILEVER Algérie	Détergent
05	SARL HALL	Conserverie Ton et sardine
06	COMPACTO C.GRES	Fabrication dal de sol, céramique
07	MAGHREB TAPI	Fabrication de tapis
08	SARL "AGRO FILM"	Transformation de plastique
09	EPE PROMAIT SPA	Charpente métallique, traitement de surface et peinture industrielle
10	SARL "LAAP" (projet en cours)	Production de produit pharmaceutique
11	Entreprise BENYALESSE	Transformation de plastique (Fabrication de sachées)
12	F.T.C.E	Fabrication et traitement d'emballage en carton
13	SOMAP	Fabrication de rasoir BIC
14	POLYOR	Construction navale
15	SARL "NARIPLAST"	Transformation de plastique
16	Grand moulin SALAH	Silos de stockage de céréales
17	NERGYAL SPA	Réalisation d'équipements et d'appareillage électrique MT/BT
18	SARL SOMOTIB	Fabrication de mouchoirs et tissu blanc
19	Entreprise Mebrouk	Chambres froides
20	TARSI SPA UMMI Oran	Montage et maintenance industriel
21	CMCO	Complexe de matériaux de construction de l'Ouest (concassage)
22	E.P.E EURL ARMEL	Réparation machines électriques
23	AFIA International SPA	Fabrication huile de table
24	Société Nouvelle Source	Produits cosmétiques
25	SAARL Teib	Confisseries
26	Trefilerie	Transformation de l'acier doux
27	Sarl Ouameur	Fabrication de draps
28	Raja Food	Thon et Salamar
29	STE Oranaise FAB Article SARL	Fabrication de chaussures

30	STE développement ind mat plastique	Fabrication d'article en plastique
31	STE équipements process SARL	Fabrication matériel industriel
32	Capachim	Industrie chimique
33	ERO	Récupération métaux
34	PIRECOR	Pièces de rechange
35	British Amer Tobacco	Tabac
36	STE Knauf platres fleurus SPA	Platrerie
37	STE moulins Djoudi SARL	Minoterie
38	STE CEVITAL SPA	Huilerie
39	STE Prod Agregat Beton Eurl EPE	Agrégats et Béton
40	STE Nergyal SPA	Fabrication Equipement et Appareils Electriques
41	STE Magrebine des cuirs SARL	Tanneries
42	STE SIMAS EPE SPA	Mécanique lourde
43	STE Axial SARL	Fabrication et montage armature métal
44	SINAL	Fabrication de verre Optic
45	STE Nouvelle Briqueterie Ouest	Briqueterie
46	BATOR	
47	SAAC	Moulin à farine
48	SARL SOMOTIB	Fabrication de drap
49	GIPEC Oran Sacs EPE SPA	Fabrication de Sacs
50	Tub PROFIL EX ANABIB	Tuberie Tôles Passage
51	STE SAAC UNITE D'ORAN SARL	Fabrication Accumulateurs
52	STE SUPER PLAST EURL	Montage plastique
53	ALFATRON	Montage équipements informatique
54	GENERAL AMBALLAGE	Fabrication de carton
55	FRIGO HOUSE	Stockage et entreposage de frigo
56	PETROSER	Hydrocarbures
57	CEVICO	Fabrication de matériaux de constructions
58	STE GRANDS MOULINS SALAH SARL	Minoterie
59	GAZ INDUSTRIELS	Transformations-transports et commercialisation de gaz industriels
60	UNI DISTAL	Détergents
61	SAAC	Batteries
62	STE POLYSTERES ORANAIS SARL	Fabrication articles ployé
63	STE FMCO SARL	Fabrication de matériaux de constructions
64	SARL Cherradi yahia	Minoterie
65	Groupe Merouani	
67	Haffar (projet en cours)	

Annexe n° 07: Résultats des analyses (ANRH, 2012).

Points d'eau	Couleur	Turbidité (NTU)
P1	incolore	1
P2	Incolore	3
P3	Incolore	2
P5	Incolore	1
P6	Incolore	1
P7	Incolore	1
P8	Incolore	1
P9	Incolore	2
P10	Incolore	1
P11	Incolore	1
P12	Incolore	2
P13	Incolore	1
P14	Incolore	1
P15	incolore	2

Annexe n° 08 : Résultats des analyses de prélèvements à différentes périodes (données A.N.R.H.)

