

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 :

**CARACTERISATION HYDROCHIMIQUE ET POLLUTION DES EAUX
SOUTERRAINES EN CONTEXTE URBAIN :
CAS DE L'AGGLOMERATION ORANAISE (ALGERIE)**



Présenté par

ADDA Mawloud

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

M. HAYANE Sidi Mohamed	M. C. A	Université d'Oran	Président
M. HASSANI Moulay Idriss	Pr.	Université d'Oran	Encadreur
Mme. ZAIDI-MEBROUK Naima	M. C. A	Université d'Oran	Examinatrice
M. SAFA Aissa	M. C. A	Université d'Oran	Examineur

Oran, 2013.

Remerciements

Avant tout, 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 et contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur Monsieur **HASSANI Moulay Idriss**, Professeur à l'Université d'Oran, qui m'a fait confiance, m'a proposé ce sujet et a bien voulu m'encadrer. Je le remercie de m'avoir fait bénéficier de ses connaissances, de ses orientations et de ses critiques et qui m'a beaucoup aidé à l'amélioration de ce travail.

Je remercie Monsieur **HAYANE Sidi Mohamed**, Maître de conférences A à l'Université d'Oran, qui a bien voulu présider le jury.

Je suis honorée de compter aussi parmi les membres de mon jury Madame **ZAIDI-MEBROUK Naima**, Maître de conférences A à l'Université d'Oran.

Je remercie également, Monsieur **SAFA Aissa**, Maître de conférences A à l'Université d'Oran, qui a bien voulu faire partie du jury.

J'adresse mes vifs remerciements à l'ensemble du personnel de l'A. N. R. H d'Oran, en particulier, Mrs MAHI. et SARDI. Sans leur collaboration, ce travail n'aurait pu se réaliser.

Mes vifs remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du Département des Sciences de la Terre, en particulier ceux de la filière Hydrogéologie, Mr. BAICHE A., MAHAMMED D.

Ma vive gratitude et mes remerciements s'adressent également à mes collègues en post-graduation : BOUBEKRI, BOUCHENOUK, BELAREDJ, ACHOUR, CHENAFI, HAJ CHERIF.....

Merci à ma famille qui m'a accompagné dans cette aventure, en particulier, à ma mère toujours patiente et attentive.

Résumé :

L'agglomération oranaise se caractérise par la présence dans son sous-sol d'une importante nappe d'eau souterraine de nature hydrodynamique essentiellement libre. Cette nappe est sollicitée pour nombre d'usages agricoles et industriels. La nappe reste également sollicitée pour approvisionner des nombreux bains-douches et, dans certain secteurs, à une alimentation d'appoint en eau potable. La présence de cette ressource hydrique dans un contexte urbain, à croissance parfois mal maîtrisée, augmente sa vulnérabilité aux pollutions multiformes habituellement générées par ce milieu (fosses perdues, fuites du réseau d'assainissement, effluents industriels, lessivage des chaussées, etc.).

La présente étude a permis d'avancer dans l'état de la connaissance hydrogéologique de cet aquifère, d'évaluer leur état d'affectation par la pollution et plus généralement d'apprécier le degré de vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions urbaines. Après une étude exhaustive du cadre physique de la région d'étude rendant compte du contexte hydrogéologique du système aquifère étudié, l'étude hydrochimique des eaux de la nappe s'est basée sur l'interprétation des résultats d'analyses effectuées sur quatorze échantillons d'eau prélevés au niveau de différents points d'eau (puits et sources) lors d'une campagne d'échantillonnage réalisée en octobre 2011. L'étude statistique des différents paramètres analysés, de leur répartition spatiale et des principaux faciès et sous-faciès chimiques déterminés a renseigné sur l'origine et l'évolution des minéralisations. L'état de la qualité des eaux a été apprécié à travers de l'étude des paramètres indicateurs de pollution des eaux prélevées, l'état bactériologique des eaux dans la partie occidentale de l'agglomération oranaise ainsi et que la teneur en éléments mineurs (métaux lourds). Une dernière partie à été consacrée l'établissement d'une cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions à travers la mise en œuvre la méthode G.O.D (Groundwater occurrence- Overall aquifer class- Depth to groundwater table).

Mots clés : Plateau d'Oran, Djebel Murdjadjo, agglomération oranaise, eau souterraine, hydrochimie, faciès chimique, qualité des eaux, vulnérabilité, pollution, méthode GOD.

Abstract:

The Oran agglomeration is characterized by the presence in the basement of a large groundwater essentially free of hydrodynamic type. This sheet is sought for a number of agricultural and industrial uses. The water is also requested to supply many bathhouse and in some sectors, an extra supply of drinking water. The presence of this water resource in an urban context, sometimes in uncontrolled growth, increasing its vulnerability to pollution multifaceted usually generated by this medium (septic lost, leaking sewerage, industrial effluents, leaching of roads, etc..).

This study has led to progress in the state of hydrogeological knowledge of the aquifer, assess their condition assignment by pollution and more generally to assess the degree of vulnerability of groundwater to urban pollution. After an exhaustive study of the physical part of the study area reflecting the hydrogeological context of the aquifer system studied, the hydrochemical study of ground water is based on the interpretation of the results of analyzes performed on fourteen samples water collected at different points (wells and springs) at a sampling campaign conducted in October 2011. The statistical study of the different parameters analyzed, their spatial distribution and main facies and sub-facies chemical characteristics briefed on the origin and evolution of mineralization. The state of water quality was assessed through the study of parameters indicative of pollution of water abstracted, bacteriological status of waters in the western part of the agglomeration and Oran and the content of minor elements (heavy metals). The last part was devoted to the establishment of a mapping groundwater vulnerability to pollution through the implementation of the GOD method (case-Overall Groundwater aquifer class-Depth to groundwater table).

Keywords: Plateau Oran Jebel Murdjadjo, agglomeration Oran, groundwater, water chemistry, water quality, vulnerability, pollution..

SOMMAIRE

<i>remerciements</i>	
<i>résumé</i>	
<i>Abstrat</i>	
<i>sommaire</i>	
<i>Liste des Figures</i>	
<i>Liste des tableaux</i>	
<i>Liste des abréviations</i>	
<i>Introduction générale</i>	1

Chapitre I

Cadre physique de la région d'étude

1- CADRE GEOGRAPHIQUE :	3
2- Cadres morphologique, hydrologique et climatologique :	4
2-1- Morphologie :	4
2-2- Hydrologie :	5
2-3- Climatologie :	6
2-3-1- <i>Etude des précipitations</i> :	6
2-3-1-1- <i>Précipitations moyennes mensuelles</i> :	6
2-3-1-2- <i>Précipitations saisonnières</i> :	7
2-3-1-3- <i>Précipitations annuelles</i> :	8
2-3-2- <i>la température</i> :	8
2-3-2-1- <i>Les températures moyennes mensuelles</i> :	9
a- <i>la température maximale</i> :	9
b- <i>la température minimale</i> :	9
c- <i>la température moyenne</i> :	9
2-3-3- <i>l'évaporation</i> :	10
2-3-4- <i>le vent</i> :	10
2-3-5- <i>L'indice climatique de la région d'étude</i> :	11
3- CADRE GEOLOGIQUE :	11
3-1- Cadre géologique régional :	11
* <i>Un substratum, anté à synchro nappe</i> ,	12
* <i>Un remplissage post-nappe</i> ,	12
3-2- La géologie du secteur d'étude :	13
- <i>Le substratum anté à synchro nappe</i> :	13
- <i>Le Miocène supérieur</i> :	14
- <i>Le Calabrien grès-sableux (Plio-Pleistocène)</i> :	16
- <i>Le Quaternaire récent (Pleisto-Holocène)</i> :	17
4- APERÇU STRUCTURAL :	17
5- HYDROGEOLOGIE :	18

5-1- Description des principaux aquifères du secteur d'étude :	20
5-1-1- L'aquifère des calcaires récifaux du Djebel Murdjadjo :	20
5-1-2- L'aquifère du Calabrien :	23
5-1-3- L'aquifère des alluvions plio–quaternaires :	24
5-2- Piézométrie du secteur d'étude :	25
6- CONTEXTE URBAIN DE LA ZONE D'ETUDE	27
6-1 - La population :	27
6- 2 - Présentation du secteur industriel :	28
6-3 - Le réseau d'assainissement de la ville d'Oran (P.D.A.U 1984) :	30
6-4- Charges hydrauliques et polluants d'origine domestique et collective :	30
7-Conclusion :	31

Chapitre II

Contexte hydrochimique

1 - Introduction et présentation du cadre de l'étude :	32
2- Caractères organoleptiques :	32
2-1- La couleur :	32
2-2- L'odeur :	35
2-3- La turbidité :	35
3- Etude des paramètres physiques :	35
3-1- Le pH :	35
3-3- La conductivité :	36
3-4- Le résidu sec :	36
3-6- L'alcalinité :	37
4- Etude des paramètres chimiques majeurs :	39
4-2- Principaux cations et anions :	40
4-2-1- Le calcium :	40
4-2-2- Le magnésium :	40
4-2-3- Le sodium et le potassium :	43
4-2-4- Les bicarbonates :	43
4-2-5- Les chlorures :	43
4-2-6- Les sulfates :	43
4-3- Etude des rapports caractéristiques :	48
4-3-1- Le rapport SO_4^{2-}/Cl :	49
4-3-2- Le rapport Na/Cl :	49
4-3-3- Le rapport Mg/Ca :	49
4-4- Classification hydrochimique:	53
4-4-1- Interprétation par diagramme de Schæller-Berkaloff :	55
4-4-2- Interprétation par diagramme de Piper :	56
4-6- Indice chloro-alcalin (ex i.e.b : indice d'échange de bases) :	64
5- Traitement statistique des données hydrochimiques :	65
5-1- Etude statistique en composantes principales :	66
a)- statistiques élémentaires :	66

b)- Matrice de corrélation :	66
5-2- Analyse en Composant Principale (ACP) :	67
5-3- Résultats obtenus pour le secteur étudié :	68
a)- Diagonalisation :	68
b) - Etude des variables :	68
c)- Etudes des individus :	69
5-3- Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)	73
5-3-1- Principe de la méthode :	73
5-3-2- Avantages de la classification ascendante hiérarchique :	73
5-3-3- Résultats pour la Classification Ascendante Hiérarchique dans le secteur d'étude : ..	74
6-Aptitude des eaux à l'irrigation :	76
6-1- Evaluation de risque d'alcalinité :	76
6-2- Evaluation du risque de salinité (diagramme de Riverside) :	77
7-CONCLUSION :	79

Chapitre III

Etude des éléments indicateurs de la pollution

1-DEFINITIONS :	80
1-Définition de la pollution de l'eau :	80
1-2-Origine de la pollution :	80
1-2-1- La pollution d'origine urbaine :	80
1-2-1-1- La pollution organique :	80
a) La pollution organique biodégradable :	80
b) La pollution organique difficilement biodégradable :	80
1-2-1-2- La pollution bactériologique :	80
1-2-2- Pollution d'origine agricole :	81
1-2-3- Pollution d'origine industrielle :	81
1-3- Types des polluants.....	81
1-3-1- Les principaux éléments indicateurs de la pollution organique :	81
a-L'ammonium:.....	81
b-Les nitrites :	81
c- Les nitrates (NO ₃) :	81
c-Les phosphates :	82
e- Les matières organiques :	82
f- La matière en suspension :	82
1-3-2- La pollution bactériologique	82
1-3-2-1- Bactéries indicatrices de contamination fécale :	83
a- Les coliformes totaux :	83
b- Les coliformes fécaux :	83
c- Les streptocoques fécaux :	83
1-3-2-2- Autres bactéries pathogènes :	84
a- LeVibron Cholerae :	84
b - La Salmonella :	84
c- Le clostridium sulfito-réducteur :	84
1-3-2-3- Les normes de qualité de l'eau :	84
1-3-3- La pollution par les métaux lourds :	85

a) - Le fer :	85
b) - Le manganèse :	85
c) - Le cuivre :	86
e) - Le plomb :	87
f) - Le chrome :	87
I-2-3-2- Sources de pollution des substances toxiques :	87
I-2-3-3- Mécanismes de migration et atténuation des polluants des nappes :	88
2- ETUDE DE LA POLLUTION DANS LE SECTEUR D'ETUDE :	89
2-2-Analyse des éléments indicateurs de pollution dans la zone d'étude :	89
2-2-1- Les éléments nutritifs :	91
a) Les nitrates :	91
b) Les nitrites :	91
c) L'ammonium :	91
d) Les phosphates :	91
e)- Les matières organiques ::	96
f)- Les matières en suspension :	96
2-2-2- la silice :	96
2-2-3- Analyses bactériologiques	96
- les coliformes fécaux,	97
- les streptocoques fécaux,	97
- le vibrion cholerae,	97
- le clostridium sulfito-réducteur.	97
2-2-3-1- Résultats et discussion :	98
2-3 – Teneurs en éléments mineurs (métaux lourds) des eaux souterraines de l'agglomération	100
2-3-1- Description et répartition spatiale des résultats :	102
a) Le fer :	102
b) Le manganèse :	102
c) le cuivre	102
d) Le zinc :	106
e) Le plomb :	106
f) Le chrome :	106
3-Conclusion :	110

Chapitre IV

Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

1- Introduction :	111
2- Rappels sur la notion de vulnérabilité des eaux souterraines :	111
3-Les méthodes de cartographie de la vulnérabilité :	113
3-1 -Evaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC.....	115
3-2 -Evaluation de la vulnérabilité par la méthode "G.O.D" (GOD) :	117
3-2-1- Présentation de la méthode GOD.....	117
3-2-2- Mise en œuvre de la méthode GOD.....	118
3-2-3- Acquisition et description des paramètres GOD :	119
a- Type d'aquifère (G) :	119

<i>b- Impact de la zone vadose (O) :</i>	120
<i>Argiles schisteuses massives :</i>	120
<i>Roches métamorphiques et éruptives :</i>	120
<i>Roches métamorphiques et éruptives altérées :</i>	121
<i>Séquences de couches de grés, calcaires et d'argiles schisteuses :</i>	121
<i>Grés massifs :</i>	121
<i>Calcaires massifs :</i>	121
<i>Sables et graviers :</i>	121
<i>Basalte :</i>	121
<i>c- Profondeur de la nappe (D) :</i>	122
3-3- Mise en application de la méthode GOD :	123
3-3-1- <i>Méthodologie :</i>	124
3-3-3- <i>Acquisition des données et moyens :</i>	125
3-3-4- <i>Supports cartographiques :</i>	126
3-3-5- <i>Supports logiciels :</i>	126
3-3-6- <i>Traitement des données :</i>	126
4- Mise en œuvre de la méthode GOD dans le secteur d'étude :	127
4-1- <i>Type d'aquifère (G) :</i>	127
4-2- <i>Zone non saturée (O) :</i>	128
4-3- <i>Profondeur à la nappe (D) :</i>	129
4-4- <i>Etablissement de la carte de vulnérabilité GOD.....</i>	130
5- Conclusion.....	133
Conclusion générale	135
Références bibliographiques.....
Annexes.....

Liste des Figures

<i>Fig. n° 1: Situation géographique du Plateau d'Oran-Bir El Djir</i>	3
<i>Fig. n° 2 a : Localisation géographique du secteur d'étude.</i>	3
<i>Fig. n° 2 b: Vue aérienne du secteur d'étude.</i>	4
<i>Fig. n° 3: Carte des sous bassins versants hydrologiques du Plateau d'Oran</i>	6
<i>Fig. n° 4: Précipitations moyennes mensuelles (période 1997-2010).</i>	7
<i>Fig. n° 5: Précipitations saisonnières (période 1997-2010).</i>	7
<i>Fig. n° 6: Précipitations annuelles (période 1997-2010).</i>	8
<i>Fig. n° 7: Températures moyennes mensuelles à la station Es-sénia (période 1997-2010).</i>	9
<i>Fig. n° 8: Diagramme d'indice d'aridité d'Es-sénia (méthode de De Martonne).</i>	11
<i>Fig. n° 9: Log géologique synthétique de la région d'Oran (Hassani M. I, 1987, extrait).</i>	13
<i>Fig. n° 10: Carte géologique du secteur d'étude (carte d'Oran au 1/50.000, d'Y. Gourinard, 1957).</i>	14
<i>Fig. n° 11: Coupe géologique des falaises d'Oran (Thomas G, 1985).</i>	15
<i>Fig. n° 12: vue photographique des falaises d'Oran montrant le dépôt des formations calabriennes sur les marnes blanches du Miocène supérieur.</i>	16
<i>Fig. n° 13: Logs géologiques sous le plateau d'Oran (A. Joseph, 1979).</i>	17
<i>Fig. n° 14 : Esquisse structurale de l'Oranie centrale selon B. Fenet, 1975.</i>	18
<i>Fig. n° 15: Principaux aquifères du secteur d'étude (d'après A. Joseph, 1979).</i>	19
<i>Fig. n° 16: Log hydrogéologique de la région d'Oran</i>	20
<i>Fig. n° 17: Carte de localisation des sources et de la fracturation des calcaires messiniens du Djebel Murdjadjo d'après (Hassani M.I, 1987).</i>	21
<i>Fig. n° 18: Coupe hydrogéologique schématique du Djebel Murdjadjo (M. I. Hassani, 1987).</i>	22
<i>Fig. n° 19 : Carte piézométrique du secteur d'étude (d'après Sogreah, 1997).</i>	25
<i>Fig. n° 20: Schéma d'urbanisation de l'agglomération oranaise (d'après Sogreah, Agep1997).</i>	28
<i>Fig. n° 21: Industries recensées par type d'activité dans le groupement urbain d'Oran.</i>	29
<i>Fig. n° 22 : Localisation des points des prélèvements.</i>	34
<i>Fig. n° 23 : Carte en courbes isoteneur de résidu sec (mg/l), (25/10/2011).</i>	38
<i>Fig. n° 24 : Carte en courbes isoteneur de calcium (mg/l).</i>	41
<i>Fig. n° 25: Carte en courbes isoteneur de magnésium (mg/l).</i>	42
<i>Fig. n° 26: Carte en courbes isoteneur de Na + k (mg/l).</i>	44
<i>Fig. n° 27: Carte en courbes isoteneur de bicarbonates (mg/l).</i>	45
<i>Fig. n° 28: Carte en courbes isoteneur de chlorures (mg/l).</i>	46
<i>Fig. n° 29 : Carte en courbes isoteneur de sulfates (mg/l).</i>	47

<i>Fig. n° 30 : Carte en courbes isovaleur de r (SO_4/Cl).</i>	50
<i>Fig. n° 31 : Carte en courbes isovaleur de r (Na/Cl).</i>	51
<i>Fig. n° 32: Carte en courbes isovaleur de r (Mg/Ca).</i>	52
<i>Fig. n° 33: Représentation graphique des résultats sur le diagramme de Schoeller–Berkaloff. (puits 1 à 6 et SREA)</i>	55
<i>Fig. n° 34: Représentation graphique des résultats sur le diagramme de Schoeller–Berkaloff (puits 8 à 13 et SCDA).</i>	56
<i>Fig. n° 35: Représentation graphique des résultats sur diagramme de Piper (puits 1 à 6 et SREA)</i>	58
<i>Fig. n° 36: Représentation graphique des résultats sur le diagramme de Piper (puits 8 à 13 et SCDA).</i>	59
<i>Fig. n° 37: Carte de répartition des principaux faciès et sous-faciès hydrochimiques</i>	61
<i>Fig. n° 38: Diagrammes des indices de saturation (Calcite, dolomite et aragonite).</i>	63
<i>Fig. n° 39: Diagrammes des indices de saturation (gypse et anhydrite).</i>	64
<i>Fig. n° 40: Cercle de corrélation : axes 1 et 2, variables.</i>	72
<i>Fig. n° 41: Cercle de corrélation : axes 1 et 2, variables et individus..</i>	72
<i>Fig. n° 42: Cercle de corrélation : axes 1 et 2, variables.</i>	72
<i>Fig. n° 43: dendrogramme complet visualisant le regroupement progressif des objets.</i>	74
<i>Fig. n° 44 : Le dendrogramme tronqué.</i>	75
<i>Fig. n° 45 : Représentation graphique sur le diagramme de Riverside.</i>	78
<i>Fig. n° 46 : Carte des teneurs en nitrates (mg/l) des points d'eau (campagne du 24-25/10/2011).</i>	92
<i>Fig. n° 47: Carte des teneurs en nitrites (mg/l) des points d'eau (campagne du 24-25/10/2011).</i>	93
<i>Fig. n° 48 : Carte des teneurs en ammonium (mg/l) des points d'eau (campagne du 24-25/10/2011).</i>	94
<i>Fig. n° 49 : Carte des teneurs en phosphates (mg/l) des points d'eau (campagne du 24-25/10/2011).</i>	95
<i>Fig. n° 50 : Carte de la qualité bactériologique des points d'eau (campagnes du 04 juin 2006)</i>	99
<i>Fig. n° 51 : Carte des teneurs en fer (mg/l) des points d'eau (29/11/2000).</i>	103
<i>Fig. n° 52: Carte des teneurs en manganèse (mg/l) des points d'eau (29/11/2000).</i>	104
<i>Fig. n° 53: Carte des teneurs en cuivre (mg/l) des points d'eau (29/11/2000).</i>	105
<i>Fig. n° 54 : Carte des teneurs en zinc (mg/l) des points d'eau (29/11/2000).</i>	107
<i>Fig. n° 55 : Carte des teneurs en plomb (mg/l) des points d'eau (29/11/2000).</i>	108
<i>Fig. n° 56: Carte des teneurs en chrome (mg/l) des points d'eau (29/11/2000).</i>	109
<i>Fig. n° 57: Structuration de la méthode GOD pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la contamination (S. Foster, 1987).</i>	118
<i>Fig. n° 58 : Schéma illustrative de la zone vadose (zone non saturée).</i>	120

<i>Fig. n° 59: Déroulement de la spatialisation numérique.</i>	124
<i>Fig. n° 60: Organigramme illustrant l'organisation en couches d'information "Raster".</i>	125
<i>Fig. n° 61: Carte des types d'aquifères du secteur d'étude classés selon la cotation GOD.</i>	127
<i>Fig. n° 62: Carte de la zone non saturée "vadose" (O) de la région d'étude en fonction de la cotation GOD.</i>	128
<i>Fig. n° 63: Carte de la profondeur du niveau piézométrique de la région d'étude (Agep-Sogreah, 1997).</i>	129
<i>Fig. n° 64: Carte de la profondeur du niveau piézométrique (D) de la région d'étude en fonction de la cotation GOD.</i>	130
<i>Fig. n° 65: Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du secteur d'étude par application de la méthode GOD.</i>	131
<i>Fig. n° 66: Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution du secteur d'étude selon la méthode GOD.</i>	132
<i>Fig. n° 67: Représentation de la variabilité fréquentielle de l'indice GOD des eaux souterraines du secteur d'étude.</i>	132

Liste des tableaux

Tableau n° 1: Coordonnées de la station climatologique d'Es-sénia.	6
Tableau n° 2: Précipitations moyennes mensuelles pour la période 1997-2010, (données O. N. M).	6
Tableau n° 3: Précipitations saisonnières (période 1997-2010).....	7
Tableau n° 4: Précipitations annuelles (période 1997-2010).....	8
Tableau n° 5: Températures mensuelle (période 1997-2010), .(O.N.M).....	9
Tableau n° 6: Evaporation moyenne mensuelle (période 1990-2001).	10
Tableau n° 7: Evaporations annuelles (période 1990-2002).....	10
Tableau n° 8: Les vitesses moyennes mensuelles du vent (période 1990-2001).....	10
Tableau n° 9: Représentation des agglomérations de la zone d'étude.	27
Tableau n° 10 : Localisation des principaux établissements industriels.	28
Tableau n° 11: Types d'industries.....	29
Tableau n° 12: Charges hydrauliques et polluants d'origines domestique et collective (d'après Sogreah, Agep 1997).....	31
Tableau n° 13: Présentation des résultats de l'analyse physico-chimique des points d'eau prélevés (25-10-2011).....	33
Tableau n° 14: Pourcentage d'erreur des analyses d'eaux du secteur d'étude.	39
Tableau n° 15: Rapports caractéristiques des eaux prélevées.	48
Tableau n° 16: Résultats des analyses chimiques en r (mg/l).....	53
Tableau n° 17: faciès caractéristiques des échantillons prélevés.....	54
Tableau n° 18: Résultats des analyses chimiques en r %.	57
Tableau n° 19: indices de saturation des eaux souterraines de la zone d'étude.....	62
Tableau n° 20: valeurs des indices d'échange de base des eaux du secteur d'étude.	65
Tableau n° 21: moyennes et écarts-type de la série.....	66
Tableau n° 22: Matrice de corrélation des éléments chimiques.....	67
Tableau n° 23 : Vecteurs propres (coefficient des variables centrées réduites dans l'équation linéaire des axes principaux).	68
Tableau n° 24 : Etude des variables.	69
Tableau n° 25 : étude des individus.....	70
Tableau n° 26 : Classes des objets (individus).	75
Tableau n° 27: Les résultats des valeurs de SAR.....	76
Tableau n° 28 : classes d'alcalinité selon U.S.S.L (1954).....	77
Tableau n° 29: Critères microbiologiques des eaux de distribution traitée selon la norme algérienne (Joradp, 1994).	84
Tableau n° 30 : Les sources industrielles de pollution par des substances toxiques (J.F. Busse, 1980).	88

<i>Tableau n° 31: Résultats de l'analyse physico-chimique des éléments indicateurs de pollution des points d'eau prélevés (24/25-10-2011).</i>	90
<i>Tableau n° 32: Présentation des résultats de l'analyse bactériologique des eaux souterraines de la partie occidentale (campagnes du 04 juin 2006 et du 01 juillet 2006).</i>	97
<i>Tableau n° 33: Interprétation des résultats d'analyse bactériologique selon les normes algériennes.</i>	98
<i>Tableau n° 34: Représentation des résultats de l'analyse chimique des éléments mineurs.</i>	101
<i>Tableau n° 35 : Les critères de vulnérabilité couramment pris en compte.</i>	113
<i>Tableau n° 36 : Principales méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines (Civita, 1993).</i>	114
<i>Tableau n° 37: Cotation accordée au type d'aquifère (G). Source (in M. Sinan, 2000)</i>	119
<i>Tableau n° 38 : Cotation accordé à la lithologie de la zone non saturée(O). Source</i>	122
<i>Tableau n° 39 : Cotations accordées à la profondeur de la nappe - sol (D).</i>	123
<i>Tableau n° 40 : Intervalles des valeurs de l'indice GOD et classes correspondantes</i>	123

Liste des acronymes et abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales.

AGEP : Agence Nationale de Gestion des Eaux Potables

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

CAH: Classification Ascendante Hiérarchique.

MNT : Modèle Numérique du Terrain.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

ONA : Office Nationale de l'Assainissement.

ONM : Office National de la Météorologie.

pH : potentiel hydrogène

S_{CDA} : Source de Cueva d'El Agua

S_{REA} : Source de Ras El Ain

SAR : Sodium absorption Ratio.

SERSID : Société d'Engineering et de Réalisations Sidérurgiques.

SEQ : Système d'Evaluation de la Qualité.

SIG : Système d'Information Géographique.

USDA : United States Department of Agriculture.

UTM : Universal Transverse Mercator.

μS : micro-siemens.

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis quelques décennies, la protection et la conservation des milieux naturels, en particulier la qualité des eaux, est devenue une préoccupation majeure et un objectif principal dans les programmes de développement. Les eaux souterraines représentent une excellente source d'approvisionnement en eau potable. Le filtre naturel constitué par les matériaux géologiques produit le plus souvent une eau de bonne qualité. Leur exploitation présente des avantages économiques appréciables, du fait qu'elles ne nécessitent que peu de traitement et parfois même aucun. Le maintien de cet avantage relatif requiert cependant que des mesures soient prises pour préserver de façon durable la qualité de cette ressource. En effet, ces dernières années même les eaux souterraines ne sont pas épargnées par la pollution, un danger qui menace notre environnement et dont l'homme en est le responsable. L'exploitation non rationnelle des ressources, les rejets domestiques et industriels non contrôlés, utilisation excessive de fertilisants chimiques ont un impact néfaste sur la qualité des eaux souterraines.

L'agglomération oranaise se caractérise par la présence dans son sous-sol d'une importante nappe d'eau souterraine de nature hydrodynamique essentiellement libre. Cette nappe est sollicitée pour nombre d'usages agricoles et industriels. La nappe reste également sollicitée pour approvisionner des nombreux bains-douches et, dans certain secteurs, à une alimentation d'appoint en eau potable.

La présence de cette ressource hydrique dans un contexte urbain, à croissance parfois mal maîtrisée, augmente sa vulnérabilité aux pollutions multiformes habituellement générées par ce milieu (fosses perdues, fuites du réseau d'assainissement, effluents industriels, lessivage des chaussées, etc.).

La présente étude a pour objectif d'avancer dans l'état de la connaissance hydrogéologique de cet aquifère, d'évaluer leur état d'affectation par la pollution et plus généralement d'apprécier le degré de vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions urbaines. Plus dans le détail, elle dressera un inventaire de la qualité physico-chimique des

eaux d'échantillons prélevés au cours d'une campagne d'étude réalisée au mois d'octobre 2011, ciblant les éléments chimiques majeurs et ceux indicateurs de pollution (nitrates, phosphates, etc.). Elle rendra également compte des teneurs en éléments mineurs (métaux lourds) ainsi que des caractéristiques bactériologiques des eaux de la partie occidentale de l'agglomération.

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

Le premier chapitre vise la présentation générale du cadre physique de la zone d'étude, on abordant d'une part les caractéristiques morphologiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques de la zone.

Le deuxième chapitre, est consacré à l'étude hydrochimique. Ce chapitre portera sur l'interprétation des paramètres hydrochimiques majeurs caractérisant les quatorze échantillons prélevés. L'étude statistique des différents paramètres analysés, de leur répartition spatiale et des principaux faciès et sous-faciès chimiques déterminés renseignera sur l'origine et l'évolution des minéralisations.

Le troisième chapitre est réservé à l'état qualitatif des eaux de la région étudiée à travers de l'étude des paramètres indicateurs de pollution des eaux prélevées lors de la campagne du 24 et 25 octobre 2011. Il renseignera également l'état bactériologique des eaux dans la partie occidentale de l'agglomération oranaise et sur les teneurs en éléments mineurs.

Le quatrième chapitre sera consacré à la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions à travers la mise en œuvre la méthode G.O.D (Groundwater occurrence- Overall aquifer class- Depth to groundwater table).

Chapitre I

Contexte physique de la région d'étude

1- Cadre géographique :

L'agglomération oranaise est le deuxième centre urbain et économique du pays. Elle est située au nord-ouest de l'Algérie, au bord de la mer Méditerranée (coordonnées : 35° 42' Nord, 0° 38' Ouest). L'agglomération se localise à la partie Nord-Ouest du plateau d'Oran (fig. n° 1), au pied du Djebel Murdjadjo (fig. n° 2 a et b). L'agglomération est constituée par la ville d'Oran (S.S), raccordée aux localités avoisinantes : Canastel, Bir El Djir, Es-Sénia, El Hassi (Pont Albin), etc.

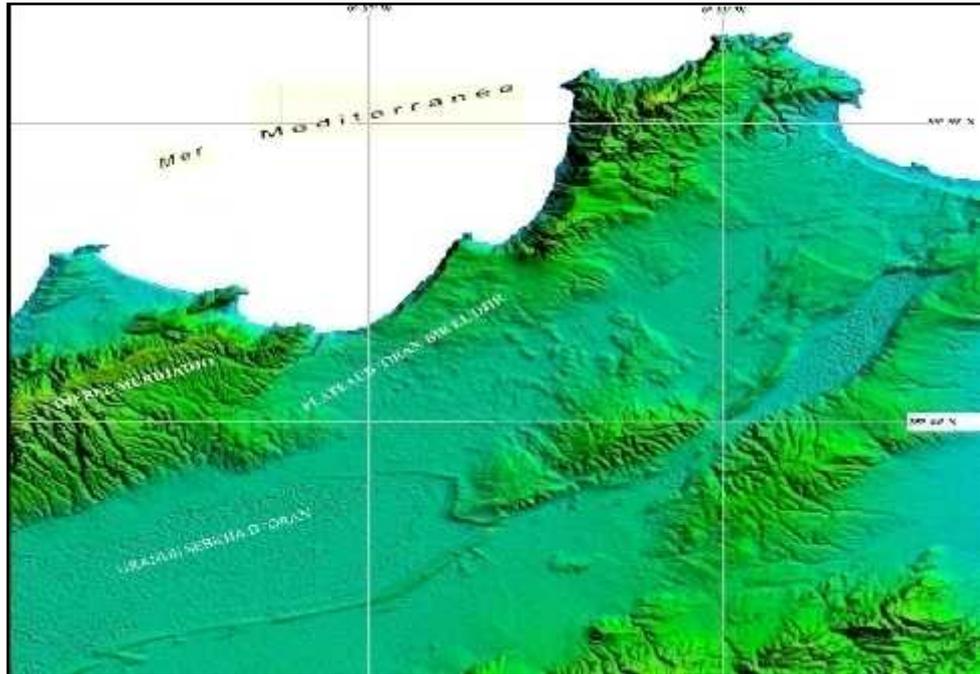


Fig. n° 1: Situation géographique du Plateau d'Oran-Bir El Djir

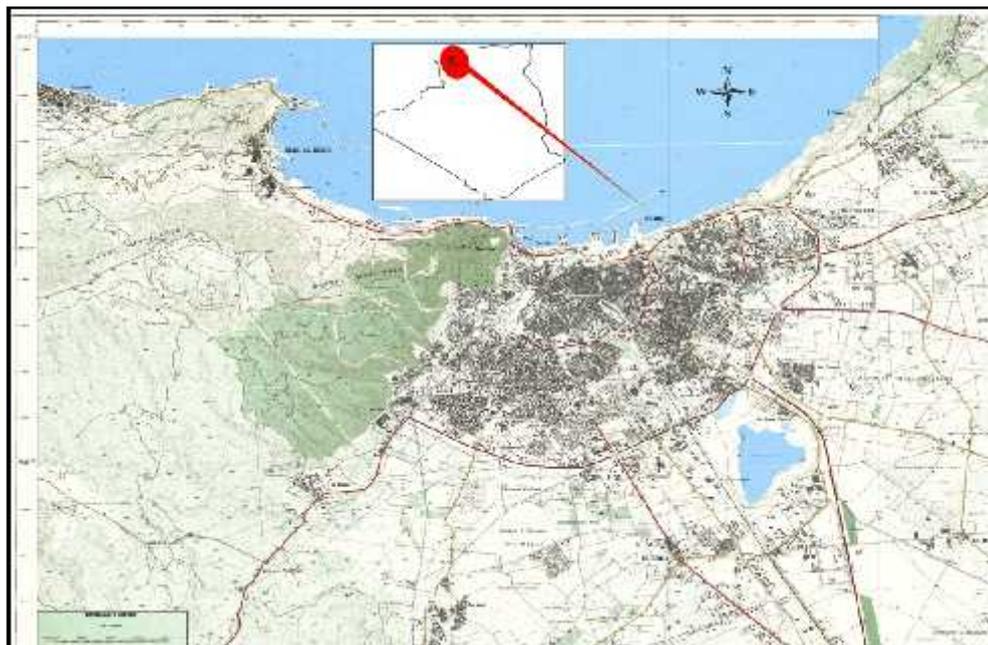


Fig. n° 2 a : Localisation géographique du secteur d'étude.



Fig. n°2 b : Vue aérienne du secteur d'étude.

2- Cadres morphologique, hydrologique et climatologique :

2-1- Morphologie :

La morphologie de la région d'Oran détermine, du Nord vers le Sud, trois sillons différents :

- un sillon septentrional représenté par la plaine des Andalouses,
- un sillon médian (Plateau d'Oran – Grande Sebkhha) prolongeant vers l'Ouest le sillon du bassin du Cheliff,
- un sillon méridional situé au sud des Monts de Tessala (plaine de Sidi Bel Abbés).

Notre secteur d'étude se situe en bord septentrional du sillon médian, soit en bordure méridionale du Djebel Murdjadjo fig. n° 1). L'ensemble est orienté selon la direction tellienne (WSW - ENE).

Le Djebel Murdjadjo fait partie des Massifs Littoraux Oranais. Il enferme la partie occidentale de l'agglomération (secteur d'El Hassi-Ain Beida). Il est caractérisé par son profil dissymétrique, son échagement en gradins, ses ruptures de pente, ses aplanissements, son hydrologie et surtout sa karstification. Il domine le Plateau d'Oran, selon un dénivelé de près de 500 m. Le sommet du djebel culmine à 589 m. Le versant sud plonge en pente

douce vers la dépression de la Grande Sebkha alors que le versant nord, tourné vers la mer, est formé de hautes falaises.

2-2- Hydrologie :

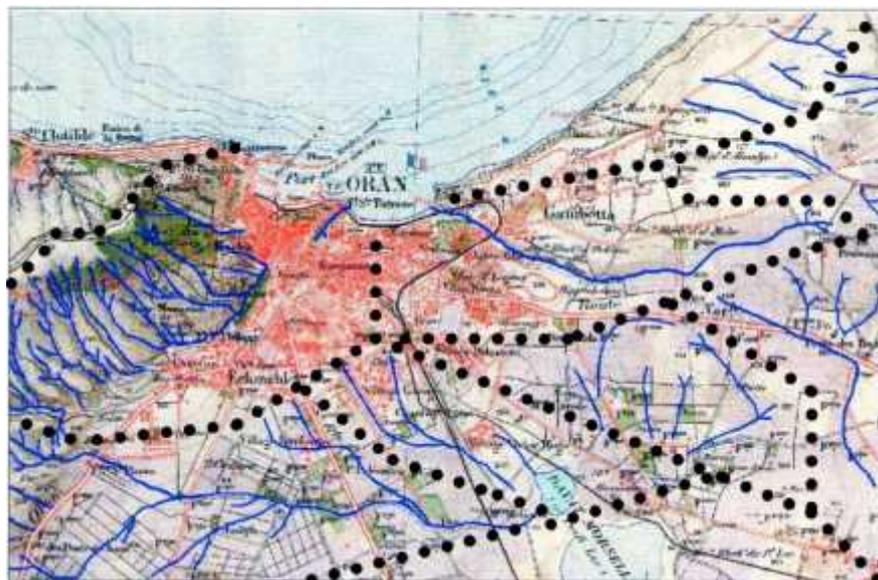
Le sillon médian défini précédemment détermine un bassin versant de type endoréique. Il est limité par la ligne de crêtes du Djebel Murdjadjo et des Monts de Tessala, il constitue le bassin versant de la Grande Sebkha d'Oran. L'effet de l'assèchement du climat et la tectonique récente influence beaucoup l'organisation du réseau hydrographique de la région (Hassani M.I, 1987).

Sur le flanc sud du Djebel Murdjadjo, le réseau hydrographique est bien développé. Ce sont généralement des entailles plus ou moins profondes dans les calcaires et qui s'estompent d'amont en aval vers la plaine. On distingue de façon nette deux types de réseaux hydrographiques. Un réseau dendritique qui se développe dans les schistes d'âge secondaire, situés en amont du djebel, et un réseau de type rectangulaire d'oueds, entaillant fortement le karst (canyons) et liés au réseau de fractures affectant les calcaires miocènes, plus en aval.

Le régime des oueds conditionnés par le régime des précipitations se caractérise par un écoulement temporaire et irrégulier. Les eaux pérennes sont rares car les eaux provenant des sources et celles associées au ruissellement de surface, se re-infiltrent assez rapidement après une circulation de quelques centaines de mètre sur les calcaires miocènes.

En ce qui concerne la direction de l'écoulement, la majorité des chaabets et oueds (Misserghin, Tamermonth, Dahlia, etc..) dévalent suivant une direction Nord-Sud vers la plaine de Misserghin et la Grande Sebkha d'Oran. Par contre à l'extrémité NE du Djebel Murdjadjo, les écoulements prennent une direction NW-SE vers le Plateau d'Oran, particulièrement l'Oued Chaabane qui draine la partie à l'Est d'El Hassi (Pont Albin). Il s'écoule vers Ain Beida, Es sénia et finit par déboucher à Dayat Morselly.

Quant à l'Oued Keffri, il a une direction Est-Ouest avant de rejoindre en aval le ravin de Ras El Ain et finir par se jeter à la mer au niveau du vieux port d'Oran.



(..... limite du BV / cours d'eau)

Fig. n° 3: Carte des sous bassins versants hydrologiques du Plateau d'Oran (in Benabdellah M., 2010).

2-3- Climatologie :

Les principales caractéristiques climatiques de la zone d'étude se sont basées sur les données relatives à la station d'Es-séna (tableau n° 1), pour la période 1990-2002.

Tableau n° 1: Coordonnées de la station climatologique d'Es-séna.

station	Altitude (m)	Longitude (E/W)	Latitude (N)	Indicatif ONM
Es-séna	90	00°36W	35°38	490

2-3-1- Etude des précipitations :

2-3-1-1- Précipitations moyennes mensuelles :

Les précipitations moyennes mensuelles, maximales et minimales de la station d'Es-séna sont présentées sur le tableau n° 2 :

Tableau n° 2: Précipitations moyennes mensuelles pour la période 1997-2010, (données O. N. M).

Es-séna	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Max (mm)	155,19	100,32	62,49	76,47	70	32	24	17	66	134,62	185,9	128,25
Min (mm)	1,27	0	1,02	0	0	0	0	0	1,27	6,9	3,4	3,05
Moy (mm)	42	38	25	29	22	4,9	2	1,5	15	35	68	44

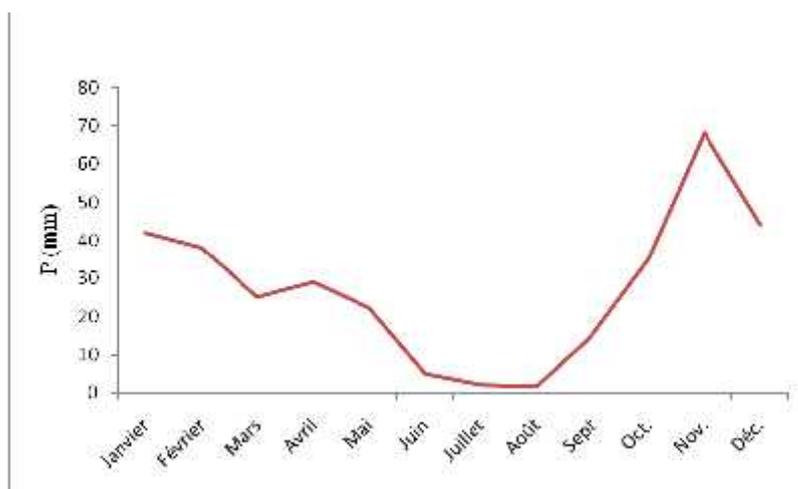


Fig. n° 4: Précipitations moyennes mensuelles (période 1997-2010).

Le graphe des précipitations mensuelles (fig. n° 4) montre qu'il y a deux saisons ; l'une est aride de mai à septembre, l'autre pluviale d'octobre à avril.

La quantité maximale est de 68 mm en novembre et le minimum est de 1 mm en juillet.

2-3-1-2- Précipitations saisonnières :

Elles sont représentées en tableau 3.

Tableau n° 3: Précipitations saisonnières (période 1997-2010)..

	Hiver (H)	Printemps (P)	Eté (E)	Automne (A)	Régime climatique
Précipitations saisonnières (mm)	124	76	07	109	H.A.P.E

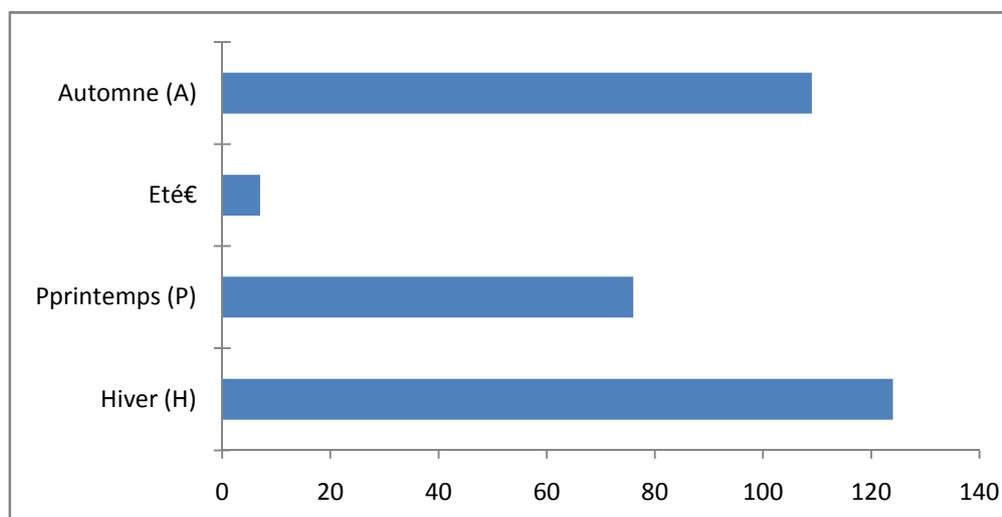


Fig. n° 5: Précipitations saisonnières (période 1997-2010).

Le régime climatique de région est de type HAPE.

Le graphe des précipitations saisonnières (fig. n° 5) indique que les précipitations sont les plus importantes en Hiver, avec un maximum de 114 mm.

2-3-1-3- Précipitations annuelles :

Tableau n° 4: Précipitations annuelles (période 1997-2010)..

Années	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	moyenne
Prec. Es-sénia	174	233	279	254	472	286	383	356	236	311	478	410	247	422	326

Le module pluviométrique moyen annuel est égal à 326 mm. avec un maximum enregistré en 2007 de 478 mm et un minimum estimé de 79 mm en 1999.

Les précipitations sont caractérisées par leur irrégularité et par des variations interannuelles et inter saisonnières importantes (fig. n° 6).

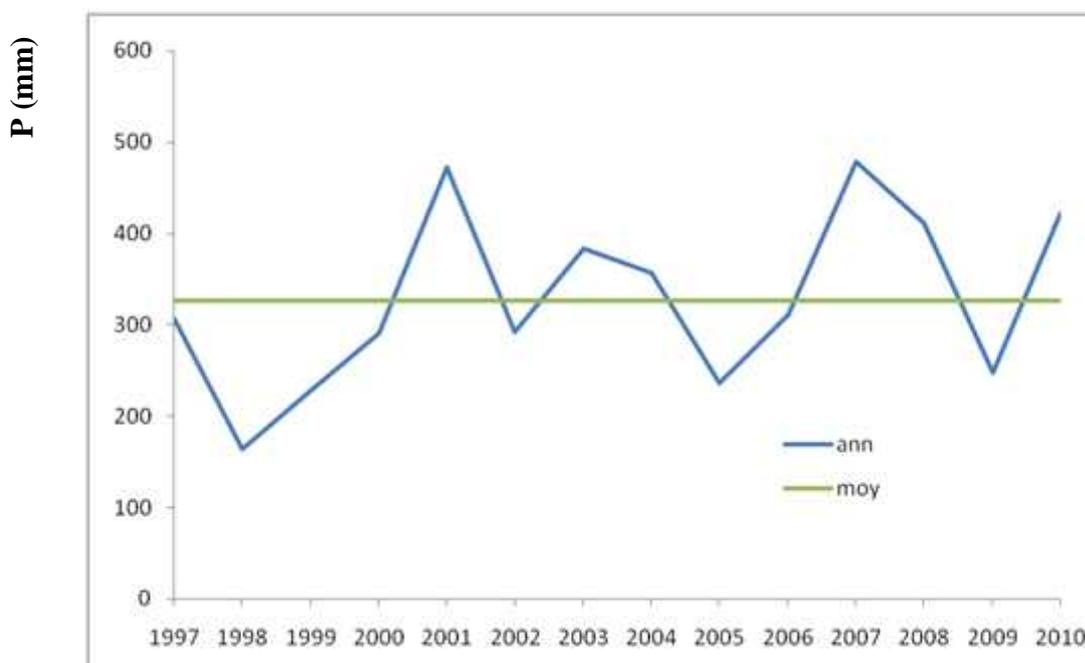


Fig. n° 6: Précipitations annuelles (période 1997-2010).

2-3-2- la température :

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

2-3-2-1- Les températures moyennes mensuelles :

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

Tableau n° 5: Températures mensuelle (période 1997-2010), .(O.N.M)

Es-sénia	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Max (°C)	12,5	13,5	16,3	17,5	20,5	24,8	27,1	27,7	24,6	21,5	17	13,6
Min (°C)	8,2	8,9	13	15,2	17,3	21,5	23,9	25,1	22,6	18	12,9	9,5
Moy (°C)	10,85	11,75	14,17	16,27	19,23	23,1	25,77	26,25	23	20	14,91	11,83

a- la température maximale :

Le minimum est enregistré au mois de janvier (12.5 °C) et le maximum au mois d'août de 27.7 °C.

b- la température minimale :

La température minimale varie de 8.2°C au mois de janvier à 25.1°C au mois d'août.

c- la température moyenne :

Le mois de janvier reste le plus froid (10.85 °C) de l'année, le mois d'août en est le plus chaud (26.25 °C).

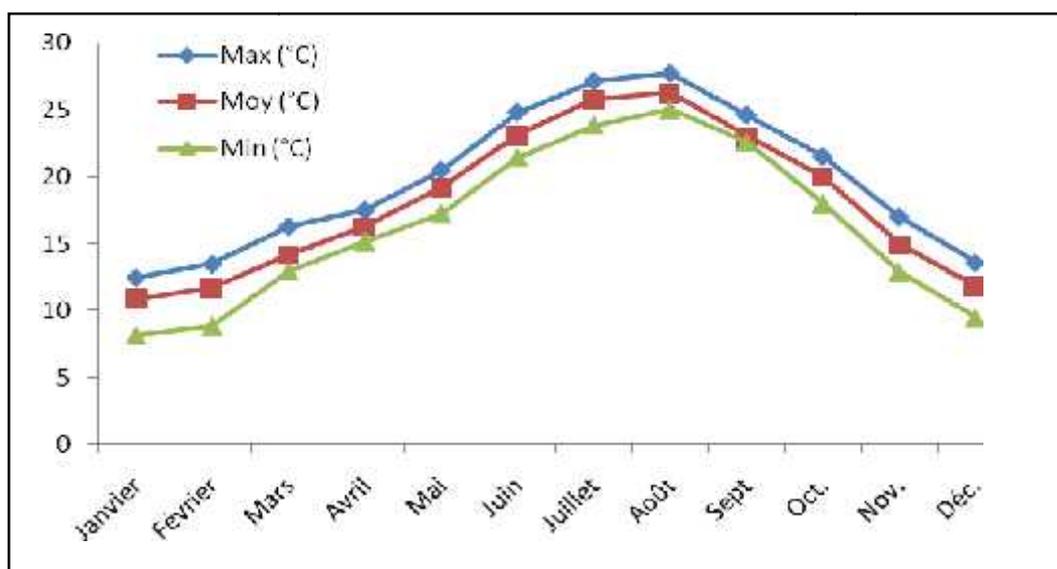


Fig. n° 7: Températures moyennes mensuelles à la station Es-sénia (période 1997-2010).

Le graphe de la figure n° 7 indique que la saison froide ($T < 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) débute en novembre et se termine en avril, alors que la saison la plus chaude commence en mai et finit en octobre.

2-3-3-l'évaporation :

Les valeurs des moyennes mensuelles et annuelles de l'évaporation pour la station d'Es-sénia durant 1990-2001 sont présentées dans les tableaux n° 6 et 7:

Tableau n° 6: Evaporation moyenne mensuelle (période 1990-2001).

Es-sénia	Jan	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Moyenne (mm)	66	70	96	122	151	167	174	181	148	110	79	65

L'évaporation atteint son maximum au mois d'août (181 mm). En décembre on enregistre 65 mm. La moyenne mensuelle est de 120 mm. Au cours de l'année, nous pouvons distinguer deux périodes, la plus affectée par l'évaporation se prolonge d'avril à octobre, l'autre occupe le reste de l'année.

Tableau n° 7: Evaporations annuelles (période 1990-2002).

Années	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Moyenne (mm)	1407	1453	1549	1643	1412	1511	1571	1561	1467	1133	1070

Le maximum de la moyenne annuelle a été atteint en 1995 (1643 mm) et le minimum en 2002 (1070 mm).

La moyenne annuelle de la période 1992-2002 a été de 1434 mm.

2-3-4- le vent :

Les moyennes mensuelles de la vitesse du vent à la station d'Es-sénia concernant la période 1990 - 2002 sont présentées dans le tableau n° 8.

Tableau n° 8: Les vitesses moyennes mensuelles du vent (période 1990-2001).

Es-sénia	Jan	Fév.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Vitesse moy (m/s)	26.38	30.46	35.07	42.69	41.1	43.31	39.38	37.1	36.38	34.53	30.76	27.15
Direction	W	W	W	W	W	W	WSW	W	W	WSW	WSW	WSW

Les vents dominants soufflent essentiellement de l'W et de WSW.