Point d'eau	Unité industrielle	Date	pH	Cond (µs/cm)	Min (mg/l)	Rs (mg/l)	Ca⁺⁺ (mg/l)	Mg⁺⁺ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Cl⁻ (mg/l)	HCO₃⁻ (mg/l)	SO₄⁻ (mg/l)	e %
P16	G. Merouani	27/08/2005	8.03	7800	5920	5460	25	289	1449	22	2527	585	729	4
P17	SMCP	14/05/2006	6.95	9260	7028	6800	159	269	2047	29	2865	505	1020	4
P18	Tréfilerie de l'Ouest	04/10/2009	7.14	13000	11050	10640	341	299	2875	31	4508	542	1220	2
P19	Afia International	19/05/2007	7.05	18640	15844	15800	471	498	4485	56	7881	530	1535	0
P20	GSD	21/12/2005	7.57	5940	4509	4180	231	190	989	22	1690	345	510	5
P21	SPAB	18/07/2006	7.2	2310	1723	1680	102	87	356.5	8	490	465	316	0
P22	ERO	12/03/2007	7.14	3410	2588	2680	260	53	533	5.5	965	329	374	0
P23	CEVITAL	02/12/2007	7.14	2910	2209	2320	148	99	442	5	735	269	425	1
P24	LAAPDP	14/07/2010	7.05	3310	2512	2600	48	169	460	7	830	393	259	2

Annexe n° 09 : Normes des paramètres organoleptiques (OMS).

Paramètres	Niveau Guide	Concentration max. admissible	Observation
Couleur unité p ^l /mg	5	2	-
Turbidité mg/l	5	10	Détermination gustative et olfactive
Odeur	0	2	Détermination gout
Saveur	0		gout

Annexe n° 10 : Normes des paramètres physico-chimiques (OMS)

Paramètres	Unité	Niveau guide	Concentration maximale admissible	Les échantillons dépassant la concentration maximale
PH	-	6.5	9	/
Conductivité	µs/cm	200	1000	Tous les échantillons.
Résidu sec	mg/l	-	1500	Tous les échantillons.
Dureté totale	°F	-	50	Tous les échantillons.
Calcium	mg/l	-	100	Tous les échantillons à l'exception de P2.
Magnésium	mg/l	-	50	Tous les échantillons à l'exception de P13.
Sodium	mg/l	-	150	Tous les échantillons.
Potassium	mg/l	-	12	P1, P3, P8, P14.
Sulfates	mg/l	-	250	Tous les échantillons.
Chlorures	mg/l	-	600	Tous les échantillons à l'exception de P15.
Oxygène dissous	mg/l	-	5	
Aluminium	mg/l	-	0.2	
Température	°C	-	25	/

Annexe n° 11 : Les substances indésirables ou toxiques (OMS)

Paramètres	Unité	Niveau guide	Concentration maximale admissible	Les échantillons dépassant la concentration maximale admissible
Argent	mg/l	-	0.05	
Arsenic	mg/l	-	0.05	
Cadmium	mg/l	-	0.05	
Chrome	mg/l	-	0.05	
Cuivre	mg/l	-	1	
Fer	mg/l	-	0.2	
Fluor	mg/l	-	1.5	
Manganèse	mg/l	-	0.5	
Mercure	mg/l	-	0.001	
Plomb	mg/l	-	0.05	
Sélénium	mg/l	-	0.01	
Zinc	mg/l	-	5	
Nitrates	mg/l	-	50	Tous à l'exception de P6 et P14.
Nitrites	mg/l	-	0.1	P14
Ammonium	mg/l	-	0.5	
Phosphate	mg/l	-	5	/
Oxydabilité (K, Mn, O ₄)	mg/l	-	5	
Hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP)	mg/l	-	0.1	

Annexe n° 12 : Photos.

Photo 1 : Mesure in situ de paramètres physico-chimiques in situ dans un puits au sein d'une unité industrielle.



Photo 2 : Mesure piézométrique dans un forage au sein d'une unité industrielle.