Le Sirocco : vent chaud et sec, de direction WSW, souffle de 5 à 7 jours entre les mois de juin et novembre.

2-3-5- L'indice climatique de la région d'étude :

L'utilisation du diagramme de De Martonne détermine pour notre région d'étude un climat semi-aride à la limite d'un régime désertique (fig. n° 8). L'indice d'aridité, donné par la formule: $I = P/T + 10$, est égal à 10.71 (période : 1990-2001).

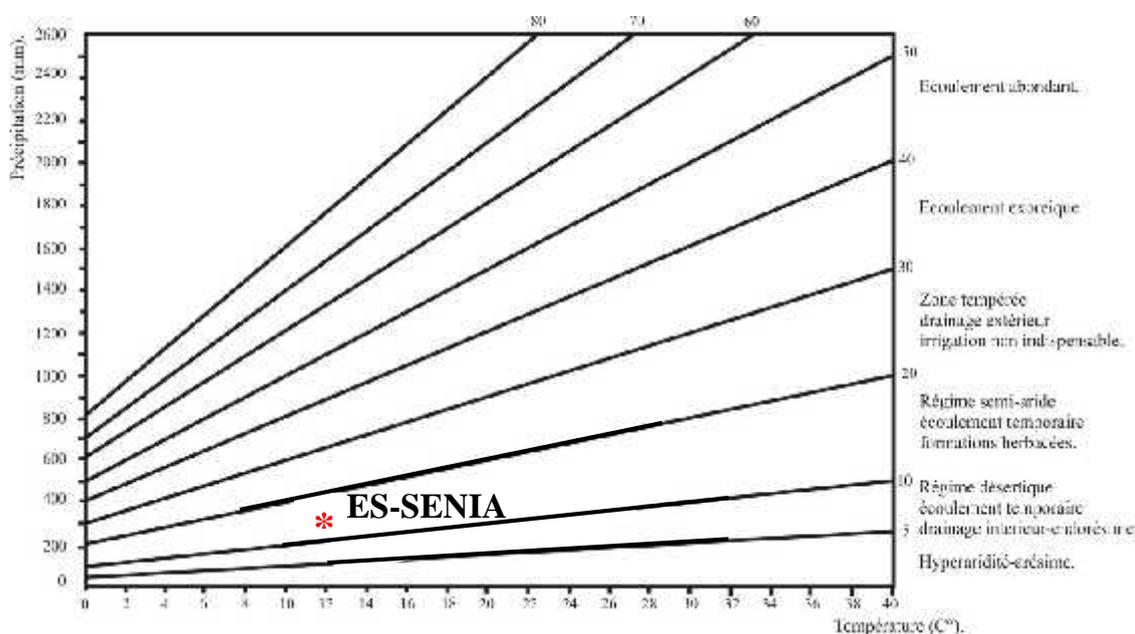


Fig. n° 8: Diagramme d'indice d'aridité d'Es-sénia (méthode de De Martonne).

3- Cadre géologique :

3-1- Cadre géologique régional :

Le Plateau d'Oran fait partie de "Littoral Oranais". Ce dernier a fait l'objet de nombreuses études géologiques, principalement par F. Doumergue (1912), Tinthoin (1948), A. Perrodon (1957), Y. Gourinard (1958), B. Fenet (1975), G. Thomas (1985), etc.

Ce domaine fait partie intégrante de la zone externe du Domaine Tellien de la Chaîne Alpine. Il se situe dans la partie nord-occidentale du bassin Néogène sub-littoral du Bas-Chelif.

Dans la région, on distingue plusieurs massifs et plateaux, du Nord-Est au Sud-Ouest :

- Le massif du Djebel Khar (Montagne des Lions).

- Le massif d'Oran (Djebel Murdjadjo) séparé du Djebel Khar par le plateau d'Oran.
- Le plateau incliné du Miocène supérieur coiffant le Djebel Murdjadjo.
- Le massif des Andalouses avec le plateau calabrien de M'sila.
- Le massif de Madagh incluant le plateau de Lindles.
- La plaine des Andalouses, au sud de Cap Falcon.

La structure géologique régionale de ce domaine détermine deux grands ensembles (G. Thomas.1985) (fig. n°9) :

* Un substratum, anté à synchro nappe, constitué dans les Djebels Khar et dans le Djebel Murdjadjo jusqu'à Madagh, par les massifs schistosés para-autochtones d'âge Jurassique et Crétacé.

* Un remplissage post-nappe, dans les parties plus basses du domaine, constitué par :
- Un Miocène 1^{er} cycle, constitué de 250 mètres de dépôts continentaux de grès et conglomérats rouges, qui affleure au nord, dans le bassin de Mers El Kebir et au sud dans les Monts de Tessala (région de Tafraoui-Aghbal).

- Un Miocène 2^{ème} cycle, constitué par :

> un niveau détritique de base formé de grès marins affleurant sommairement dans les zones hautes,

> des formations médianes constituées de marnes bleues qui prennent une grande extension sous le plateau d'Oran et dans les Monts de Tessala où ils peuvent atteindre 600 mètres d'épaisseur,

> des formations terminales, constituées au fond du domaine, par la série des tripolis et la série des gypses alors que dans le Djebel Murdjadjo, il y a passage latéral à

> des formations de bordure : c'est le faciès des calcaires récifaux qui prend une grande extension dans la région,

> un Pliocène inférieur et moyen affleurant dans les Djebels Djira et Debbi, au sud d'El Braya, où des marnes à intercalations gréso-gypseuses atteignent 100 à 200 mètres d'épaisseur,

> des formations pleisto-holocènes, correspondant à un empilement de couches sub-horizontales et argilo-sableuses ou limoneuses se raccordant sur les bords avec des sédiments devenant plus grossiers.

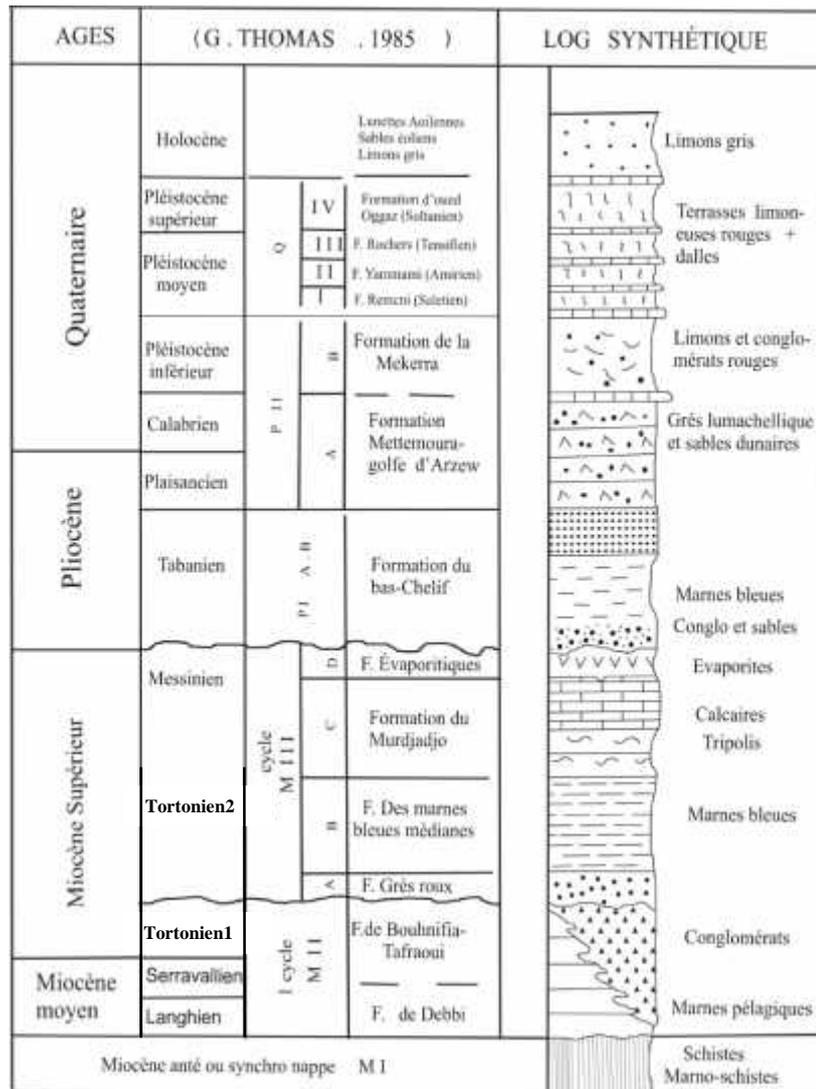


Fig. n° 9: Log géologique synthétique de la région d'Oran (Hassani M. I, 1987, extrait).

3-2- La géologie du secteur d'étude :

- Le substratum anté à synchro nappe :

A proximité de l'agglomération oranaise, la série géologique débute par le substratum, anté à synchro nappe qui constitue les promontoires qui dominent la ville d'Oran (Djebel Murdjadjo). Son âge s'échelonne du Jurassique moyen au Crétacé-Barrémien. (Fig. n° 10)

De bas en haut, on peut distinguer :

- des schistes et quartzites,
- des calcaires lités,
- des schistes et calcaires,
- des calcaires plus ou moins dolomitiques.



Fig. n° 10: Carte géologique du secteur d'étude (carte d'Oran au 1/50.000, d'Y. Gourinard, 1957).

- Le Miocène supérieur :

Dans le Djebel Murdjadjo, le substratum est surmonté par les formations du Miocène supérieur qui affleurent sur toute la zone comprise entre Oran et Boutlélis.

Ce sont des calcaires et des marno-calcaires avec, dans la partie inférieure de la série, des bancs de grès fins associés à des lits de marnes jaunes et quelques bancs de lumachelles.

Sous le plateau d'Oran, le Miocène supérieur constitue la formation la plus ancienne. Nulle part dans notre secteur sa base n'est visible. Il est représenté par des marnes grises ou verdâtres, litées.

Dans la coupe des falaises du port d'Oran (Fig. n° 11), levée au niveau du site de coordonnées Lambert X= 199.75, Y=273.35 - feuille d'Oran (G. Thomas, 1985), cette

formation se présente à la base de la série sous forme d'une série séquentielle à deux termes : marnes grises à bleues et bancs à tripoli.

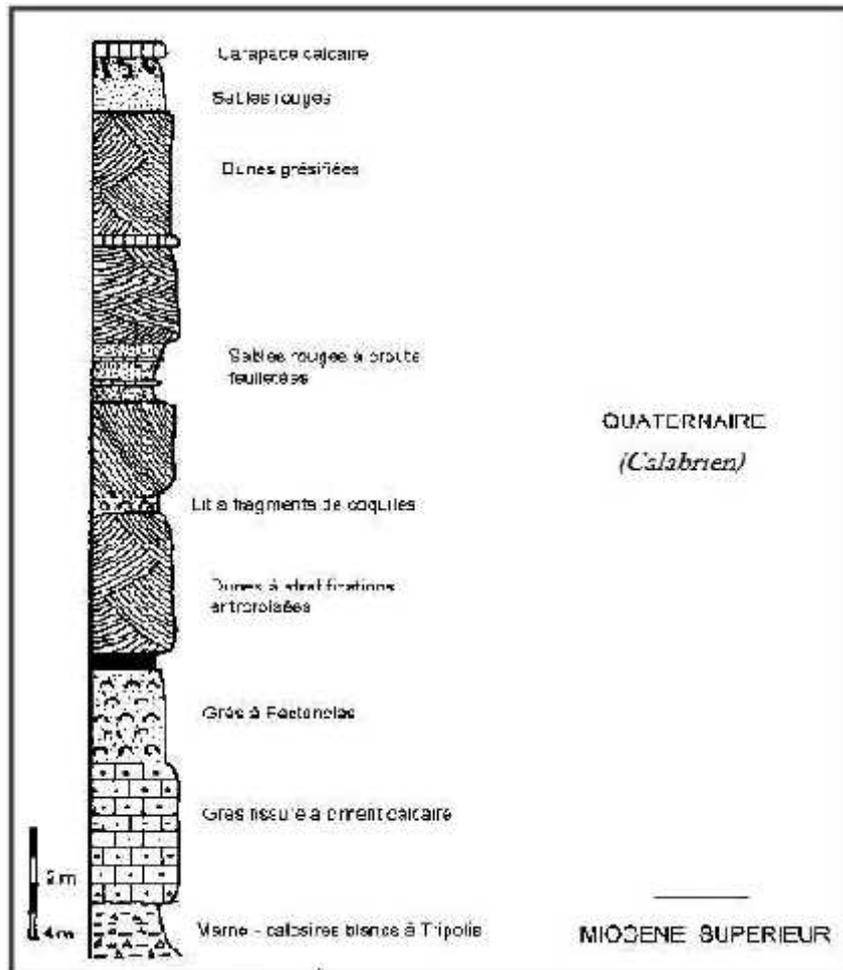


Fig. n° 11: Coupe géologique des falaises d'Oran (Thomas G, 1985).

- Les marnes grises sont très riches en débris coquilliers divers (Huîtres, Lamellibranches, etc.). Elles sont largement gréseuses.

- Les bancs de tripoli sont très finement lités et d'épaisseur variable.

La série se termine par une surface d'érosion.

- Dans les anciennes carrières de "Gambetta", les bancs de tripoli intercalés dans les marnes sont très épais (plusieurs mètres), latéralement leur épaisseur peut varier rapidement.

- Près du siège de la wilaya, un affleurement de dimension réduite permet de voir une alternance de marnes plus ou moins gréseuses et des bancs de tripoli marneux.

- A Ras El-Ain, des marnes gréseuses peuvent passer latéralement à des grès alternant avec des bancs de tripolis, ces marnes sont riches en débris coquilliers divers.

- Sur le flanc sud du Djebel Murdjadjo, les marnes gréseuses laissent rapidement leur place à des marnes à tripoli lorsqu'on s'éloigne vers la Sebkhha. L'âge de cette formation est donné par une faune marine (diatomées de Miocène supérieur).

- Le Calabrien grès-sableux (Plio-Pleistocène):

Le Pliocène inférieur et moyen qui affleure au sud d'El-Braya n'est pas représenté sous la partie nord du plateau d'Oran. En profondeur, sa limite longe la bordure nord de la grande Sebkhha. Son biseautage permet aux formations des grès tendres et des sables du Pléistocène inférieur (Calabrien) de reposer en discordance directement sur les formations du Miocène supérieur (voir annexe n° 05, photo n°01). Le contact est visible dans les affleurements des falaises du port d'Oran (figures 11 et 12). Ce contact est souligné par une ligne de sources, principalement la source de Cueva d'El Agua (*covalawa*) (X =193.3, Y = 262.8).

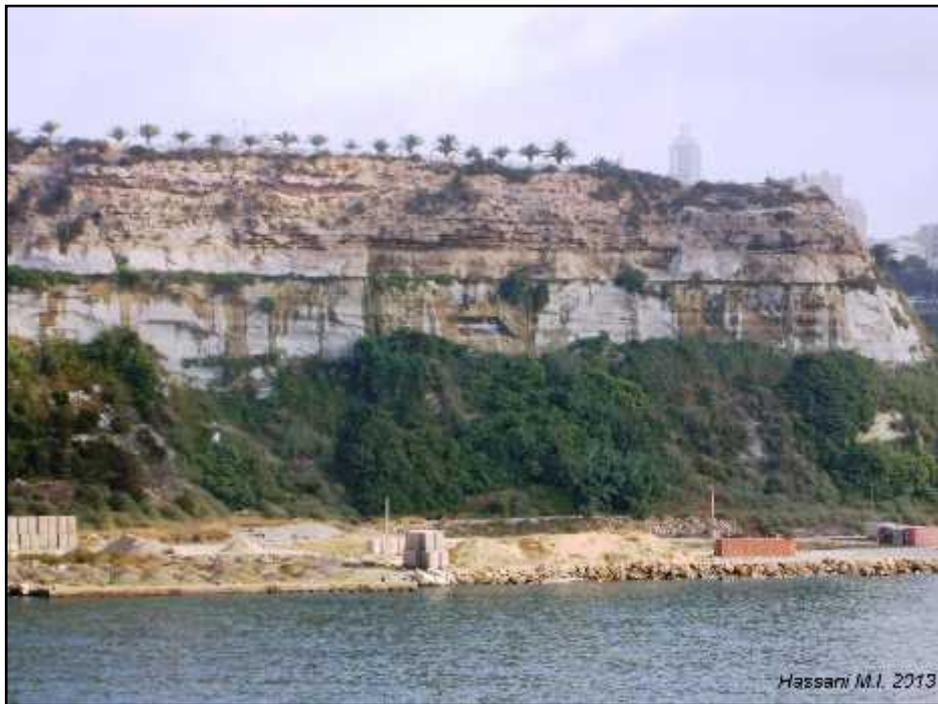


Fig. n° 12: vue photographique des falaises d'Oran montrant le dépôt des formations calabriennes sur les marnes blanches du Miocène supérieur.

La formation grès-sableuse du Calabrien affleure largement au nord-est de l'agglomération oranaise jusqu'à Canastel. Son épaisseur varie entre 15 et 25 m. Cet ensemble débute lumachellique ou conglomératique, il passe progressivement à des grès dunaires à stratification oblique et entrecroisée, souvent entrecoupés d'argile continentale. Les sables sont plus ou moins grésifiés et contiennent des débris organiques d'origine marine. La dissolution des éléments carbonatés a entraîné la formation d'argile rouge brique sableuse

qu'on rencontre dans la partie supérieure du Calabrien. Le tout est clôturé par une croûte calcaire à ciment rosé pouvant atteindre deux mètres d'épaisseur

Le Calabrien s'approfondit vers le sud où il se retrouve à plus de 30 m de profondeur au niveau de l'aéroport d'Es Sénia (figure n° 13)

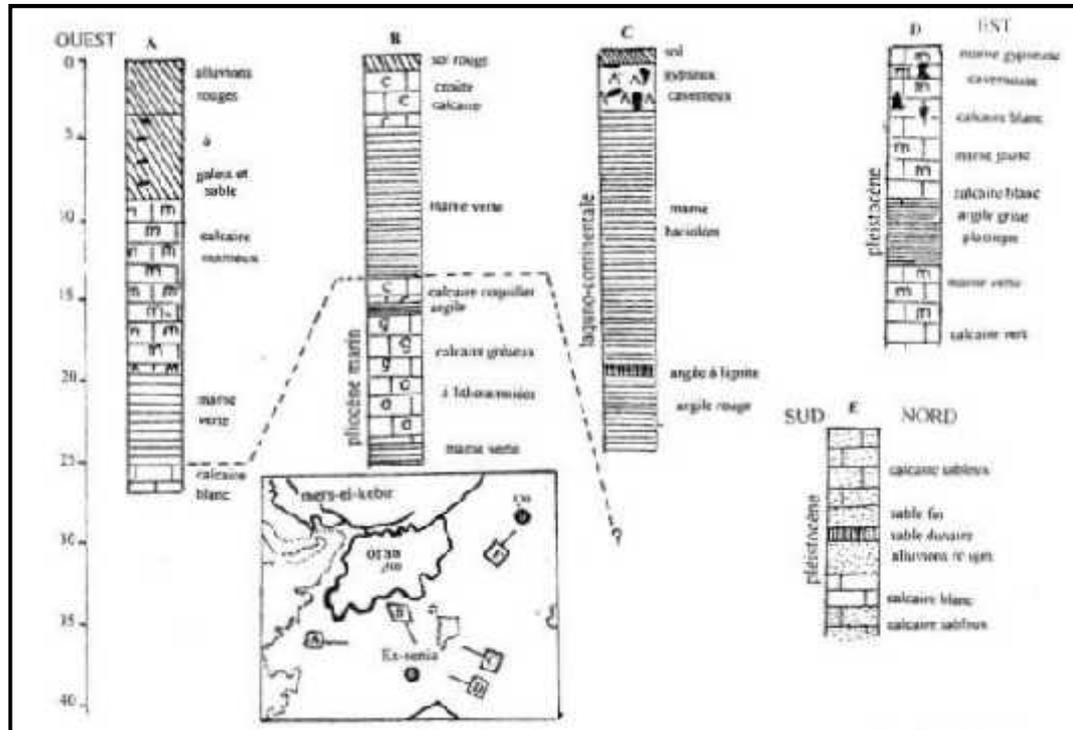


Fig. n° 13: Logs géologiques sous le plateau d'Oran (A. Joseph, 1979).

- Le Quaternaire récent (Pleisto-Holocène) :

La zone des piedmonts au sud-est du Djebel Murdjadjo, est constituée de terrasses et glacis d'accumulation formés de limons sableux ou argiles rubéfiés attribués au Pléistocène supérieur (G. Thomas, 1985).

La surface de Plateau est occupée, au nord, par des dépôts du Quaternaire, peu épais, constitués d'argiles rouges de décomposition du Calabrien, et des dépôts de ruissellement limino-sableux. Ces formations sont progressivement envahies vers le sud par des limons gris correspondant à des sols hydromorphes. Près de l'Aéroport, le sous sol est constitué de gypse pur à 95 %, là, l'épaisseur de cette formation atteint 30 m d'épaisseur.

4- Aperçu structural :

La tectonique de la région est contrôlée par des phases de cisaillement et de collision qui engendrent une tectonique polyphasée. Depuis le dépôt des formations post nappes, la compression est prédominante (G. Thomas, 1985).

Cette 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).

La partie sud du Plateau d'Oran correspond à une zone à tectonique assez calme, avec un léger pendage des formations vers le sud en direction de la Grande Sebkhia et de la Dayat Morselly.

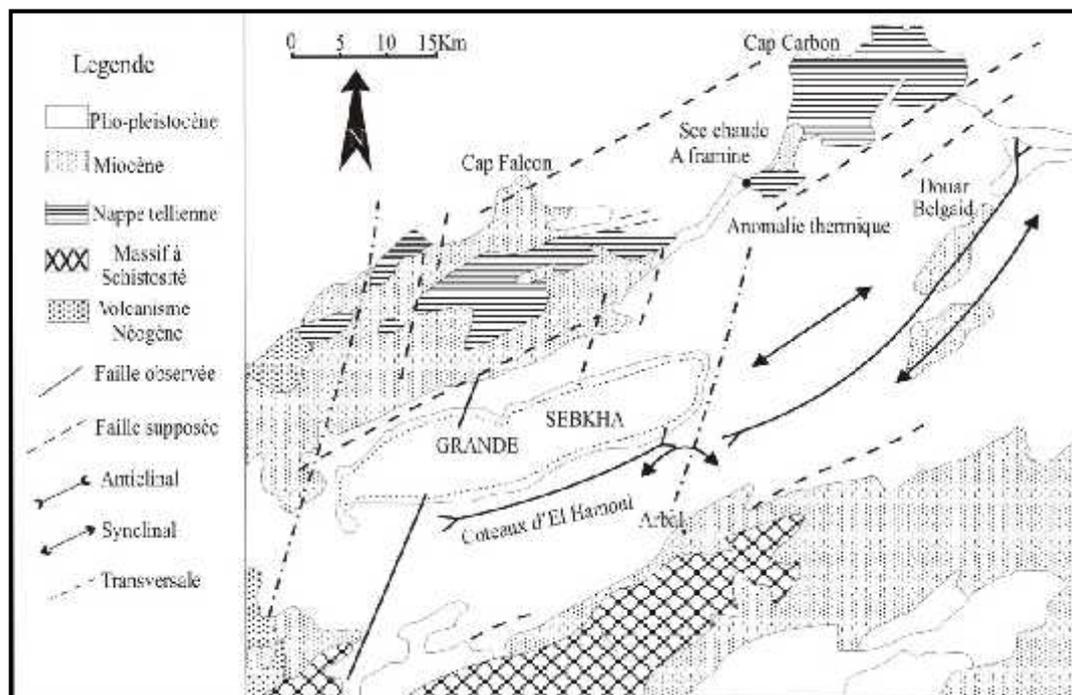


Fig. n° 14 : Esquisse structurale de l'Oranie centrale selon B. Fenet, 1975.

Ce prolongement n'est toutefois pas uniforme et peut s'inverser localement, créant des dépressions avec des points bas où l'eau de pluie s'accumule en saison humide.

Cela correspond à des ondulations tectoniques de très faible amplitude post Pléistocène, puisqu'elles affectent les couches de ce dernier étage.

La zone occidentale du plateau est formée par la bordure orientale de l'anticlinal du Djebel Murdjadjo. Le nord-est du plateau (zone de Bir El Djir), zone de collines, correspond à l'affleurement des grès des lumachelles du Calabrien.

Le sud-est du Plateau d'Oran correspond à une zone de collines occupées au centre par les formations gréseuses du Pliocène (zone au sud d'El Braya).

5- Hydrogéologie :

Les aspects lithostratigraphiques et structuraux des formations géologiques de la zone d'étude font ressortir les principaux systèmes aquifères présents :

- l'unité des formations carbonatées miocènes du Djebel Murdjadjo,
 - l'unité des grès et sables calabriens du plateau d'Oran (Plio-Pléistocène),
 - l'unité des colluvions et alluvions récentes et anciennes du Pléisto-Holocène
- (figures 15 et 16).

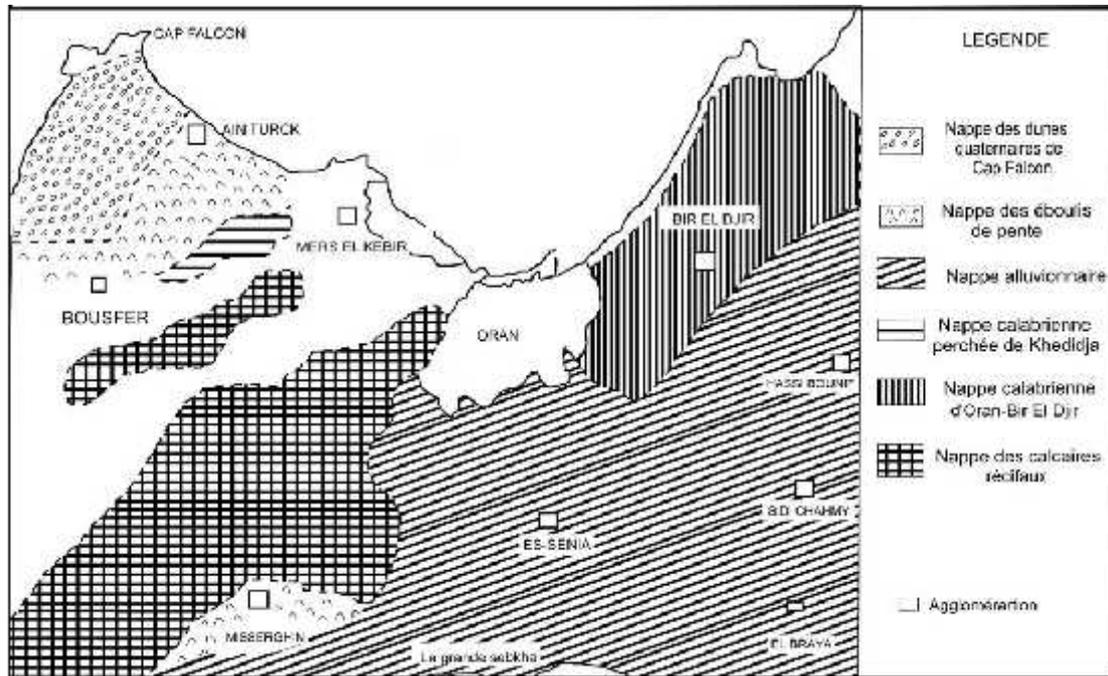


Fig. n° 15: Principaux aquifères du secteur d'étude (d'après A. Joseph, 1979).

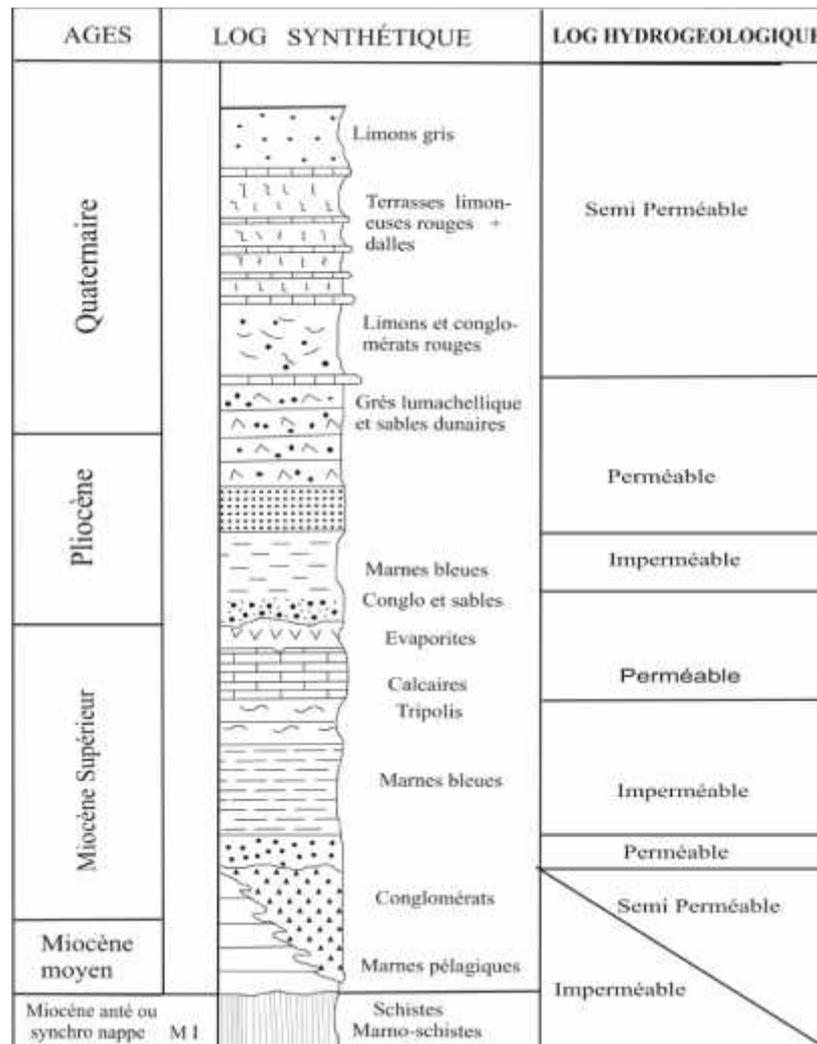


Fig. n° 16: Log hydrogéologique de la région d'Oran (Hassani M.I.,1987)

5-1- Description des principaux aquifères du secteur d'étude :

Sur le secteur d'étude, on distingue :

5-1-1- L'aquifère des calcaires récifaux du Djebel Murdjadjo :

Les calcaires récifaux du Miocène supérieur, appelés également "calcaires du Murdjadjo" constituent le principal réservoir d'eau souterraine de la région.

Cet aquifère, de type karstique, s'étend de Ras El Ain, à l'Est, jusqu'à Boutlelis, à l'Ouest. Il constitue un impluvium de 135 km² pour une épaisseur atteignant environ 100 m. Toutes les eaux de précipitation s'y infiltrent rapidement à la faveur des diaclases et parfois au niveau des pertes, ceci explique la relative aridité de la surface du karst (M.I. Hassani, 1987).

La fracturation et les phénomènes karstiques majeurs sont peu spectaculaires dans le Djebel Murdjadjo. Ceci est dû à l'âge relativement récent des calcaires messiniens qui n'ont été affectés que par les phases tectoniques post-nappes.

Cette tectonique s'exprime selon les directions principales : N10-20 E, N50-70 E et NW-SE (Hassani M. I, 1987). (Fig. n° 17).

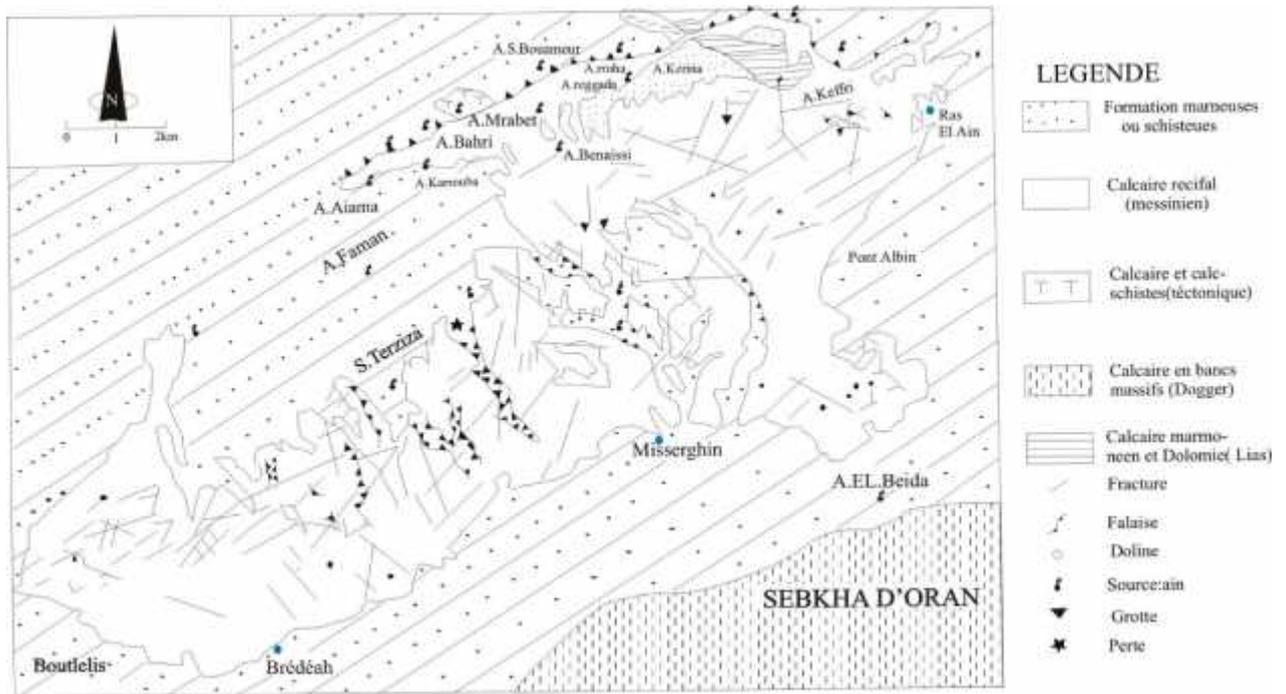


Fig. n° 17: Carte de localisation des sources et de la fracturation des calcaires messiniens du Djebel Murdjadjo d'après (Hassani M.I, 1987).

Les joints et les diaclases des niveaux calcaires ont été largement ouverts par dissolution.

L'écoulement des eaux souterraines au sein des massifs calcaires se fait selon les plans de fractures et à leur intersection. La détermination des directions préférentielles de la fracturation conditionne le drainage hydraulique de ces formations.

L'étanchéité des calcaires du Murdjadjo est assurée à la base par le substratum marneux et schisteux ou par les niveaux les moins perméables des marnes à tripoli.

Trois nappes peuvent être distinguées au sein de ce système aquifère : (fig. n° 18)

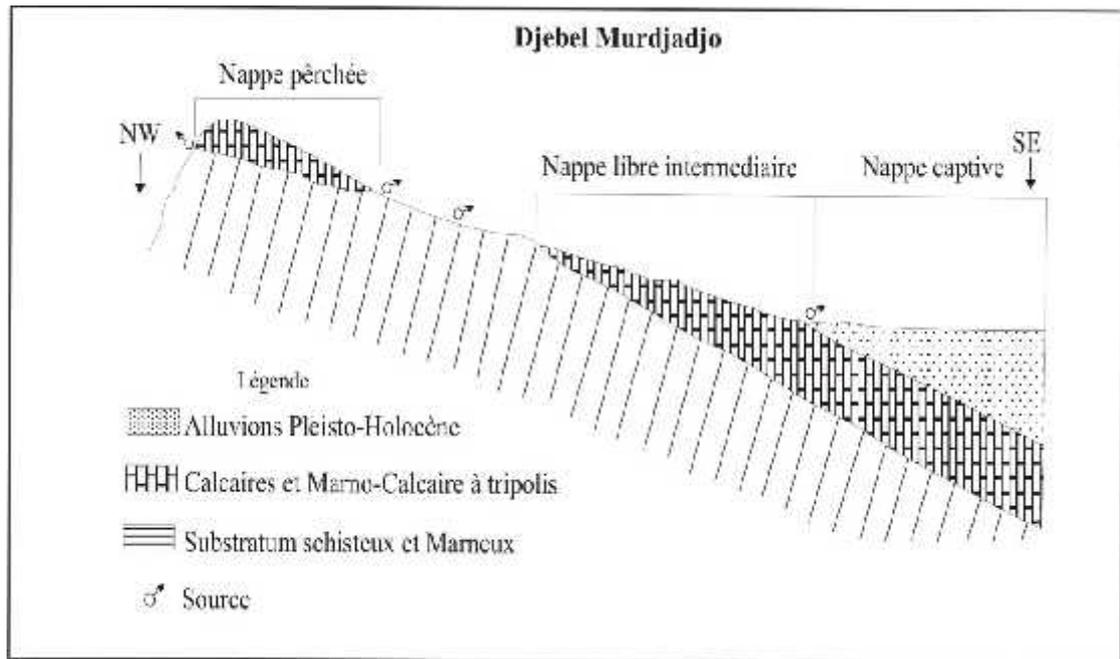


Fig. n° 18: Coupe hydrogéologique schématique du Djebel Murdjadjo (M. I. Hassani, 1987).

- **Une nappe perchée** : longeant une partie de la crête du Djebel. Elle repose directement sur un substratum schisteux. Cette nappe est drainée par deux lignes de sources orientées NE – SW. Une série de sources se déverse vers le nord en direction de la plaine de Bousfer, alors que la deuxième série se déverse vers le sud en direction de la plaine bordière de la Grande Sebka. Les débits d'écoulement de ces sources sont faibles du fait de la faible extension de leur bassin d'alimentation.

- **Une nappe libre intermédiaire** : cette nappe est contenue dans l'aquifère calcaire qui repose, au nord, directement sur les schistes du Jurassique et du Crétacé et plus en aval, par l'intermédiaire des marno-calcaires, à tripoli, sur des marnes jaunes puis les marnes bleues du Miocène.

Son alimentation se fait par les précipitations directes et par l'infiltration d'une partie de l'écoulement de surface amont. La nappe est drainée par plusieurs exutoires situés à la base des calcaires au contact des marnes à tripoli, parmi les plus importants:

- Les anciennes sources de Brédeah à l'extrémité occidentale de l'aquifère,
- les sources de l'Oued Misserghin localisées en amont de l'agglomération de même nom.

- La source de Ras El-Ain (X= 196.13, Y= 271.23) : elle est située à l'extrémité orientale du Murdjadjo. Elle émerge au contact des calcaires, des marno-calcaires et des marnes jaunes au passage de l'accident qui sépare le horst du Djebel

Murdjadjo du plateau d'Oran. Elle est captée par une galerie drainante. Son débit actuel est estimé à 6000 m³/j,

L'observation de la fracturation du Djebel Murdjadjo permet d'expliquer l'importance relative du débit de la source de Ras El Ain par rapport à son bassin versant hydrologique. Toute une série d'accidents (fig. 18), orientés globalement SW-NE, convergent vers la zone de la source (Hassani. M. I, 1987).

La source de Ras El Ain, de par sa situation au sein de l'agglomération urbaine, est très vulnérable à la pollution organique et autres pollutions. Les calcaires à la perméabilité de fissures et de chenaux n'assurent aucune filtration des éléments polluants.

En amont du ravin de Ras El Ain, à partir du quartier des Amandiers en direction de l'ouest, l'aquifère des calcaires alimente par drainance latérale la nappe des alluvions. Dans cette zone s'étendant jusqu'à El Hassi (Pont Albin), l'aquifère est exploité par d'innombrables forages et puits (puits des Amandiers, de Coca, etc.)

- **Une nappe captive** : en aval, à la ligne de rupture de pente du Djebel Murdjadjo, les calcaires passent sous les colluvions et alluvions plio-quaternaires beaucoup moins perméables. L'aquifère devient de ce fait semi-captif à captif. Les forages indiquent que les calcaires restent fissurés sur une assez grande profondeur et la perméabilité de fissure reste prépondérante. L'alimentation de cette nappe se fait par apports latéraux à partir des affleurements et partiellement par drainance à partir des eaux relativement minéralisées de la nappe plio-quaternaire sus-jacente. Les deux aquifères constituent un système unique.

5-1-2- L'aquifère du Calabrien :

Cet aquifère s'étend en profondeur sous l'agglomération oranaise essentiellement à la partie nord-est de notre secteur. Il s'étend jusqu'à la zone piémont du Djebel Khar (secteur de Belgaid). Il est constitué par un complexe dunaire consolidé de porosité d'interstices reposant sur le substratum imperméable des marnes à tripolis du Miocène supérieur.

Il présente une épaisseur qui atteint les 45 m au niveau des falaises côtières et au ravin blanc. Il renferme une nappe libre alimentée au nord par son impluvium et drainée vers le nord par la ligne de sources qui émergent au contact des marnes à tripolis tout le long des falaises côtières (fig. 12). La source de Cueva d'El Agua qui se déverse vers la mer est la plus importante de ces sources.

Vers le sud, l'écoulement souterrain se fait sous les formations alluvionnaires, en direction de la Dayet Morselly. La nappe devient légèrement semi-captive sous ce recouvrement argileux : puits des Abattoirs, INESMO, etc.

5-1-3- L'aquifère des alluvions plio-quaternaires :

L'aquifère du remplissage plio-quaternaire s'étend au sud et au sud-ouest des affleurements calabriens.

Dans les zones piémont du Sud-Est du Djebel Murdjadjo (zone d'El Hassi), il est constitué d'alluvions rouges à galets calcaires et nodules de schistes, plus anciennes ; caractérisées par une pente relativement légère ; suffisamment perméables.

Dans les zones plus basses du plateau, il est constitué d'alluvions récentes, essentiellement argilo-limoneuses, provenant de dépôts fluviaux et éoliens. Elles sont caractérisées par un pendage relativement faible.

L'aquifère plio-quaternaire renferme une nappe d'eau peu profonde. Son alimentation se fait essentiellement par :

- son impluvium,
- les eaux provenant par drainance latérale des calcaires du Djebel Murdjadjo ou des formations du complexe dunaire calabrien,
- l'infiltration du ruissellement de surface dévalant en période de crue du Djebel Murdjadjo (Oued Chaabane, etc.).

La nappe est très exploitée, par forages et puits, pour des usages agricoles et industriels. C'est le cas dans la zone industrielle d'Es Sénia.

Des mesures du coefficient de perméabilité réalisées par essai Lefranc sur des sondages de reconnaissance du plateau d'Oran et des Hassis (Sogreah, 1984) ont abouti aux résultats suivants :

Quaternaire

Argiles à gravier ou à horizon sableux ou gypseuse.....	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 tuffeux.....	9,4. 10^{-5} m/s

"Calabrien"

Argiles sableuses et gréseuses.....	$6,6 \cdot 10^{-6}$ m/s
Sables argileux.....	$1,1 \cdot 10^{-5}$ à $7 \cdot 10^{-4}$ m/s
Argiles et calcaires.....	$1,1 \cdot 10^{-4}$ m/s

5-2- Piézométrie du secteur d'étude :

Une carte en courbes hydro isohypses, recouvrant tout le secteur d'étude (Sogreah/ AGEP, 1997) indique l'extension sous notre secteur d'étude d'une nappe de type radiale à profil hyperbolique. (fig. n° 19).

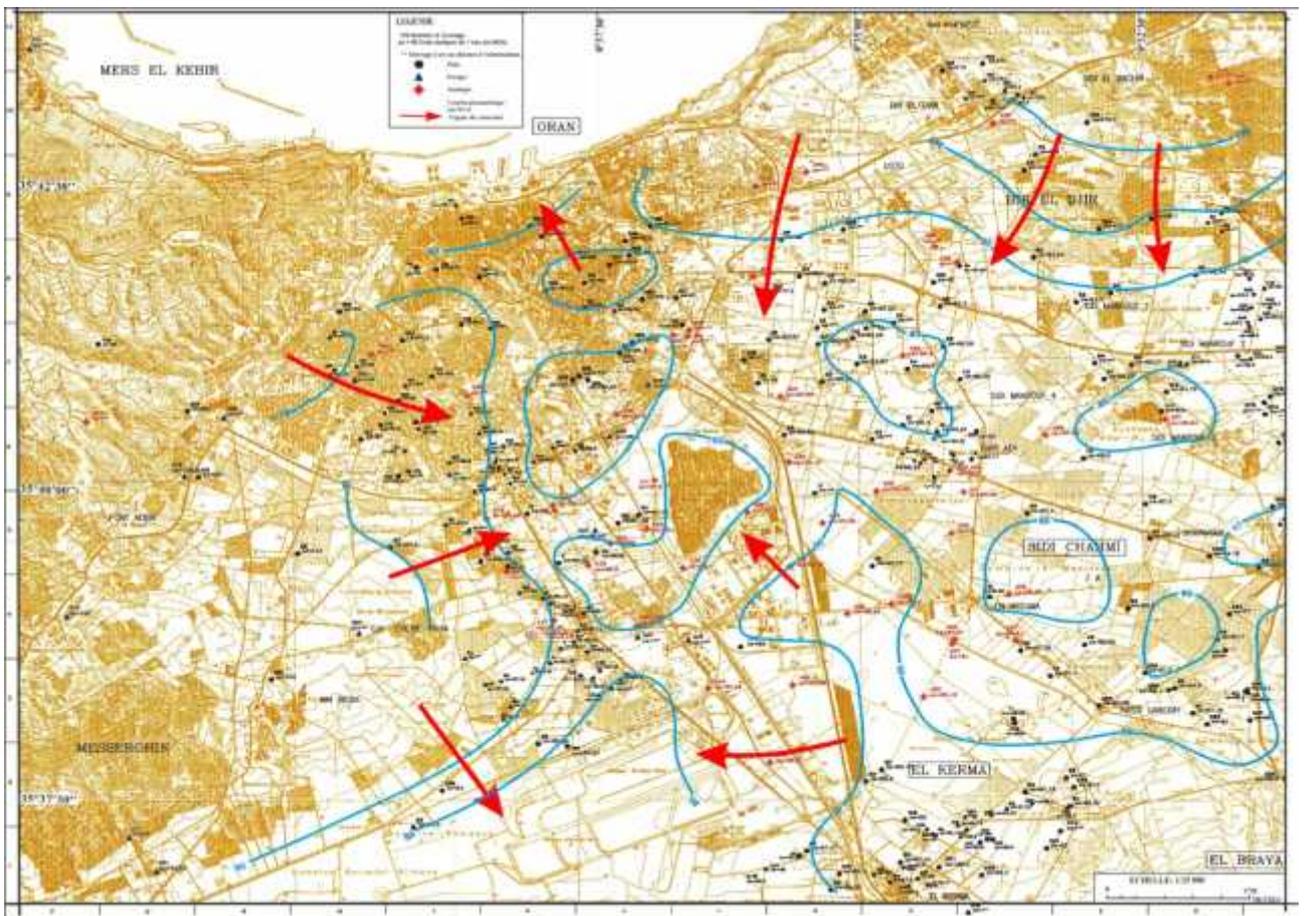


Fig. n° 19 : Carte piézométrique du secteur d'étude (d'après Sogreah, 1997).

Il y apparait que l'essentiel des directions d'écoulement convergent vers un secteur central en demi-cercle qui s'étend entre l'aéroport d'Oran, Dayat Morcelly, "St Remy", Sidi Maarouf, Sidi Chahmi et Nedjma. Les nombreuses dayas situées dans ce secteur représentent de fait les exutoires passés et présents de cette nappe.

Les principales directions d'écoulement proviennent des zones se situant :

- au Nord-Est : zone d'affleurement des formations calabriennes du secteur Bir El Djir-Sidi El Bachir,
- à l'Est : zone des reliefs situés entre Hassi Bounif et El Braya,
- au Sud-Est: zone des collines situées entre El Kerma et El Braya
- à l'Ouest : zone d'affleurement des calcaires miocènes du flanc sud-est du Djebel Murdjadjo.

Il est également à signaler l'existence dans la partie nord du secteur d'une direction d'écoulement vers le N-NW en direction du port d'Oran (front de mer).

6-Contexte urbain de la zone d'étude

Dans cette partie, on s'intéressera en particulier à l'activité industrielle et au réseau d'assainissement qui sont des sources potentielles de pollution de la nappe libre s'étendant sous l'agglomération oranaise.

Telle que définie par le PDAU (Plan de Développement Urbain, 1996), cette dernière inclue la ville d'Oran dont la limite est constituée par le troisième boulevard périphérique, Pont-Albin au Sud-Ouest, la zone des instituts au Sud-Est et Bir El Djir-Canastel, à l'Est.

L'agglomération d'Es-sénia et sa zone industrielle sont incluses dans ce grand ensemble urbain où on distingue différents modes d'occupation du sol à s'avoir (fig. n° 20) :

- Les zones d'habitat.
- Les zones industrielles ou d'activités.
- Les équipements (comprenant les équipements centraux, etc.)

La superficie des diverses agglomérations est donnée au tableau n° 9

Tableau n° 9: Représentation des agglomérations de la zone d'étude.

		Superficie urbaine (ha)
AGGLOMERATION ORANAISE .	Ville d'Oran (S.S)	3500
	Port	230
	USTO	460
	Sidi Bachir	173
	Belgaid	73
	Bir El Djir	176
	Canastel	58
	Reste zone Est	643
	Pont albin	156
Total		Env.: 7137

(Sogreah, Agep 1997)

6-1 - La population :

Oran est l'une des agglomérations à la croissance démographique la plus rapide en Algérie. Cette explosion démographique est due, entre autres, à l'effet migratoire des habitants des villes intérieures vers les villes côtières.

Les données du recensement de 1995 sont de 657 300 habitants pour la commune d'Oran et 30 200 habitants pour la commune d'Es-sénia.

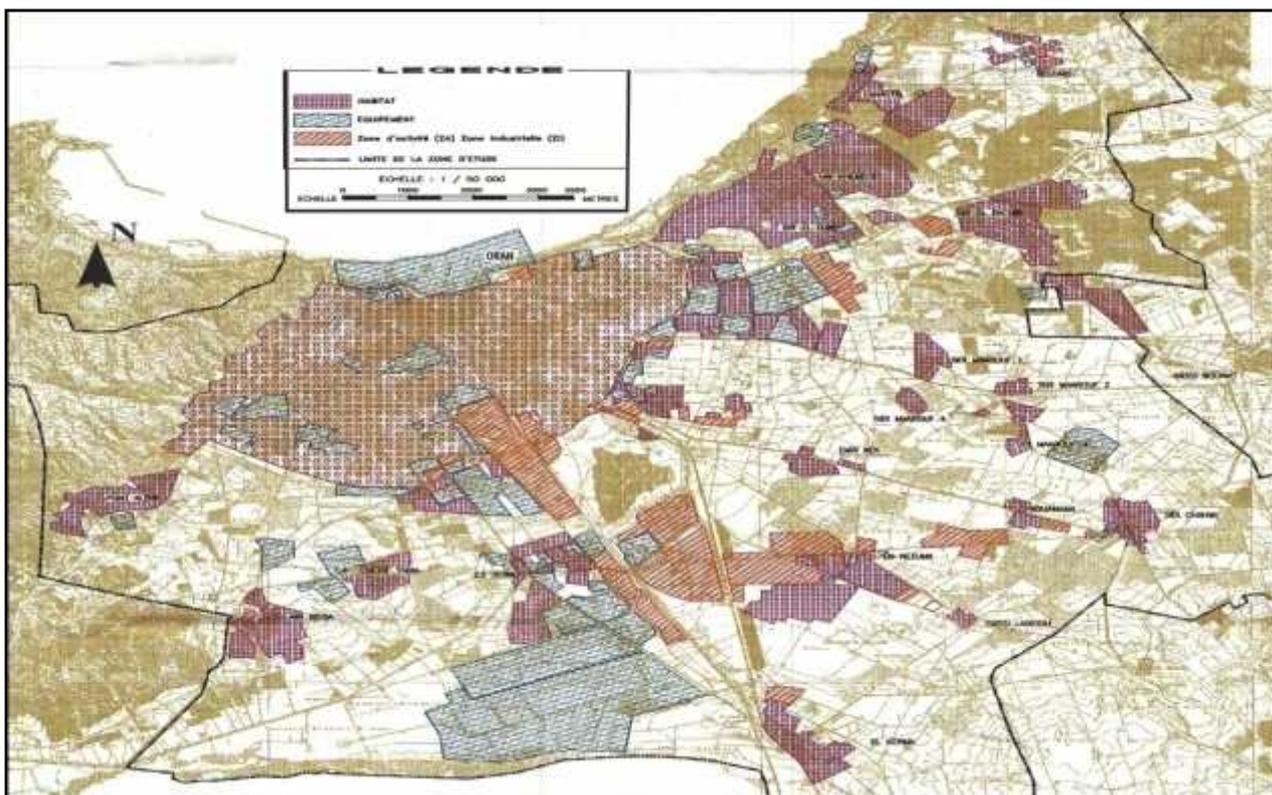


Fig. n° 20: Schéma d'urbanisation de l'agglomération oranaise (d'après Sogreah, Agep1997).

6- 2 - Présentation du secteur industriel :

Les principaux établissements industriels sont pour la plupart implantés à Oran et Es-sénia. Ils se situent en majorité dans les zones industrielles comme le montre la carte de la figure n° 21.

Tableau n° 10 : Localisation des principaux établissements industriels.

Ville ou commune	Nombre	Pourcentage (%)	CONSOMMATION TOTALE	
			m ³ /j	Pourcentage (%)
Oran	109	67	3644	69
Es-sénia	47	29	1557	30

(d'après Sogreah, Agep 1997)

Le nombre des établissements industriels s'élève à 162 dont les trois quart implantés à Oran et Es-sénia.

Tableau n° 11: Types d'industries

NOMBRE			CONSOMMATION EN EAU	
Types d'industries	Nombre	Pourcentage (%)	(m ³ /j)	Pourcentage (%)
Alimentaires	35	22	3088	59
Chimiques	25	15	89	2
Métallurgiques	8	5	88	2
Papetières	4	2	23	0,4
Textiles	24	15	652	12
Diverses	51	31	1072	20
Indéterminés	15	9	262	5

(d'après Sogreah, Agep 1997)

Il faut souligner que les industries alimentaires sont les plus consommatrices d'eau.

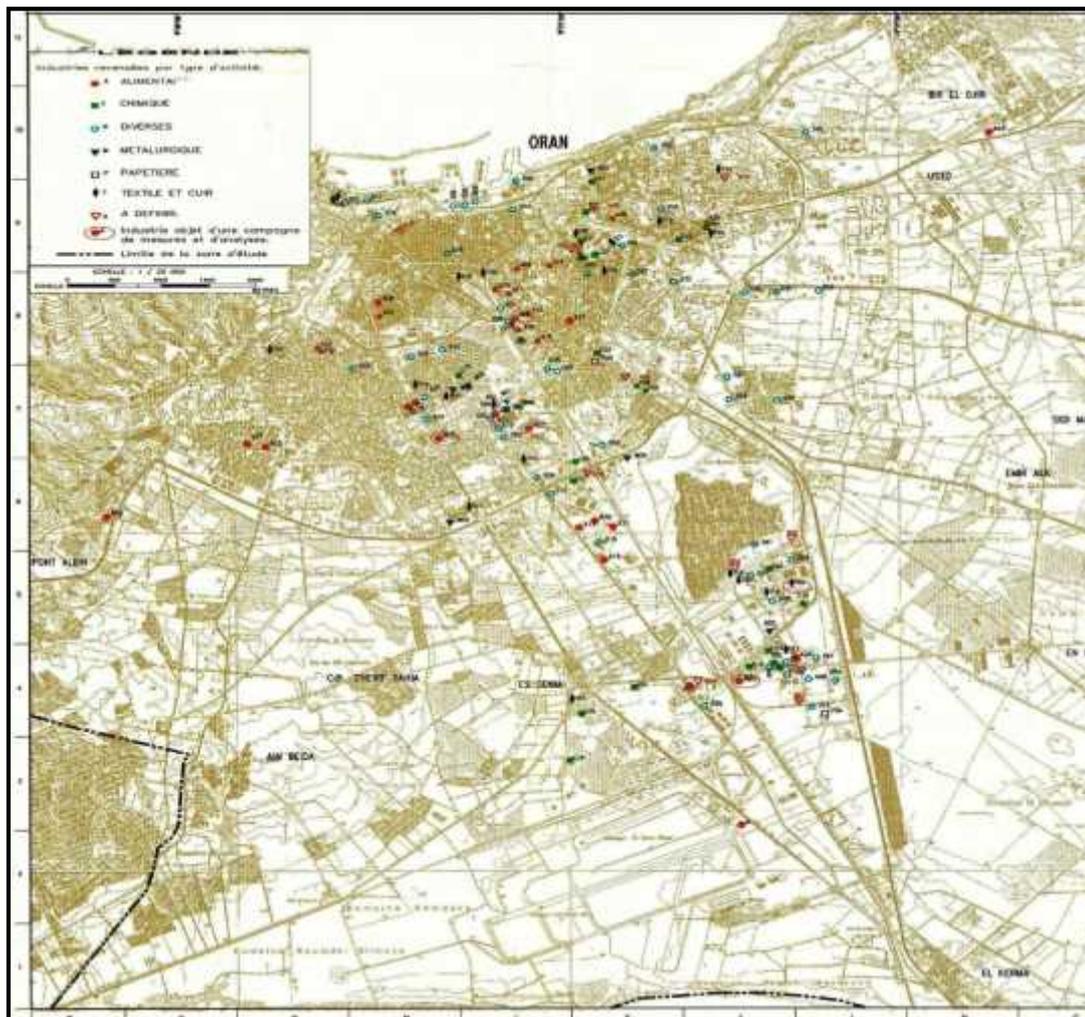


Fig. n° 21: Industries recensées par type d'activité dans le groupement urbain d'Oran (d'après Sogreah, Agep1997).

6-3 - Le réseau d'assainissement de la ville d'Oran (P.D.A.U 1984) :

Avant la mise en service de la station d'épuration d'El Kerma, le réseau des eaux usées de la ville d'Oran était configuré en cinq secteurs géographiques correspondant à des réseaux hydrauliquement indépendants :

1- Le réseau du secteur Nord-Ouest collecte les eaux d'une partie de la ville centrée sur le ravin de Ras El-Ain. Les eaux sont rejetées en mer, au niveau de fort Lamoune.

2- Le réseau du secteur Nord-Centre collecte les eaux du centre de la ville et les rejette en mer à l'est de l'entrée du port, sous "Cueva Del-Agua".

3- Le secteur Nord-Est collecte les eaux de la partie de la ville englobant les hauteurs de Gambetta et les environs du Ravin Blanc. Les eaux sont rejetées en mer au même point que les eaux issues du secteur Nord-Centre.

4- Le réseau du secteur Sud-Est collecte les eaux des quartiers situés au sud de la route nationale n° 4 et à l'est de la voie ferrée Oran-Alger. Les eaux sont conduites à la cheminée du petit lac.

5- Le secteur Sud du groupement urbain d'Oran étant dépourvu de tout exutoire naturel (en dehors de Dayat Morselly aux capacités épuratrices nulles), il a été décidé, dans les années quarante, la création d'une galerie passant sous la ville et débouchant en mer. Son origine est la cheminée de Petit Lac, puits vertical de plus de 50 m de profondeur où sont conduits les rejets du secteur Sud-Est et Sud-Ouest de la ville d'Oran.

Le réseau d'assainissement de la ville d'Oran est en quasi-totalité unitaire. Seules des extensions récentes ont été effectuées en séparatif.

Dans la partie sud de la ville d'Oran où l'urbanisation est plus faible et les pentes naturelles moins marquées, le réseau unitaire avait été maintenu. Cette conception était dictée par l'absence d'exutoire naturel nécessaire à la décharge des eaux pluviales. L'exutoire artificiel que constitue la cheminée et la galerie du Petit Lac a ainsi été réalisé. La totalité des eaux pluviales y a été conduite. Pour des raisons économiques, eaux usées et eaux pluviales ont transité par le même réseau unitaire.

Depuis sa mise en service, la station d'épuration d'El Kerma reçoit la majorité des eaux du réseau d'assainissement du groupement d'Oran.

6-4- Charges hydrauliques et polluants d'origine domestique et collective :

A titre indicatif, le tableau n° 12 indique les charges hydrauliques et de pollution en eaux usées pour la ville d'Oran et la commune d'Es-sénia.

Les résultats sont estimés à partir des données sur la population et des résultats anciens du P.D.A. (1984).

Tableau n° 12: Charges hydrauliques et polluants d'origines domestique et collective (d'après Sogreah, Agep 1997).

Agglomération	Population en 1995	Rejet (m ³ /1)	DBO5 (kg/J)	MES (kg/j)
Ville d'Oran	657300	105168	35494	39438
Commune d'Es-sénia	30200	4832	1631	1812

7-Conclusion :

La zone faisant l'objet de cette étude est située dans la partie N-W du plateau d'Oran, caractérisé par un climat semi-aride.

Les principales formations géologiques sont : le substratum anté à synchro nappe, affleurant dans le Djebel Murdjadjo, le Djebel Khar et dans les Monts d'Arzew et le remplissage (couverture) post-nappe, avec une forte extension dans les zones basses du domaine.

La nappe phréatique s'étendant sous l'agglomération d'Oran est essentiellement de nature libre. Elle est de type radiale à écoulement divergent au sud et convergent au nord. Au nord, deux directions d'écoulement convergent, l'une en provenance du Nord-Ouest alimentée par les calcaires récifaux du Djebel Murdjadjo, l'autre provient du Nord-Est (plateau d'Oran) à partir des zones d'affleurement des formations du complexe dunaire calabrien. Au Sud de l'agglomération, elle passe latéralement dans les niveaux alluvionnaires. Sa zone naturelle de drainage est constituée par la Dayet Morcelly où l'eau est reprise par évaporation.

Au niveau de l'agglomération, l'activité industrielle, éparse ou concentrée, ainsi que l'étendue et la configuration du réseau d'assainissement constituent des sources réelles et potentielles de pollution de la nappe libre.

Chapitre II

Contexte hydrochimique

Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines de l'agglomération oranaise

1 - Introduction et présentation du cadre de l'étude :

L'hydrogéochimie a pour but la connaissance des caractéristiques chimiques ou physico-chimiques des eaux souterraines, des processus de leur acquisition et des lois qui régissent les échanges entre l'eau, le sol et le sous sol. Les eaux souterraines représentent une phase aqueuse dont la composition peut être très complexe étant donné son grand pouvoir dissolvant. La plupart des eaux qui circulent en lessivant les terrains ne conservent en fait qu'une minéralisation réduite et qui varie en fonction du contexte géologique et du climat. La composition chimique d'une eau souterraine est fonction d'un certain nombre de phénomènes telles que la concentration, l'hydratation, l'oxydation, etc. Dans ce qui suit, nous présenterons les principales caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du secteur afin de confirmer leurs origines, définir leurs faciès chimiques et de comparer et suivre leurs évolutions dans l'espace. L'étude des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la zone étudiée s'est basée sur l'échantillonnage et l'analyse des eaux de quatorze (14) de points d'eau (fig. n° 22). En dehors des eaux échantillonnées au niveau des sources de Ras El Ain et de Cueva d'El Agua, les points d'échantillonnage correspondent à des puits situés au sein de l'agglomération. Les coordonnées géographiques de ces points d'eau figurent en annexe 1. Les prélèvements ont été effectués par nous même au cours d'une seule campagne d'échantillonnage réalisée en date du 25 octobre 2011 L'analyse des eaux échantillonnées a concerné aussi bien, les éléments chimiques majeurs que les éléments chimiques indicateurs de pollution (phosphates, nitrates, etc.). Les analyses ont été effectuées au niveau du Laboratoire de Chimie de la Direction Régionale Ouest de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H.). Les principaux résultats sont portés au tableau n° 13.

2- Caractères organoleptiques :

2-1- 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.

D'après l'O.M.S., la valeur de 10 (10 mg/l de Pt) est considérée comme un chiffre qu'il est souhaitable de ne pas dépasser dans le cas des eaux potables. La valeur de 15 unités est admise comme limite supérieure acceptable (annexe n° 02)

Selon les résultats obtenus de l'analyse, les eaux de différents points d'eau sont dans l'ensemble incolores (valeurs non portées dans le tableau n° 13).

Tableau n° 13: Présentation des résultats de l'analyse physico-chimique des points d'eau prélevés (25-10-2011).

N°	Eléments chimiques Points d'eau	pH	T C°	Cond. µs/cm	RS	Ca ⁺² mg/l	Mg ⁺² mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻² mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l
1	Puits "Mayouche"	7.24	21.6	1276	1200	98	53	120	5	191	127	67	362
2	Puits "Aroussi"	7.59	21.7	416	400	59	23	23	1	48	42	10	232
3	Puits "Moulgada"	7.35	21.7	3230	3060	228	154	308	4	940	180	89	334
4	Puits des "Amandiers"	7.57	22.3	1340	940	123	67	253	6	143	97	80	317
5	Puits "Krachai"	7.24	20.7	3110	2660	200	73	460	7	872	192	68	376
6	Puits "Yaghmorassen"	7.04	22.6	2860	2100	176	98	317	5	757	181	74	266
7	Source "Ras El Ain"	7.34	22.5	1490	1320	94	70	235	8	349	131	71	336
8	Puits "Inesmo"	7.29	21.7	3140	2440	123	98	520	8	763	338	66	519
9	Puits "Mediouni"	7.49	23.7	3380	2840	126	88	662	28	682	487	94	690
10	Puits "Petit Lac"	7.52	22.7	2880	2440	138	93	460	17	443	591	151	464
11	Puits "HLM"	7.15	22.9	1812	1640	134	54	251	7	259	260	34	553
12	Puits "Saint Eugène"	7.38	22.6	1612	2040	149	138	420	22	625	305	72	498
13	Puits "Saint Pierre"	7.62	23.8	2840	2220	207	198	345	24	539	408	61	461
14	Source "Cueva Del Agua"	7.18	21.4	1832	1640	118	66	272	14	239	373	74	396

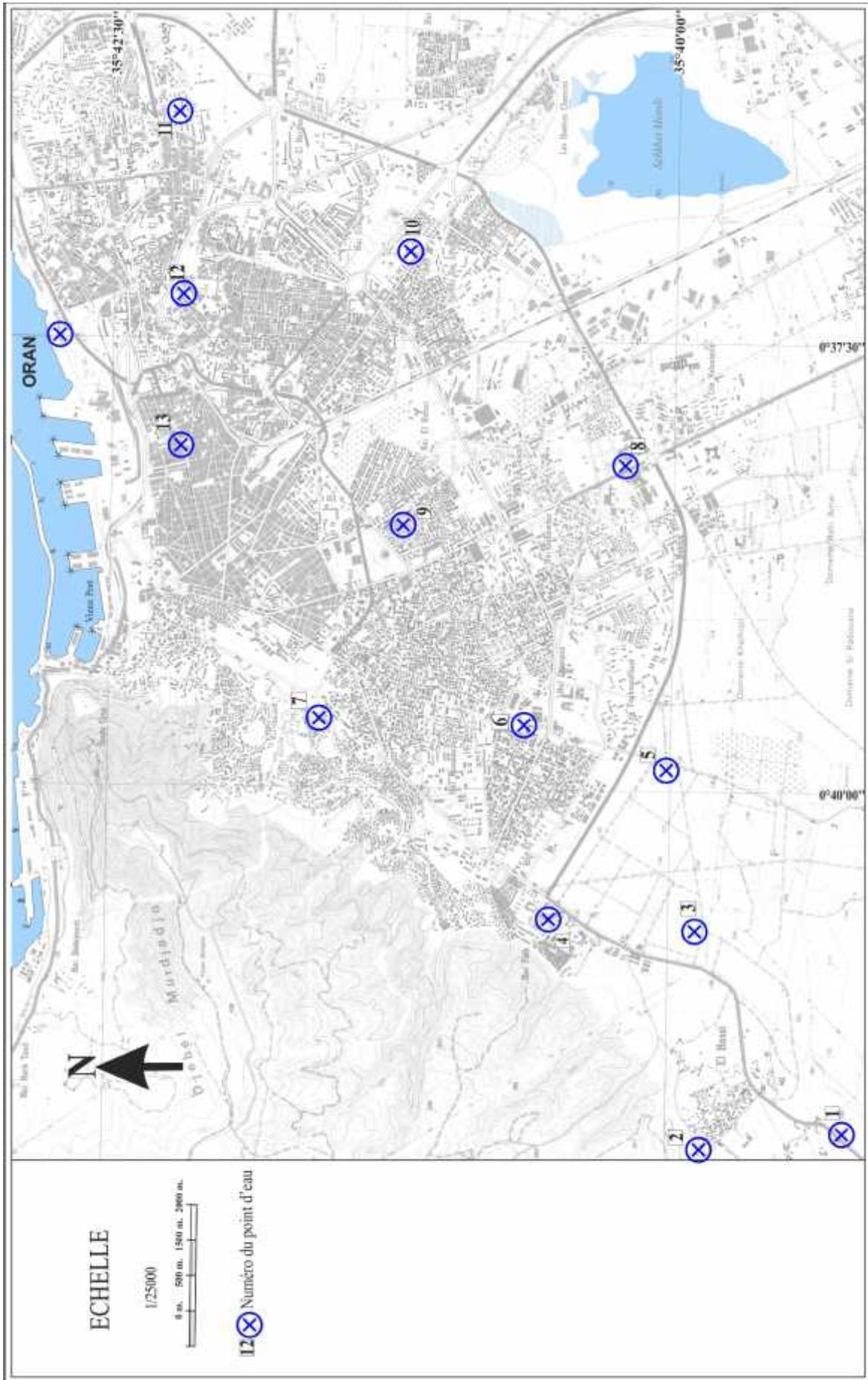


Fig. n° 22 : Localisation des points des prélèvements.

2-2- L'odeur :

Une eau potable doit être sans odeur, non seulement au moment du prélèvement, mais encore après période de 10 jours en vase clos à la température de 26 C °. Les odeurs proviennent, soit des produits chimiques, soit de matières organiques en décomposition, soit de protozoaires, soit d'organismes aquatiques.

Dans notre secteur d'étude, toutes les eaux prélevées ne présentent pas d'odeur.

2-3- La turbidité :

La turbidité d'une eau est due à la présence de matières en suspension finement divisées. L'O.M.S. indique comme valeur limite 5 unités NTU (*nephelometric turbidity unit*) et précise que dans le cas où l'on pratique la désinfection, il convient que la turbidité soit inférieure à 1 NTU.

Les eaux échantillonnées dans notre secteur d'étude ont présenté des valeurs comprises entre 1 et 2 NTU.

3- Etude des paramètres physiques :**3-1- Le pH :**

Le pH d'une eau représente son acidité ou son alcalinité, et à l'exception de rejets industriels particuliers, il est rare que le pH soit une contre indication à la potabilité.

Le PH des eaux naturelles est lié à la nature géologique des terrains traversés.

Les eaux évoluant en milieu carbonaté ont un pH élevé, alors que celles provenant de terrains pauvres en calcaires ou siliceux ont un pH voisin de 7 et quelques fois un peu inférieur (environ 6).

Le pH représente l'état de l'équilibre carbonique. Le CO₂ 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.

Selon la teneur en calcium et en magnésium, le pH remonte au fur et à mesure de la neutralisation du CO₂ par l'une ou l'autre base.

Pour nos eaux échantillonnées, le pH varie de 7.04 à 7.62.

3-2- La température :

La température naturelle joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et surtout des gaz ; elle 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 indices de la pollution thermique.

Pratiquement, la température de l'eau n'a pas d'incidence directe sur la santé de l'homme. Cependant une température supérieure à 15 °C favorise le développement des micro-organismes pathogènes en même temps qu'elle peut intensifier la fermentation qui agit comme pollution additionnelle diminuant la teneur en "oxygène dissous".

Les variations brusques et soudaines de la température d'une eau doivent inciter à une enquête sérieuse pour vérifier si un mélange s'est produit avec des eaux d'autres origines.

Pour les eaux du secteur étudié, lors des prélèvements, la température a varié entre 20.7 °C et 23.8 °C.

3-3- La conductivité :

La conductivité d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm², séparées l'une de l'autre de 1 cm. Elle est l'inverse de la résistivité électrique.

La mesure de ce paramètre permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation globale et d'en suivre l'évolution. Donc la conductivité d'une eau naturelle est fonction de la teneur en sels électrolytables dissous.

En ce qui concerne les eaux étudiées, on constate que la valeur de la conductivité varie de 416 µs/cm au puits n° 5 (Aroussi) à 3380 µs/cm au puits n° 9 (Mediouni).

3-4- Le résidu sec :

Le résidu sec représente la minéralisation totale de l'eau, c'est-à-dire la totalité des sels dissous et les matières organiques contenus dans l'eau. Ses valeurs peuvent être recoupées à partir de la mesure de la conductivité.

Les résultats de mesure sont influencés par la température et la durée de la dessiccation.

Pour des raisons de saveur, l'O.M.S. recommande une valeur limite de 1000 mg/l dans l'eau destinée à la consommation humaine (annexes n°03). Dans les pays à climat semi aride et aride cette valeur est souvent largement dépassée.

Dans notre secteur d'étude, d'après la carte d'iso-résidu sec, la valeur minimum de résidu sec est constatée au niveau du puits n° 2, 416 mg/l, situé dans la zone d'affleurement des calcaires messiniens. Huit cents (800) mètres plus en aval, un maximum de 3060 mg/l est enregistré au puits n° 3 (fig. n° 23). Cette forte valeur au niveau de ce dernier puits s'explique par le passage des eaux souterraines dans les niveaux alluviaux du Plio-Quaternaire.

Sur l'ensemble du secteur, l'évolution du résidu sec est conforme aux grandes directions de drainage souterrain. Soit, selon une direction NW-SE dans la partie occidentale de l'agglomération. Dans la partie Nord-Ouest, cette évolution se fait selon la direction NE-SW, de la zone d'affleurement du complexe dunaire vers la région centrée autour de la Dayat Morcelly.

3-5- La dureté :

La dureté d'une eau est un caractère naturel lié au lessivage des terrains traversés et correspond à la teneur en calcium et en magnésium.

On peut considérer qu'une eau ayant une dureté inférieure à 15 °F (1°F = 4 mg de Ca ou 2.4 mg de Mg) par litre est une eau douce et qu'au dessus de 30°F, il s'agit d'une eau dure ou plus chargée en calcaire. Une eau trop dure constitue un risque important d'entartrage des canalisations.

Au niveau de notre secteur d'étude, la valeur de la dureté varie de 24°F au puits n° 2 à 120°F au puits n° 3. (valeurs non présentées dans le tableau 13)

Cette dureté relativement élevée résulte principalement de la provenance et circulation des eaux dans les formations carbonatées messiniennes ainsi que de l'influence notable des encroutements calcaires couronnant le complexe dunaire.

3-6- 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.

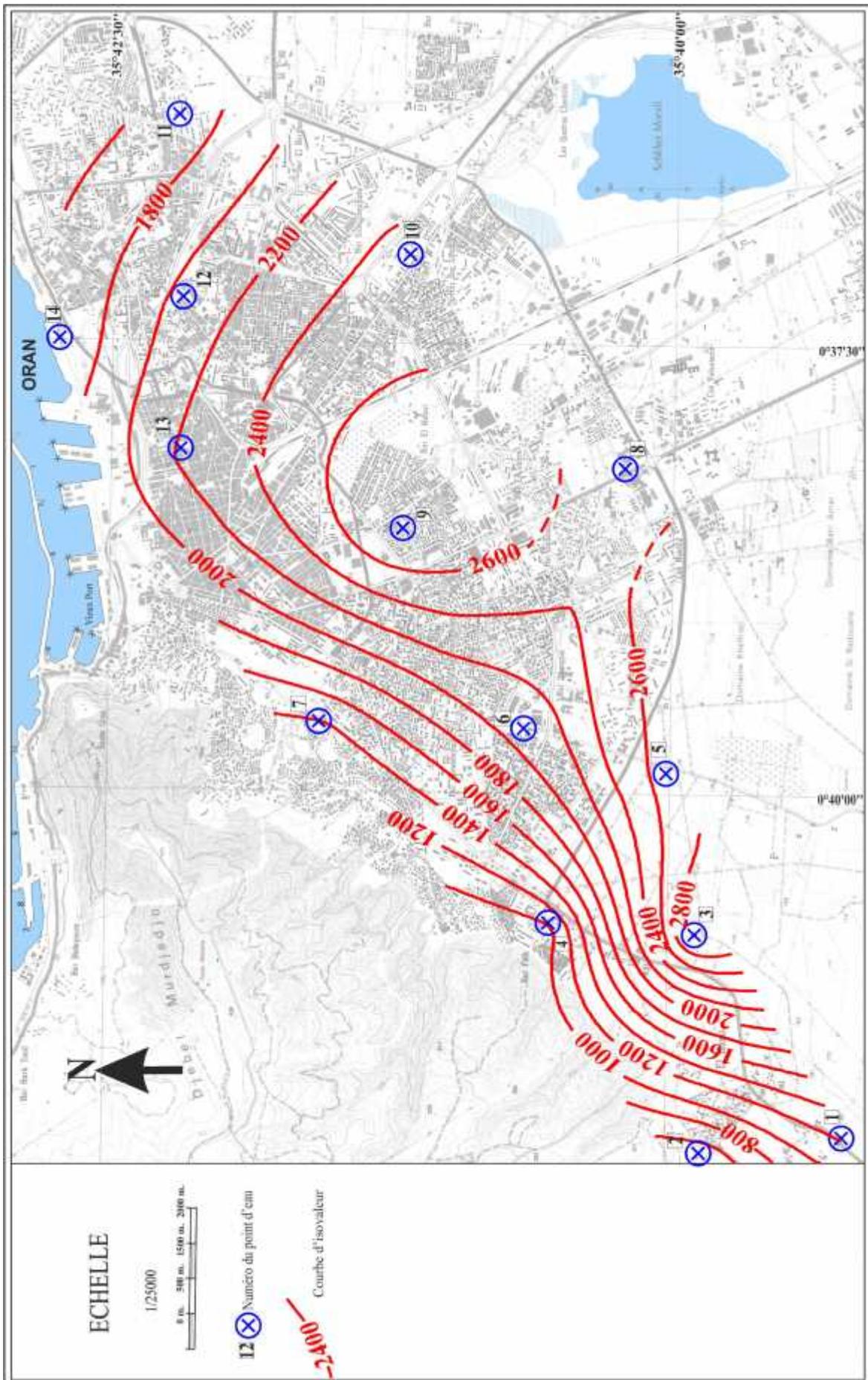


Fig. n° 23 : Carte en courbes isoteneur de résidu sec (mg/l), (25/10/2011).

Pour les eaux étudiées, le TA est égal à zéro du fait que le pH ne dépasse pas 8.3. Le TAC varie de 19° F au puits n° 2 à 57° F au puits n° 9 (Mediouni).

4- Etude des paramètres chimiques majeurs :

4-1-La balance ionique :

Le contrôle de la qualité des analyses chimiques est assuré par la balance ionique qui permet de comparer la somme des cations et la somme des anions. Le calcul de la balance ionique est donné par la formule suivante :

$$e \% = \frac{r \text{ cations} - r \text{ anions}}{r \text{ cations} + r \text{ anions}} \times 100$$

e% étant le pourcentage d'erreur.

On peut considérer une analyse comme :

- très bonne si $e\% < 2$;
- acceptable si $2 < e\% < 5$;
- mauvaise si $e\% > 5$.

Les valeurs du pourcentage d'erreur pour chaque échantillon d'eau prélevé sont portées sur le tableau n° 14.

Tableau n° 14: Pourcentage d'erreur des analyses d'eaux du secteur d'étude.

points d'eaux	r anions	r cations	e%	L'analyse
1	15,04	14,6	2%	Acceptable
2	6,19	5,86	3%	Acceptable
3	37,17	37,55	1%	Très bonne
4	12,54	22,81	5.02%	Mauvaise
5	35,85	36,17	0.3%	Très bonne
6	30,67	30,76	0.4%	Très bonne
7	19,29	20,88	4%	Acceptable
8	38,13	37,03	1%	Très bonne
9	42,2	43,04	1%	Très bonne
10	34,84	34,98	0%	Très bonne
11	22,33	22,23	0%	Très bonne
12	33,3	37,62	6%	Mauvaise
13	32,24	42,24	3%	Acceptable
14	22,19	23,51	3%	Acceptable

4-2- Principaux cations et anions :

L'analyse chimique a concerné les cations : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ et les anions : Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{-2} , NO_3^- (tableau n°13).

4-2-1- Le calcium :

Une eau potable de bonne qualité renferme de 100 à 400 mg/l de calcium. Les eaux qui dépassent une teneur de 200 mg/l de calcium présentent de sérieux inconvénients pour les usages domestiques et pour l'alimentation des chaudières.

La carte en courbes isoteneur de calcium (fig. n° 24) montre que la valeur minimale est représentée au puits n° 2 (59 mg/l). Le calcium s'accroît vers le S-W pour atteindre un maximum de 228 mg/l au niveau du puits n° 3. Ceci semble se corréliser avec l'augmentation de la minéralisation. L'augmentation de ce paramètre au niveau du puits n° 13 (St Pierre) reste inexplicée.

4-2-2- Le magnésium :

Il provient de la décomposition de dolomie (carbonate de magnésium), notamment à partir des formations carbonatées du flanc sud du Djebel Murdjadjo. Le magnésium varie de 23 mg/l au S-W (puits n° 2) à 154 mg/l au niveau de puits n° 3 (fig. n° 25). Le puits n° 13 se distingue à nouveau par une valeur élevée, soit 198 mg/l.

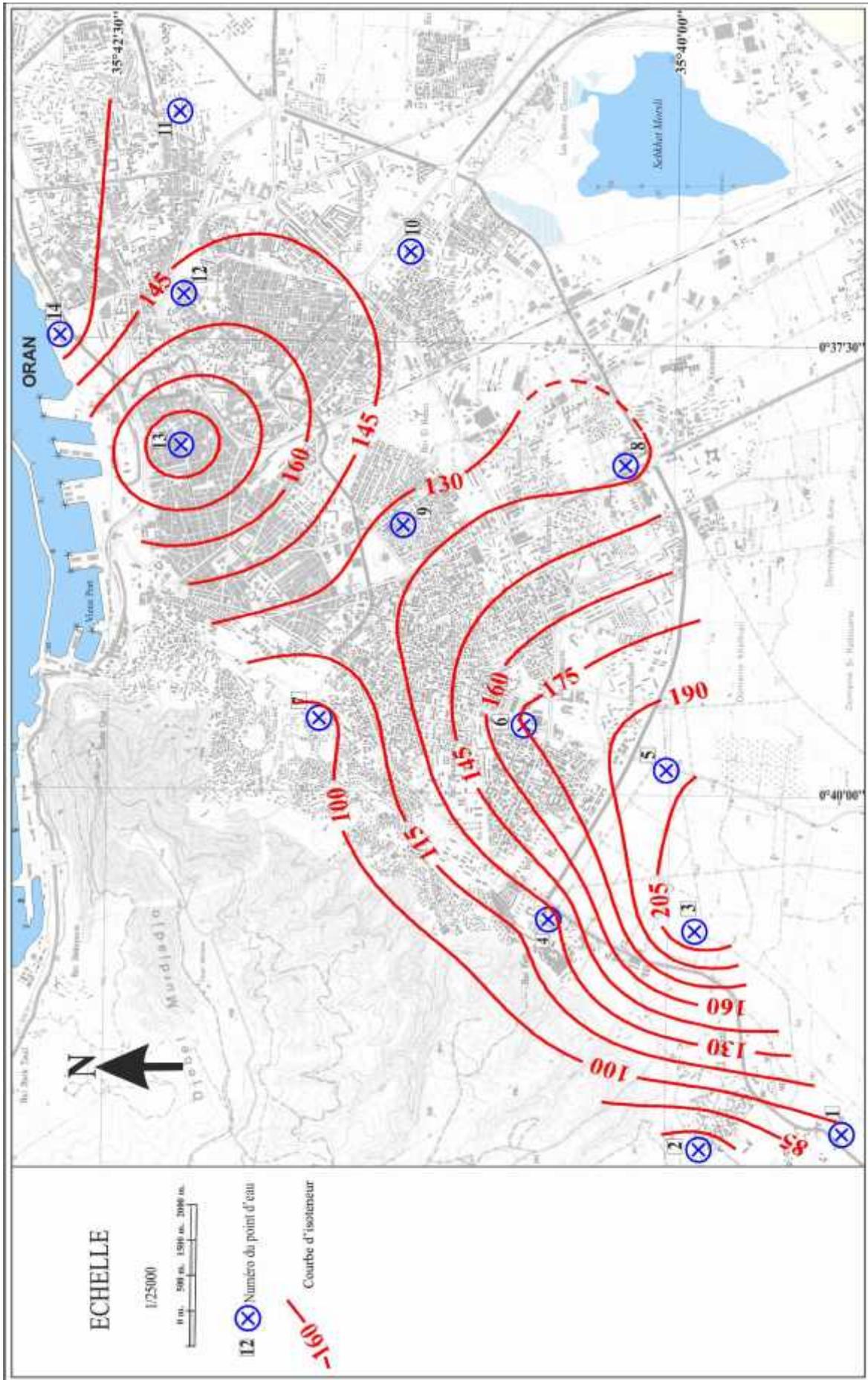


Fig. n° 24 : Carte en courbes isoteneur de calcium (mg/l).

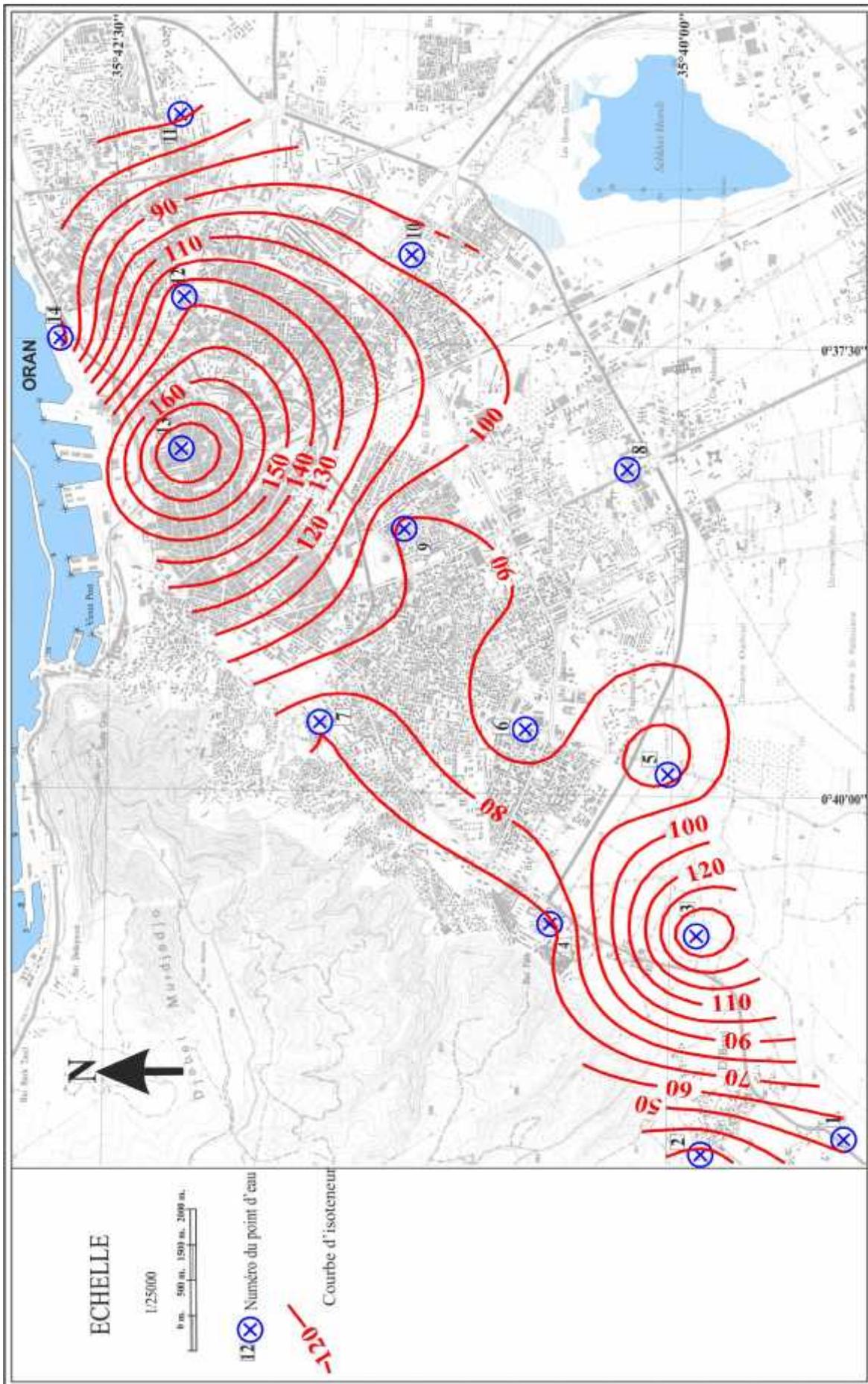


Fig. n° 25: Carte en courbes isoteneur de magnésium

4-2-3- Le sodium et le potassium :

Le sodium provient généralement de la même origine que celle des chlorures. Il est généralement lié aux minéraux argileux. Il peut être échangé contre les ions Ca^{++} et Mg^{++} par les minéraux argileux ou les substances organiques et provenir de l'hydrolyse des silicates. L'évaporation des eaux est également un facteur majorant.

La carte en courbes isoteneur de Na+K (fig. n° 26) est fortement similaire à celle des résidus secs (fig. n° 23).

4-2-4- Les bicarbonates :

Les ions HCO_3^- prennent naissance à partir de la dissolution des carbonates par le CO_2 des eaux de pluie et de percolation, selon l'équation chimique :



Sur la carte en courbes isoteneur de bicarbonates du secteur d'étude (fig. n° 27), on retrouve les grandes évolutions précédentes avec un minimum de 232 mg/l au puits n° 2, et un maximum de 690 mg/l au puits n° 9 (Mediouni). Les points d'eau n° 6 et n° 10 se comportent néanmoins de façon particulière.

4-2-5- Les chlorures :

Naturellement, les chlorures peuvent avoir deux origines : les apports atmosphériques et la dissolution des évaporites salées. Les eaux de pluie peuvent également apporter des chlorures d'origine maritime qui s'accumulent en surface puis entraînés dans les aquifères. La dissolution de certaines catégories d'évaporites est facile et peut fournir de grandes concentrations dans les eaux.

L'observation de la carte en courbes isoteneur de chlorures (fig. n° 28) indique que leur concentration évolue en direction de la partie Sud/Sud-Ouest de la l'agglomération : 872 mg/l au point d'eau n° 5 et 940 mg/l au point d'eau n° 3.

4-2-6- Les sulfates :

Les sulfates peuvent avoir une origine météorique. Ils peuvent également provenir de l'activité agricole ou biologique naturelle, ou bien des usages domestiques (détergents) ou de la présence d'évaporites (gypse) dans le milieu naturel.

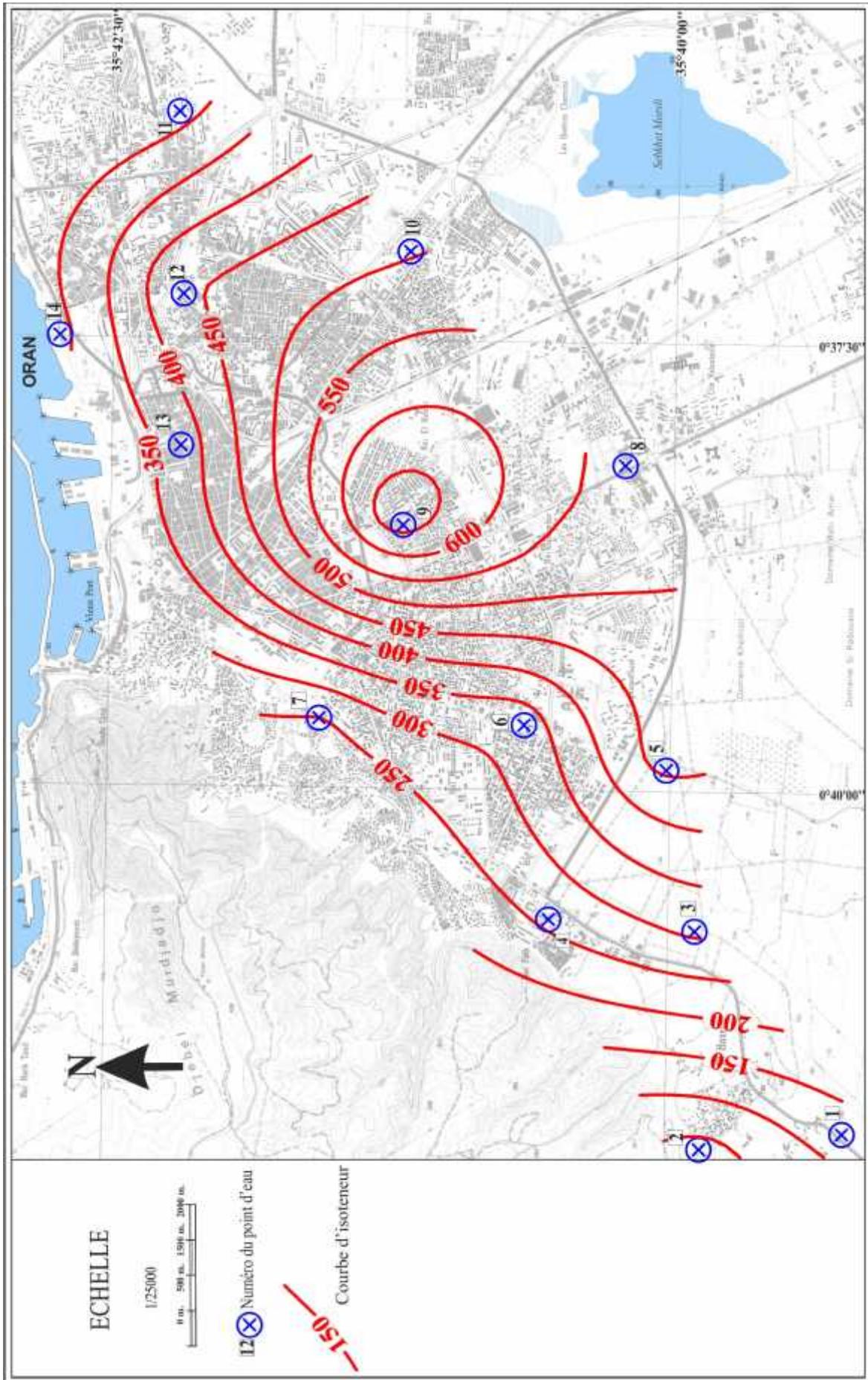


Fig. n° 26: Carte en courbes isoteneur de Na + k (mg/L).

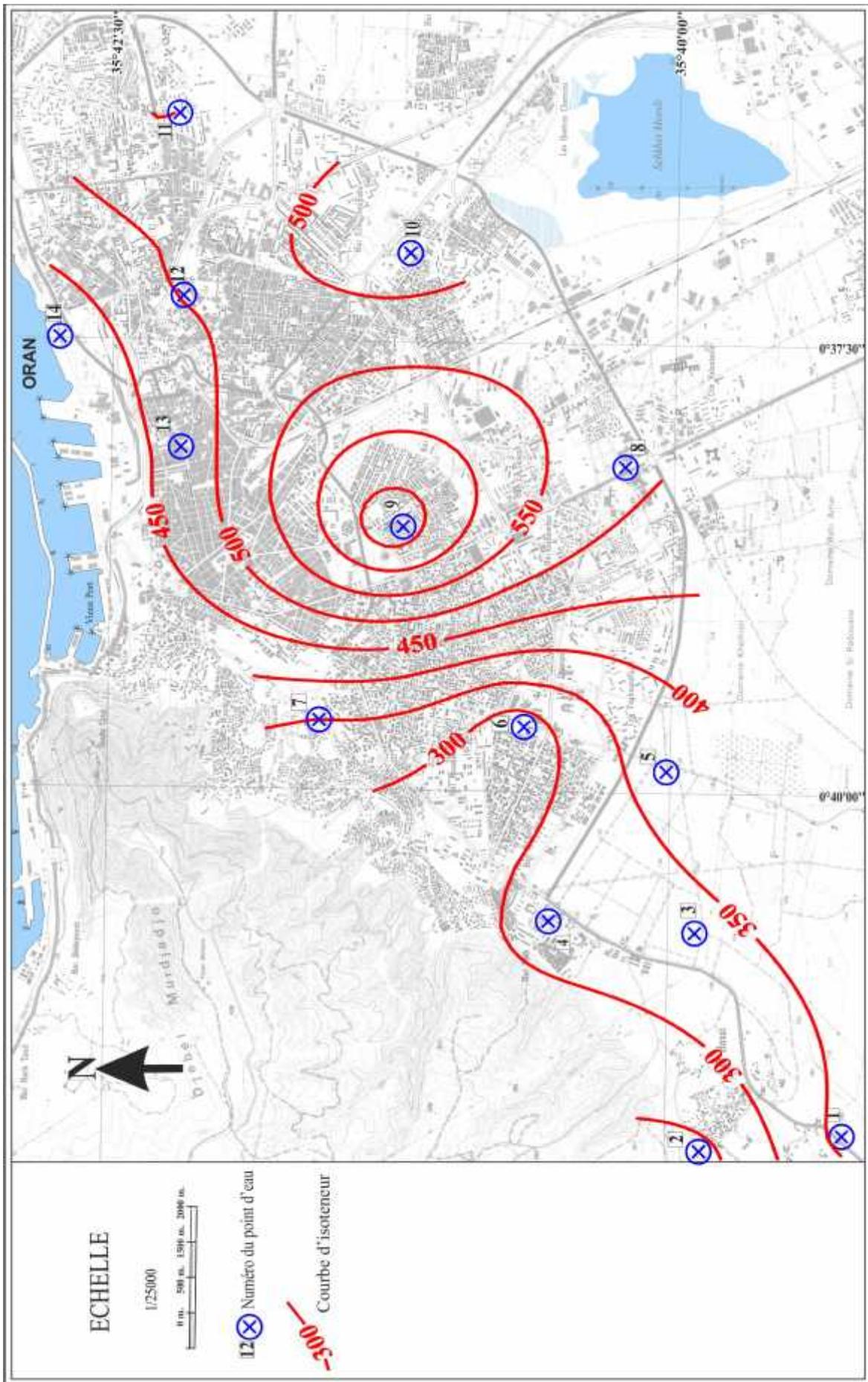


Fig. n° 27: Carte en courbes isoteneur de bicarbonates

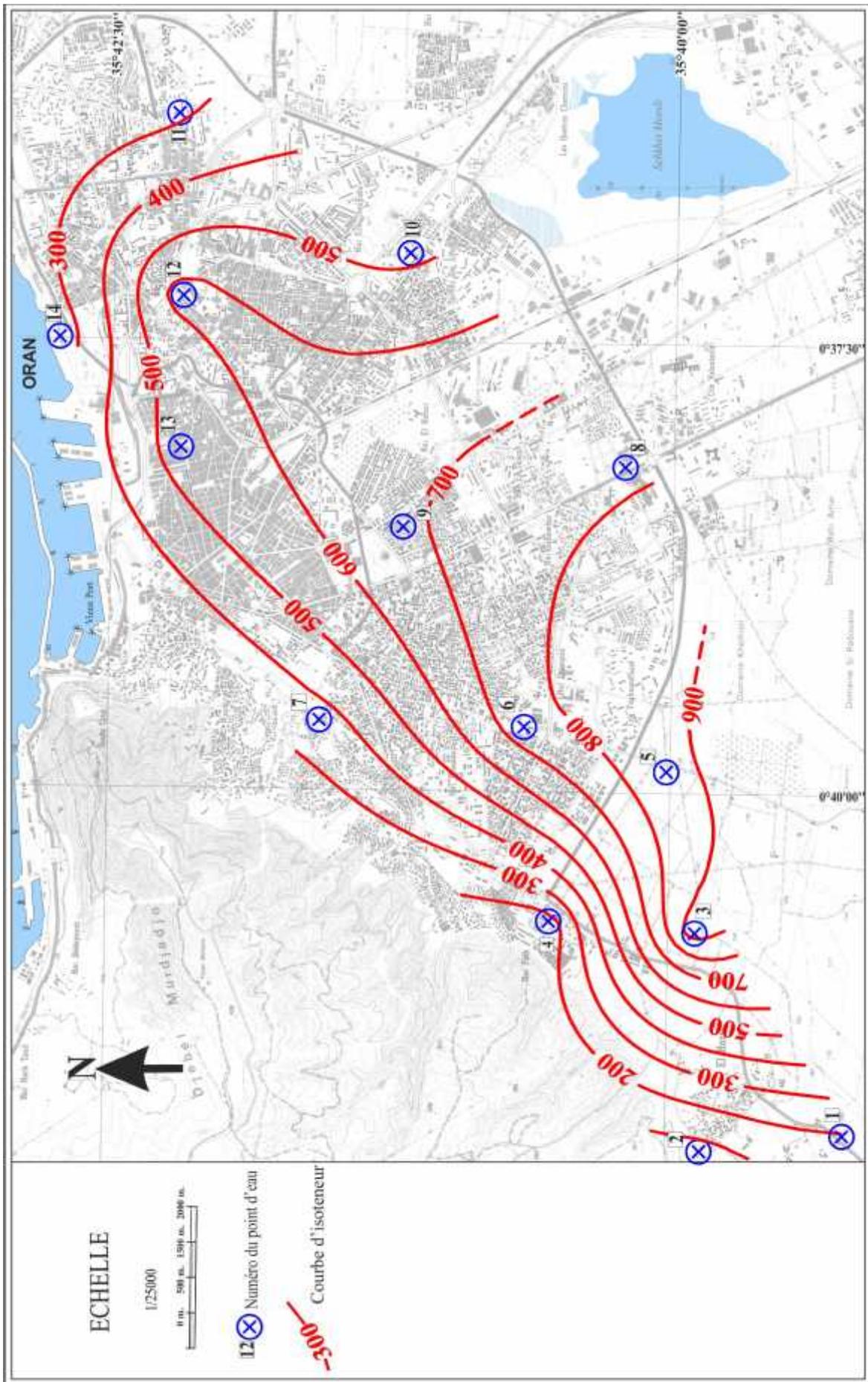


Fig. n° 28: Carte en courbes isoteneur de chlorures (mg/l).

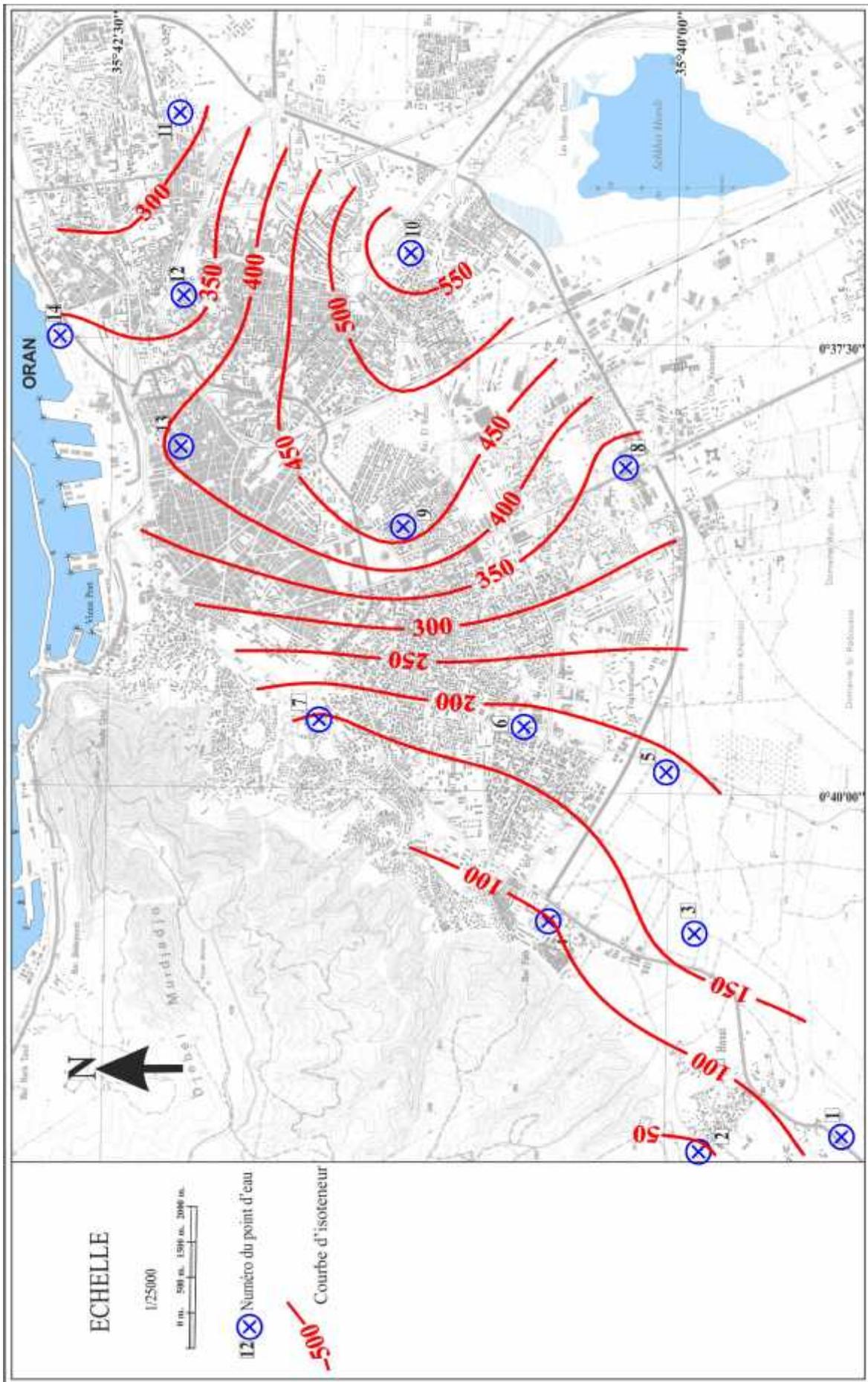


Fig. n° 29 : Carte en courbes isoteneur de sulfates (mg/l).

La carte d'évolution spatiale des sulfates (fig. n° 29), indique de faibles teneurs à la partie occidentale de l'agglomération, à l'exemple du puits n° 2 (42 mg/l). Dans la partie orientale, les valeurs dépassent les 300 mg/l. Une nette évolution se dégage en direction du secteur "Petit Lac" : 591 mg/l au niveau du puits n° 10.

4-3- Etude des rapports caractéristiques :

L'étude des rapports caractéristiques a concerné les rapports suivants :

SO₄/Cl ; Na/Cl et Mg/Ca. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau n° 15

:

Tableau n° 15: Rapports caractéristiques des eaux prélevées.

Points d'eaux	r (SO ₄ ⁻² /Cl)	r (Na/Cl)	r (Mg/Ca)
1	0,66	0,63	0,54
2	0,88	0,48	0,39
3	0,19	0,33	0,68
4	0,68	1,77	0,54
5	0,22	0,53	0,37
6	0,24	0,42	0,56
7	0,38	0,67	0,74
8	0,44	0,68	0,80
9	0,71	0,97	0,70
10	1,33	1,04	0,67
11	1,00	0,97	0,40
12	0,49	0,67	0,93
13	0,76	0,64	0,96
14	0,98	1,14	0,56

4-3-1- Le rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$:

D'après le tableau n° 12, nous constatons que la grande majorité des valeurs du rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ sont inférieures à l'unité : les chlorures dominent les sulfates, essentiellement dans la partie Sud-Ouest de l'agglomération (secteur du cimetière d'Ain Beida), r $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ Au puits n° 11, les deux anions s'équilibrent. Seul le puits n° 10 (secteur de petit-Lac) présente une prédominance des chlorures sur les sulfates.

4-3-2- Le rapport Na/Cl :

Les résultats obtenus montrent une claire dominance du sodium sur les chlorures (fig. n° 31). Par contre au niveau de n° 4, 10 et 14 le rapport s'inverse.

4-3-3- Le rapport Mg/Ca :

La dominance du calcium sur le magnésium est assez nette sur l'ensemble des points d'eau. Cette dominance se manifeste selon la direction SW-NE (fig. n° 32).

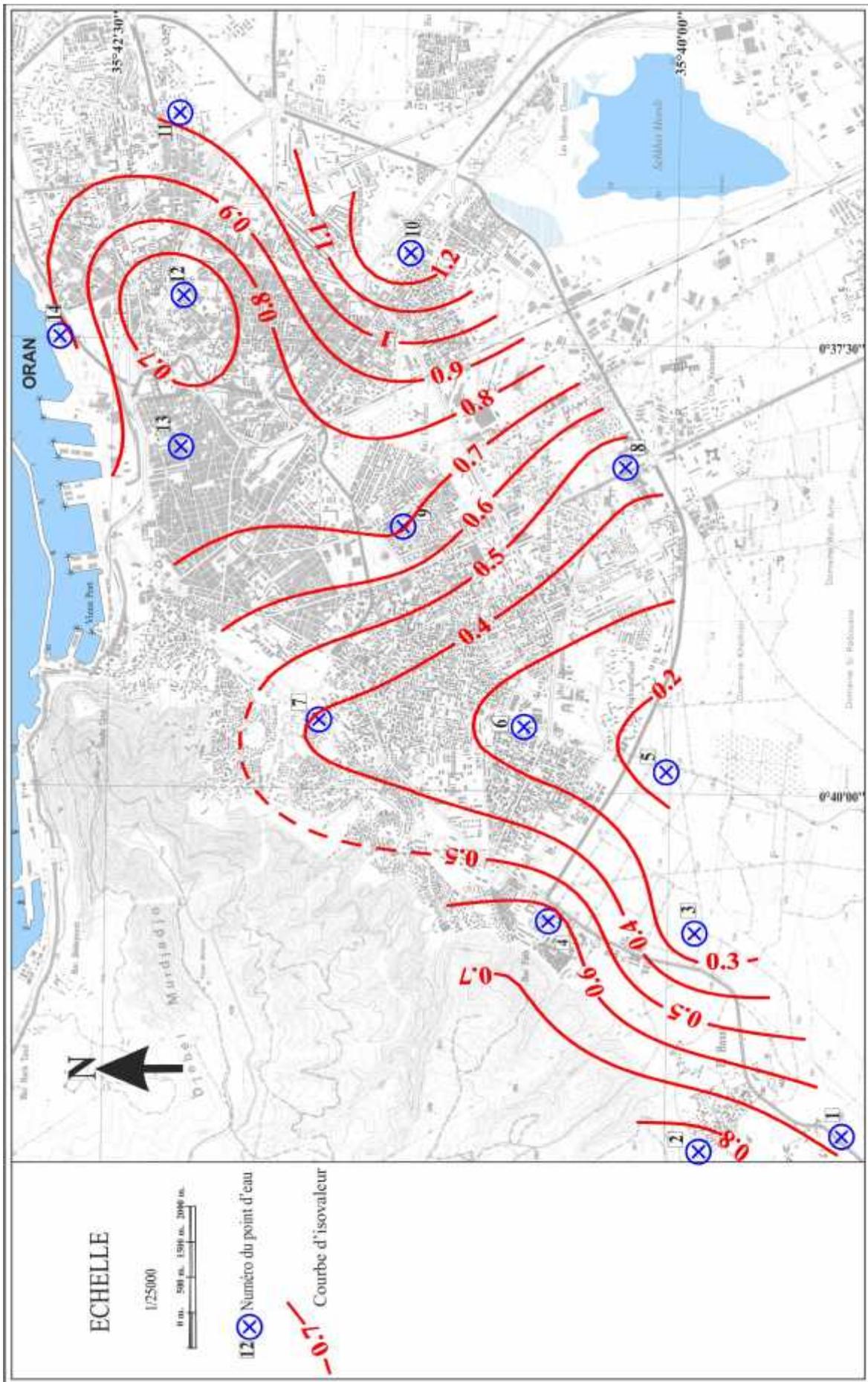


Fig. n° 30 : Carte en courbes isovaleur de r (SO_4/Cl).

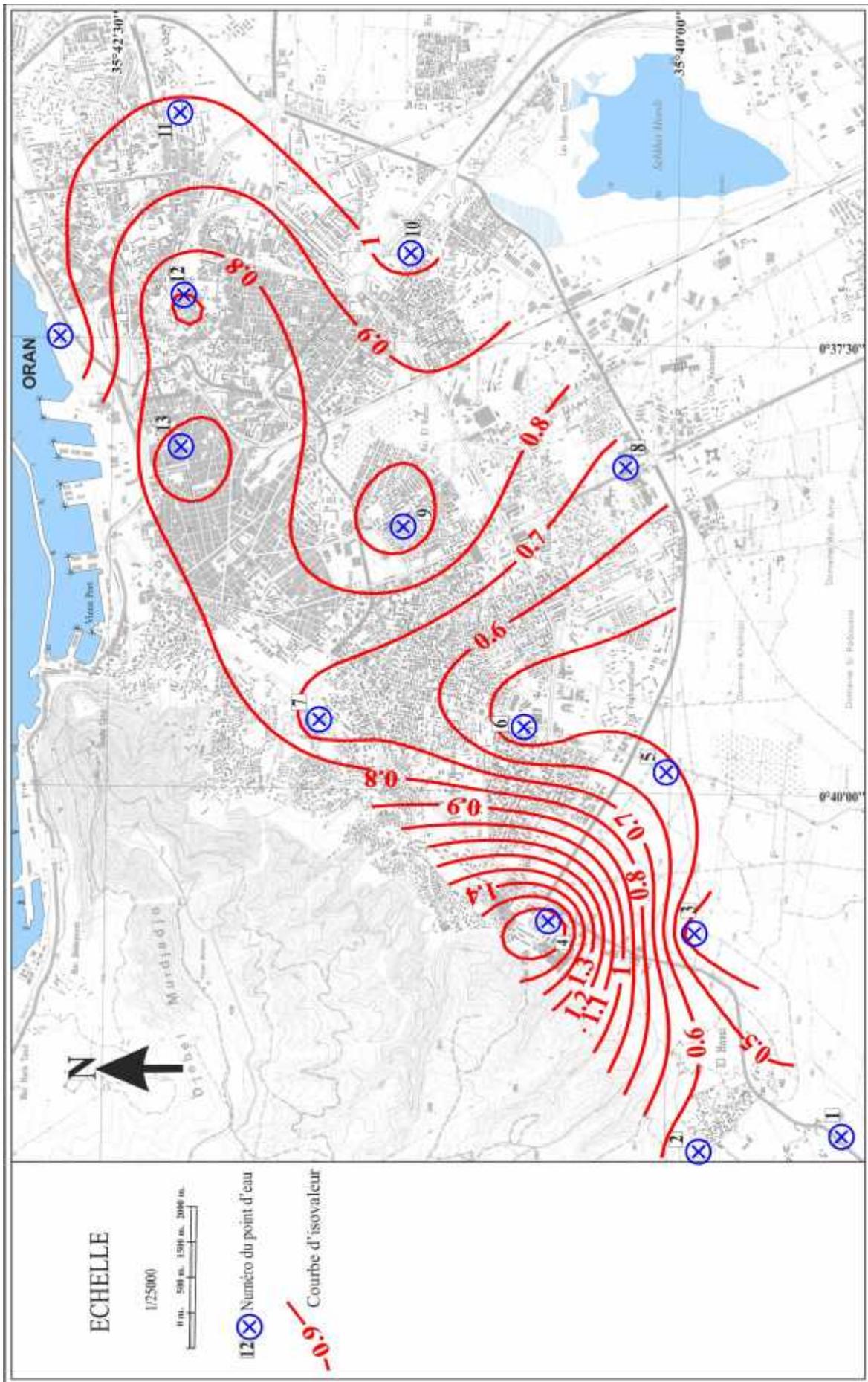


Fig. n° 31 : Carte en courbes isovaleur de r (Na/Cl).

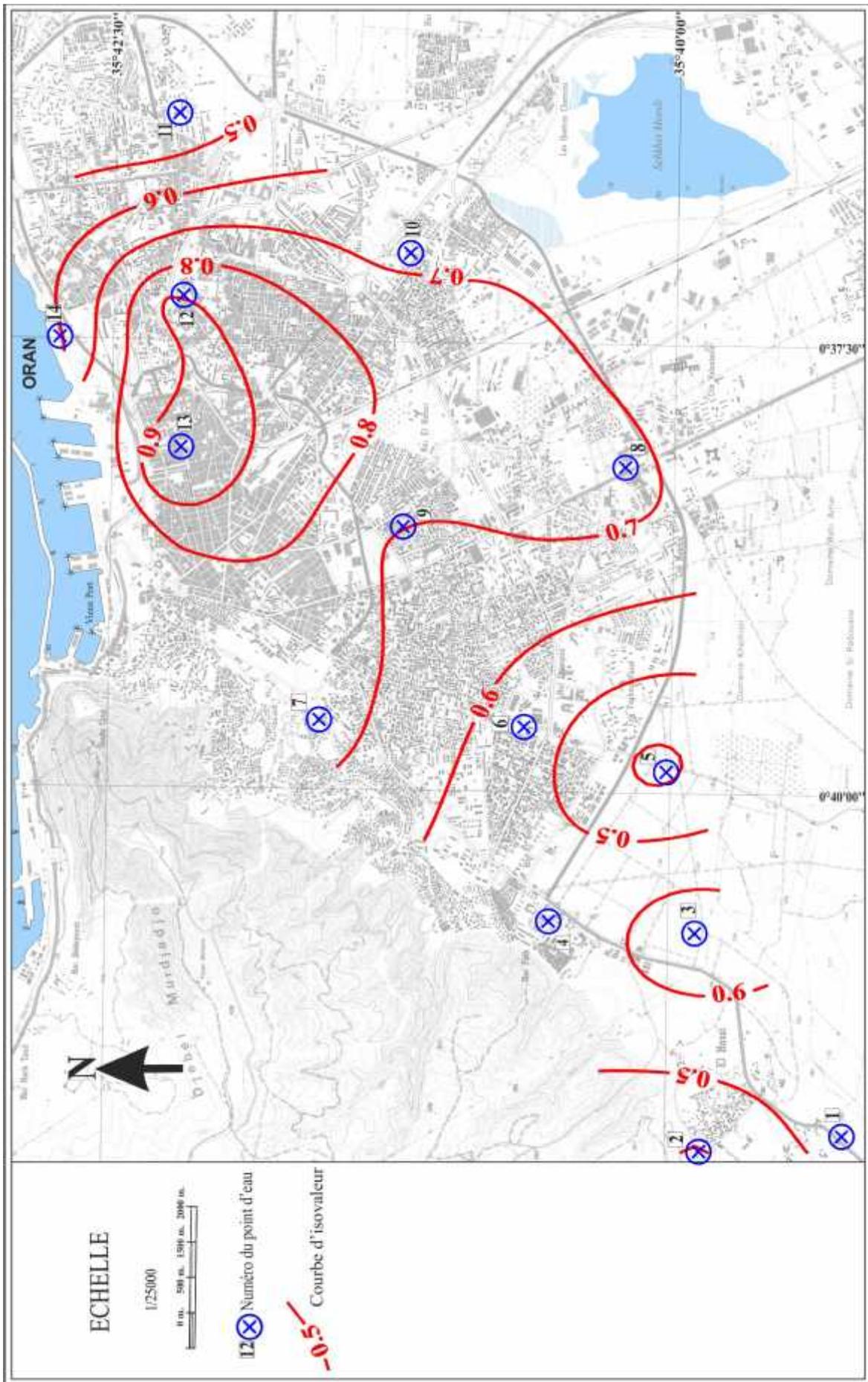


Fig. n° 32: Carte en courbes isovaleur de r (Mg/Ca).

4-4- Classification hydrochimique:

Les faciès ainsi que les principaux sous faciès hydrochimiques des eaux échantillonnées ont été déterminés à partir de leurs teneurs en milliéquivalent/l et de leurs formules caractéristiques (tableau n° 16 et 17).

Tableau n° 16: Résultats des analyses chimiques en r (még/l).

N°	r Ca ⁺²	r Mg ⁺²	r Na ⁺	r K ⁺	r Cl ⁻	r SO ₄ ⁻²	r HCO ₃ ⁻	r NO ₃ ⁻
1	04,89	04,36	05,22	00,13	05,38	02,65	05,93	01,08
2	02,94	01,89	01,00	00,03	01,35	00,88	03,80	00,16
3	11,38	12,66	13,39	00,10	26,48	03,75	05,48	01,44
4	06,14	05,51	11,00	00,15	04,03	02,02	05,20	01,29
5	09,98	06,00	20,00	00,18	24,56	04,00	06,16	01,10
6	08,78	08,06	13,78	00,13	21,32	03,77	04,36	01,19
7	04,69	05,76	10,22	00,21	09,83	02,73	05,51	01,21
8	06,14	08,06	22,61	00,21	21,49	07,04	08,51	01,06
9	06,29	07,24	28,78	00,72	19,21	10,15	11,31	01,52
10	06,89	07,65	20,00	00,44	12,48	12,31	07,61	02,44
11	06,69	04,44	10,91	00,18	07,30	05,42	09,07	00,55
12	07,44	11,35	18,26	00,56	17,61	06,35	08,16	01,16
13	10,33	16,28	15,00	00,62	15,18	08,50	07,56	00,98
14	05,89	05,43	11,83	00,36	06,73	07,77	06,49	01,19

Tableau n° 17: faciès caractéristiques des échantillons prélevés.

N°	Lieu	Anions	Cations
1	Puits "Mayouche"	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Ca}^{+2} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2}$
2	Puits "Aroussi"	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$
3	Puits "Moulgada"	$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2}$
4	Puits des "Amandiers"	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Ca}^{+2} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2}$
5	Puits "Krachai"	$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2}$
6	Puits "Yaghmorassen"	$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2}$
7	Source de "Ras El Ain"	$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2}$
8	Puits "Inesmo"	$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2}$
9	Puits "Mediouni"	$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2}$
10	Puits "Petit Lac"	$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2}$
11	Puits "HLM"	$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2}$
12	Puits "Saint Eugène"	$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2}$
13	Puits "Saint Pierre"	$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{SO}_4^{-2} > \text{HCO}_3^-$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2}$
14	Source "Cueva Del Agua"	$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^{-2} > \text{SO}_4^{-2} > \text{HCO}_3^-$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2}$

La majorité des eaux présentent un faciès **chloruré-sodique** aux points d'eau n° 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 11, 13 et 14. Les échantillons n° 1, 2 et 4 de la zone d'El Hassi présentent quant à eux un faciès **bicarbonaté-calcique**.

Par ailleurs, pour les échantillons au faciès chloruré-sodique, la classification hydrochimique permet de faire ressortir une prédominance variable entre les cations Ca^{++} et Mg^{++} et les anions HCO_3^- et SO_4^- déterminant l'existence de trois sous faciès. On distingue :

- un sous-faciès bicarbonaté-magnésien aux points : 3, 5, 7, 8, 9 et 10,
- un sous-faciès bicarbonaté-calcique aux points : 6, 11 et 12,
- un sous-faciès sulfaté-calcique aux points : 13 et 14.

Concernant le deuxième faciès, bicarbonaté-calcique, il présente deux sous-faciès :

- un sous-faciès chloruré-sodique aux points : 1 et 4,
- un sous-faciès chloruré-magnésien au niveau du puits n° 2, situé plus en amont.

Pour mieux connaître les principaux aspects hydrochimiques, il convient d'interpréter les résultats par des représentations graphiques qui nous permettent de comparer facilement plusieurs eaux entre elles.

4-4-1- Interprétation par diagramme de Schøeller-Berkaloff :

Il s'agit d'un diagramme logarithmique qui permet de représenter un ensemble d'eaux aux concentrations différentes avec une bonne précision. Il permet également d'effectuer la conversion des résultats d'analyse en milligrammes par litre (mg/l) en milliéquivalent par litre (méq/l).

Les valeurs des analyses ont été reportées sur les diagrammes des figures n° 33 et 34. L'interprétation confirme les faciès et sous-faciès déterminés plus haut.

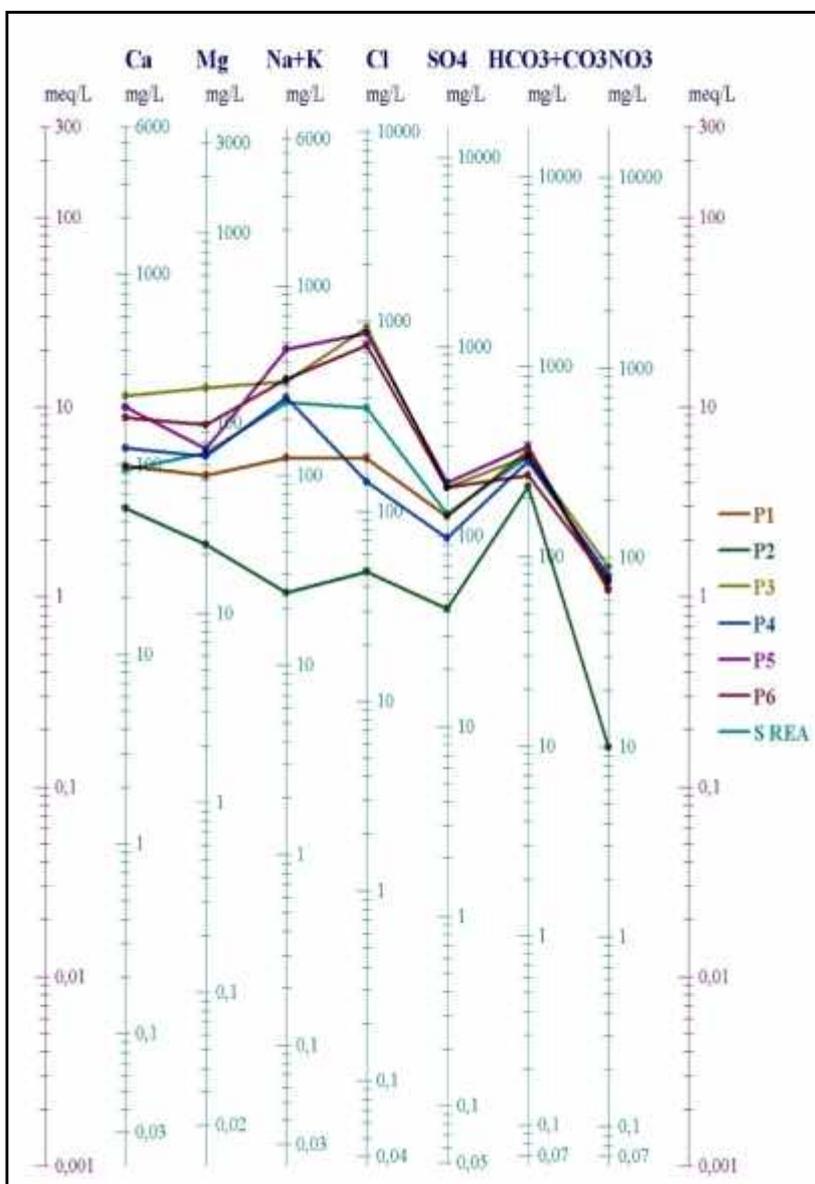


Fig. n° 33: Représentation graphique des résultats sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff. (puits 1 à 6 et SREA)

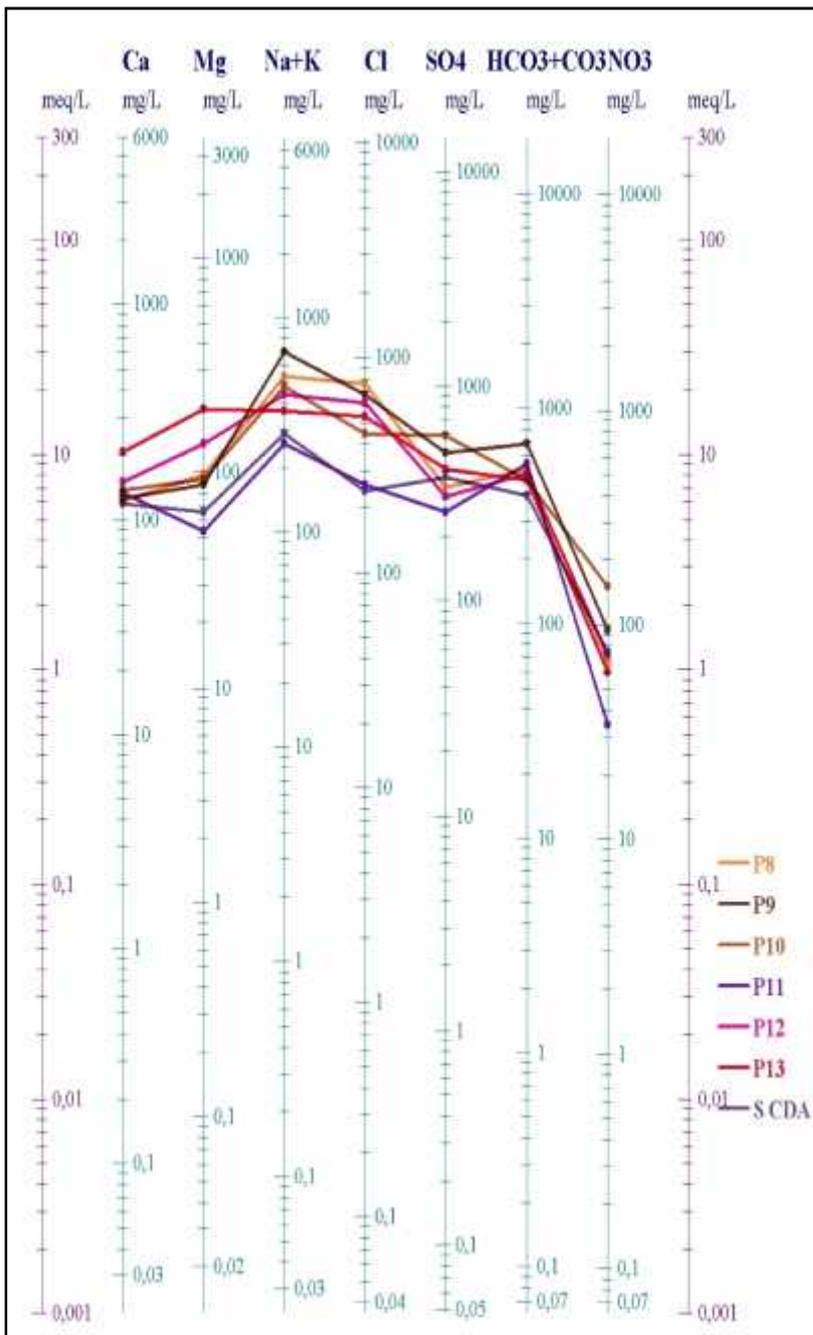


Fig. n° 34: Représentation graphique des résultats sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (puits 8 à 13 et SCDA).

4-4-2- Interprétation par diagramme de Piper :

Cette méthode consiste à représenter sur deux triangles les pourcentages des quantités en réactions (r %) de chaque cation et anion (tableau n° 18). 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 pouvoir regrouper un grand nombre d'analyses.

Les résultats obtenus aux figures n° 35 et 36) confirment les faciès et sous faciès déjà signalés.

Tableau n° 18: Résultats des analyses chimiques en r %.

N°	r Ca ⁺²	r Mg ⁺²	r Na ⁺	r K ⁺	r Cl ⁻	r SO ₄ ⁻²	r HCO ₃ ⁻	r NO ₃ ⁻
1	33,51	29,86	35,75	0,88	35,77	17,59	39,45	7,18
2	50,23	32,27	17,06	0,44	21,84	14,13	61,43	2,60
3	30,31	33,74	35,68	0,27	71,30	10,10	14,74	3,87
4	26,92	24,16	48,24	0,67	32,13	16,12	41,45	10,29
5	27,60	16,60	55,31	0,50	68,57	11,17	17,21	3,06
6	28,56	26,21	44,82	0,42	69,57	12,30	14,23	3,89
7	22,48	27,58	48,96	0,98	51,00	14,16	28,57	6,27
8	16,58	21,78	61,09	0,55	56,40	18,48	22,33	2,79
9	14,61	16,82	66,90	1,67	45,54	24,05	26,81	3,59
10	19,69	21,87	57,19	1,25	35,82	35,35	21,84	6,99
11	30,09	19,99	49,11	0,81	32,68	24,26	40,60	2,46
12	19,77	30,18	48,55	1,50	52,89	19,09	24,53	3,49
13	24,46	38,56	35,52	1,46	47,12	26,38	23,45	3,05
14	25,06	23,10	50,32	1,53	30,34	35,02	29,26	5,38

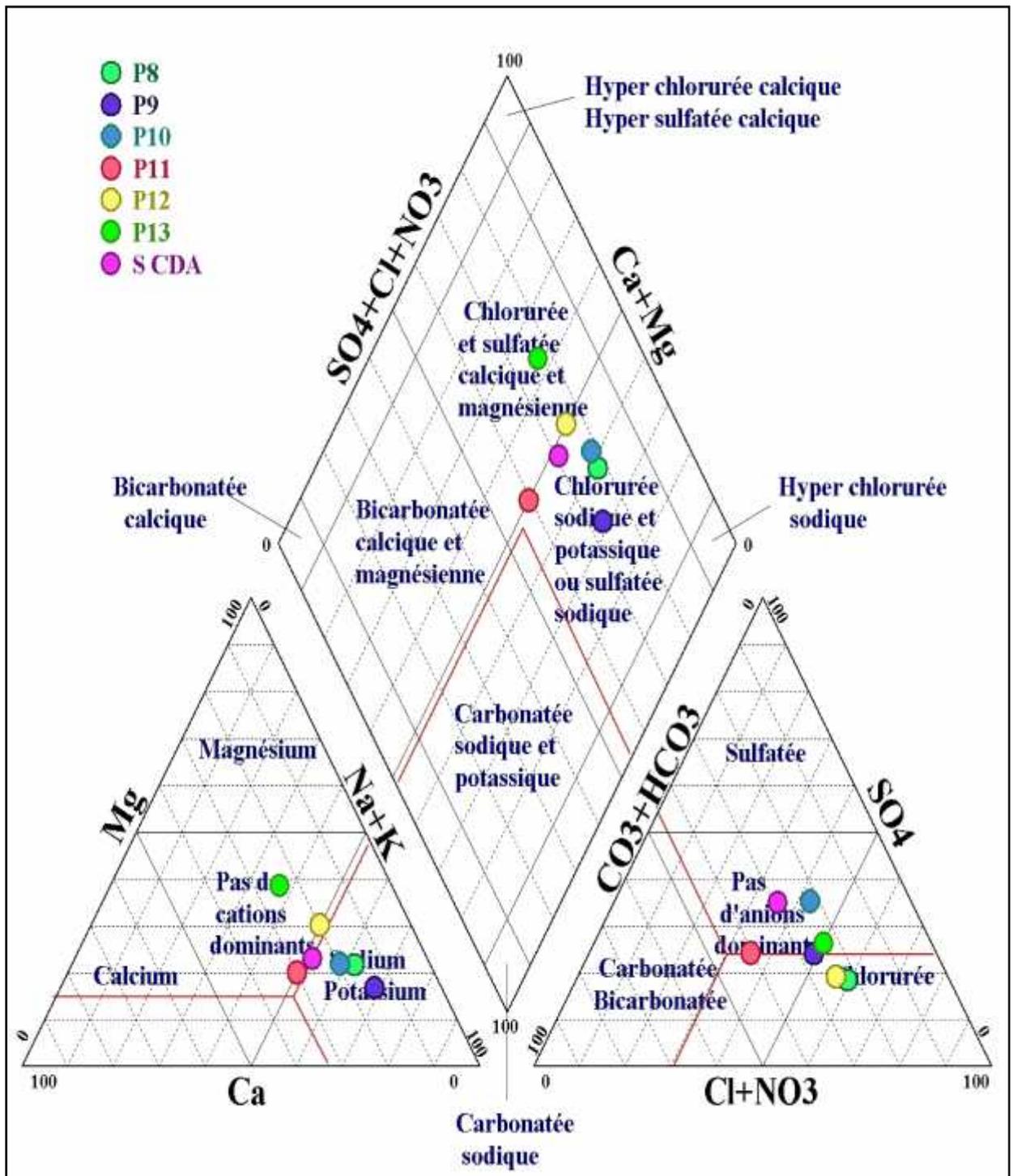


Fig. n° 36: Représentation graphique des résultats sur le diagramme de Piper (puits 8 à 13 et SCDA).

4-4-3- Carte des faciès :

Nous avons également représenté sur carte la répartition spatiale des faciès et sous faciès de l'ensemble des eaux (fig. n° 37).

L'observation de la carte nous permet d'établir les constatations suivantes :

1 - la majorité des points d'eaux du plateau présentent un faciès **chloruré-sodique** (1, 3, 5, 6,7, 8, 9, 10,11, 12, 13 et 14). Ce faciès caractérise les eaux du complexe dunaire ainsi que ceux circulant dans les niveaux alluvionnaires.

Plus particulièrement, les eaux du complexe dunaire semblent se caractériser par le sous-faciès bicarbonaté-calcique (puits n° 11 et 12) et le sous-faciès sulfaté-calcique (puits n° 13 et 14).

Les eaux circulant dans les niveaux alluvionnaires se caractérisent plutôt par le sous-faciès bicarbonaté-magnésien (puits n° 3, 5, 7, 8, 9 et 10), à l'exception particulière du puits n° 6 qui présente le sous-faciès bicarbonaté-calcique.

2 - les eaux des formations carbonatées (zone d'El Hassi) se manifestent par le faciès **bicarbonaté-calcique** (puits 1, 2 et 4). Le sous-faciès chloruré-magnésien caractérise les eaux dans la zone de recharge (puits n° 2). Le sous-faciès chloruré-sodique constitue un sous-faciès de transition vers la zone alluvionnaire.

4-5- 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 (CaCO₃) en solution par exemple :



Donc le produit d'activité ionique :

$$PAI = aCa^{2+} \cdot aCO_3^{2-}$$

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

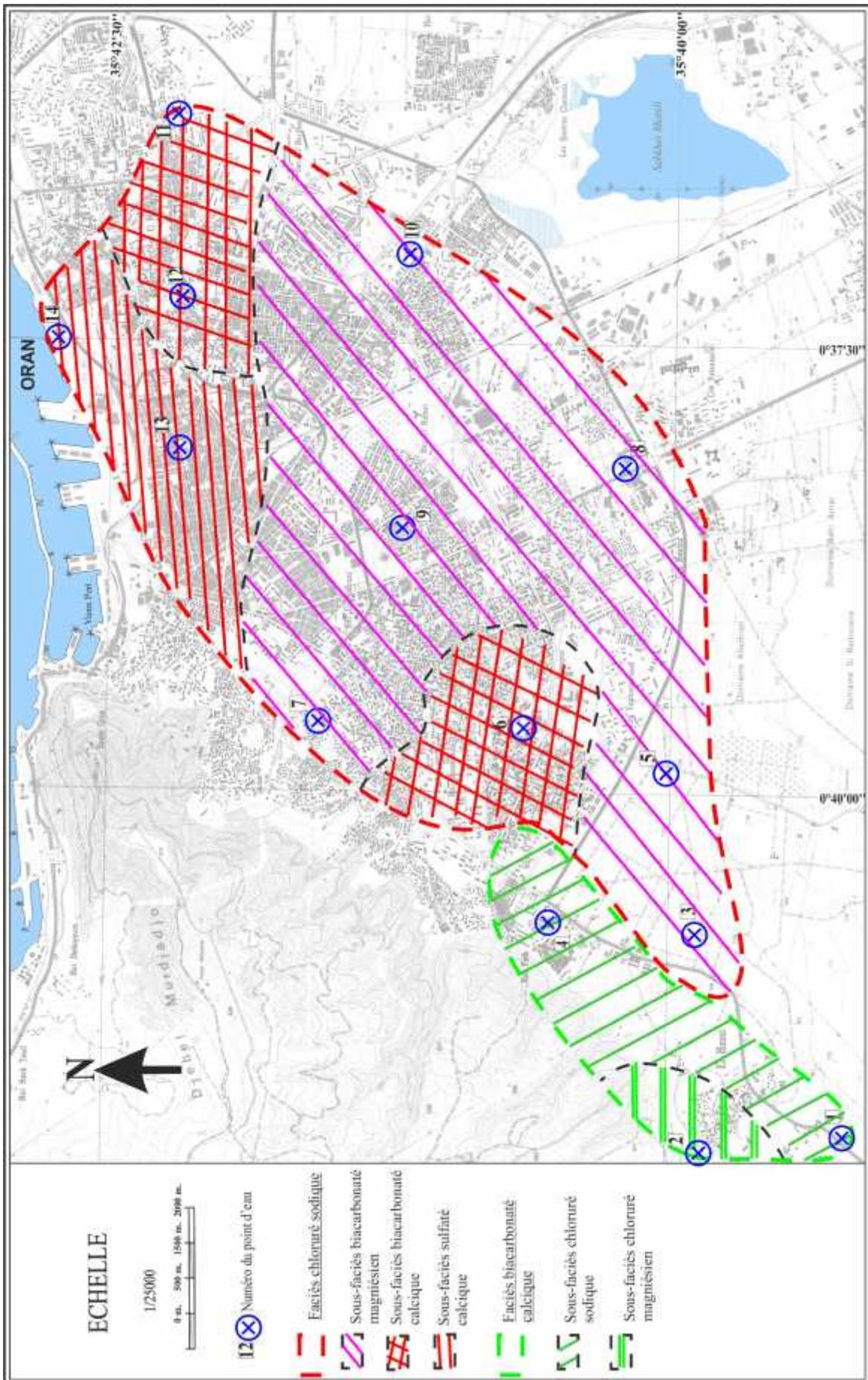


Fig. n° 37: Carte de répartition des principaux faciès et sous-faciès hydrochimiques

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 :

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

Si,

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

$\text{IS} > 0$, l'eau est sursaturée par rapport à la calcite

$\text{IS} < 0$, il montre que 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 notre secteur d'étude, le calcul des indices de saturation a été obtenu en utilisant le logiciel Diagramme (R. Simler, 2002). Les résultats sont représentés dans le tableau n° 19.

Tableau n° 19: indices de saturation des eaux souterraines de la zone d'étude.

Points d'eau	Cl-	Is Calcite	Is Dolomite	Is Aragonite	Is Gypse	Is Anhydrite
1	191	0,27	0,07	0,12	-1,37	-1,59
2	48	0,29	-0,03	0,14	-1,93	-2,15
3	940	0,6	0,83	0,45	-1,04	-1,26
4	143	0,62	0,78	0,48	-1,42	-1,64
5	872	0,49	0,36	0,35	-1,04	-1,26
6	757	0,1	-0,24	-0,04	-1,1	-1,32
7	349	0,29	0,25	0,14	-1,42	-1,64
8	763	0,47	0,65	0,32	-1,02	-1,24
9	682	0,78	1,22	0,64	-0,88	-1,1
10	443	0,7	1,03	0,55	-0,72	-0,94
11	259	0,45	0,32	0,31	-0,99	-1,21
12	625	0,62	1,02	0,48	-0,98	-1,2
13	539	0,95	1,7	0,81	-0,74	-0,96
14	239	0,27	0,1	0,13	-0,9	-1,13

Les résultats figurés dans le tableau n° 19 indiquent que les eaux de la nappe étudiée sont sursaturées par rapport à la calcite, la dolomite et l'aragonite. Elles sont par contre sous-saturées par rapport au gypse et à l'anhydrite.

Les chlorures étant le principal élément conditionnant la minéralisation des eaux, nous avons représenté sur les digrammes des figures n° 38 et 39, les indices de saturation de ces différents minéraux en fonction des chlorures.

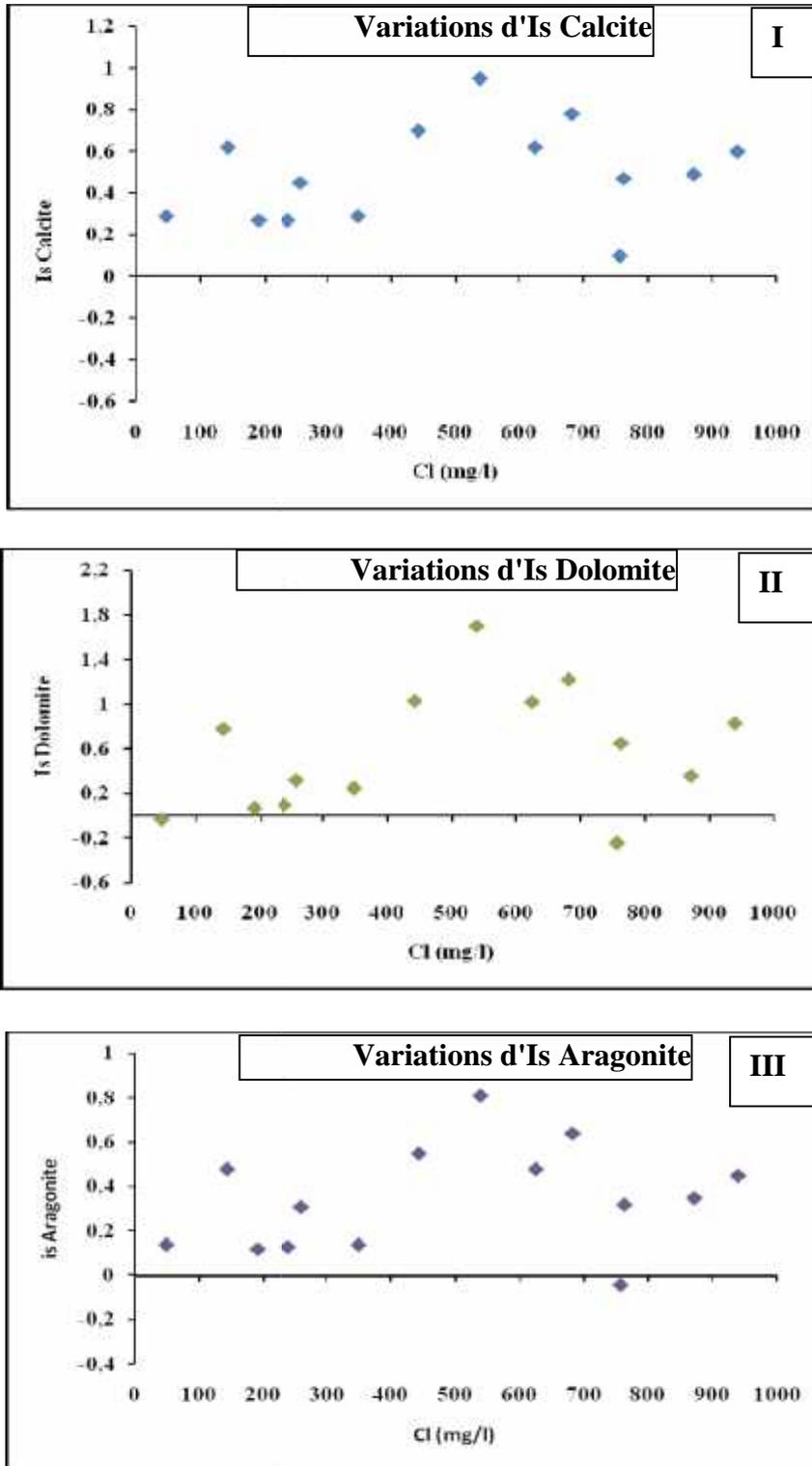


Fig. n° 38: Diagrammes des indices de saturation (Calcite, dolomite et aragonite).

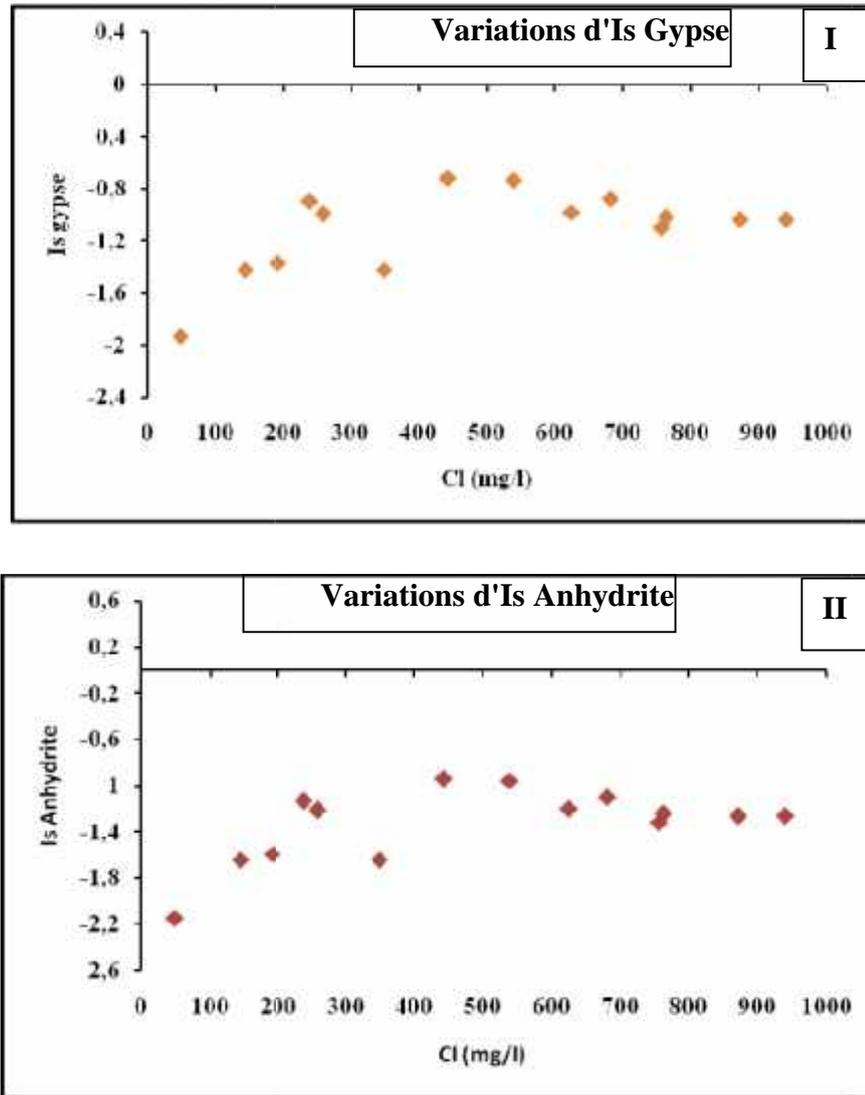


Fig. n° 39: Diagrammes des indices de saturation (gypse et anhydrite).

4-6- Indice chloro-alcalin (ex i.e.b : indice d'échange de bases) :

C'est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu à l'aide de la relation suivante :

$$I.C.A. = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

Si, :

$I.C.A. = 0$, il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et de l'encaissant.

$I.C.A. < 0$, l'encaissant libère le sodium et le potassium et fixe le calcium.

$I.C.A. > 0$, l'encaissant libère le calcium et fixe le sodium et le potassium.

Les valeurs de l'indice d'échange de base sont présentées dans le tableau n° 20.

La majorité des valeurs sont négatives (09 points d'eaux), elles s'échelonnent entre -0.03 à -1.77. Ceci traduit des échanges entre le calcium de l'eau avec le sodium des formations encaissantes tandis que le reste des points d'eau, avec un indice positif entre 0.01 et 0.49, indiquent que les eaux souterraines de la nappe étudiée échangent les ions Na^+ et K^+ contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'encaissant.

Tableau n° 20: valeurs des indices d'échange de base des eaux du secteur d'étude.

Points d'eau	r Cl-	r(Na+K)	I.E.B
1	5,38	5,35	0,01
2	1,35	1,03	0,24
3	26,48	13,49	0,49
4	4,03	11,15	-1,77
5	24,56	20,18	0,18
6	21,32	13,91	0,35
7	9,83	10,42	-0,06
8	21,49	22,81	-0,06
9	19,21	29,50	-0,54
10	12,48	20,44	-0,64
11	7,30	11,09	-0,52
12	17,61	18,82	-0,07
13	15,18	15,62	-0,03
14	6,73	12,19	-0,81

5- Traitement statistique des données hydrochimiques :

Nous avons effectué une étude statistique par analyse en composante principale sur les quatorze échantillons prélevés. Nous avons pris en considération les éléments majeurs suivants : Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , ainsi que le résidu sec, la conductivité et le pH.

Nous avons utilisé pour l'analyse en composante principale le logiciel XLSTAT - (version 4.3).

5-1- Etude statistique en composantes principales :

a)- statistiques élémentaires :

Dans le tableau n° 21, nous avons présenté le calcul des moyennes et des écarts-type de la série de différents éléments chimiques.

Tableau n° 21: moyennes et écarts-type de la série.

Variables	Moyennes (mg/l)	Écarts -type de la série
Ca ⁺²	140,929	47,180
Mg ⁺²	90,929	45,692
Na ⁺	331,857	164,542
K ⁺	11,143	8,411
Cl	489,286	290,272
SO ₄ ⁻	265,143	159,130
HCO ₃	414,571	123,934
NO ₃	72,500	31,105
Cond.	2229,857	935,289
RS	1924,286	768,462
pH	7,357	0,180

b)- Matrice de corrélation :

Dans le tableau n° 22, nous figurons les valeurs des coefficients de corrélation entre les teneurs des différents éléments majeurs :

Tableau n° 22: Matrice de corrélation des éléments chimiques.

	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	RS	pH	NO ₃ ⁻	cond.
Ca ⁺²	1										
Mg ⁺²	0,766	1									
Na	0,398	0,406	1								
K ⁺	0,182	0,521	0,661	1							
Cl ⁻	0,770	0,601	0,693	0,206	1						
SO ₄ ⁻²	0,211	0,400	0,724	0,796	0,270	1					
HCO ₃ ⁻	0,069	0,234	0,742	0,742	0,248	0,738	1				
RS	0,753	0,621	0,818	0,439	0,902	0,596	0,513	1			
pH	0,126	0,225	0,033	0,365	0,242	0,174	0,079	0,144	1		
NO ₃ ⁻	0,281	0,300	0,562	0,402	0,332	0,629	0,251	0,547	0,115	1	
cond.	0,721	0,565	0,814	0,377	0,860	0,588	0,457	0,949	0,136	0,535	1

On remarque que la majorité des éléments majeurs sont corrélés positivement entre eux.

Les meilleures corrélations positives se retrouvent entre le résidu sec avec les ions Na⁺ (0.82) et Cl⁻ (0.90).

5-2- Analyse en Composant Principale (ACP) :

L'analyse en composant principale est une méthode statistique multidimensionnelle descriptive, utilisable comme aide à l'interprétation d'une matrice de données. Les matrices de données physico-chimiques comportent "m" analyses (ou points échantillonnés) sur "n" variables (ou éléments mesurés). Cette méthode, en cherchant les directions référentielles d'allongement d'un nuage de point multidimensionnelle (valeurs propres), permet de résumer l'information en projetant le nuage de point sur ses directions préférentielles (Axes factoriels).

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).

5-3- Résultats obtenus pour le secteur étudié :**a)- Diagonalisation :**

1^{er} ligne : Valeurs propres (variances sur les axes principaux).

2^{ème} ligne : Contribution à la variation totale (pourcentage expliqué par les axes principaux)

5,956	2,089
54,154 %	18,995 %.

Tableau n° 23 : Vecteurs propres (coefficient des variables centrées réduites dans l'équation linéaire des axes principaux).

Variables	Axe 1	Axe 2
Ca ⁺²	0,279	-0,401
Mg ⁺²	0,287	-0,117
Na ⁺	0,368	0,116
K ⁺	0,277	0,424
Cl ⁻	0,323	-0,370
SO ₄ ⁻⁻	0,314	0,355
HCO ₃ ⁻	0,265	0,367
RS	0,387	-0,180
PH	0,013	0,393
NO ₃ ⁻	0,256	0,117
cond.	0,374	-0,186

Variance : - axe 1 : 54,15 %

- axe 2 : 18,99 %

b) - Etude des variables :

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

2^{ème} colonne : corrélation au carré.

Tableau n° 24 : Etude des variables.

VARIABLES	COMPOSANTES PRINCIPALES			
	Axe 1		Axe 2	
Ca ⁺²	0,680	0,462	-0,579	0,336
Mg ⁺²	0,699	0,489	-0,169	0,028
Na ⁺	0,898	0,806	0,168	0,028
K ⁺	0,677	0,458	0,614	0,376
Cl ⁻	0,789	0,622	-0,534	0,285
SO ₄ ⁻²	0,766	0,587	0,513	0,263
HCO ₃ ⁻	0,646	0,417	0,530	0,281
RS	0,944	0,892	-0,260	0,068
PH	0,031	0,001	0,568	0,322
NO ₃ ⁻	0,624	0,389	0,170	0,029
cond.	0,912	0,832	-0,269	0,073

Dans l'axe F₁, tous les éléments sont corrélés positivement sauf le pH (fig. n° 40).

Les éléments HCO₃⁻ et NO₃⁻² sont les plus proches de l'origine de l'axe ce qui indique leur moindre corrélation avec les autres éléments.

Na, Cl et K et SO₄ sont bien corrélés positivement selon l'axe F₁. La corrélation Na/Cl est bien meilleure que la corrélation Ca/SO₄.

Selon l'axe F₂, on constate que les paramètres HCO₃, K, SO₄, NO₃ et Na sont nettement corrélés négativement à Mg, Ca et Cl.

c)- Etudes des individus :

1^{er} colonne : coordonnées des individus sur les axes principaux,

2^{ème} colonne : cosinus carrés (qualité de présentation).

Tableau n° 25 : étude des individus.

N°	Echantillons	Axe 1		Axe 2	
1	Puits "Mayouche"	-2,785	0,891	0,001	0,000
2	Puits "Aroussi"	-5,444	0,915	0,679	0,014
3	Puits "Moulgada"	1,961	0,279	-2,801	0,570
4	Puits des "Amandiers"	-2,389	0,647	0,598	0,041
5	Puits "Krachai"	1,311	0,232	-2,033	0,559
6	Puits "Yaghmorassen"	0,167	0,004	-2,551	0,827
7	Source de "Ras El Ain"	-1,970	0,839	0,138	0,004
8	Puits "Inesmo"	1,549	0,445	-0,251	0,012
9	Puits "Mediouni"	3,668	0,643	2,294	0,251
10	Puits "Petit Lac"	2,437	0,406	1,805	0,222
11	Puits "HLM"	-1,247	0,232	0,136	0,003
12	Puits "Saint Eugène"	1,157	0,292	0,756	0,125
13	Puits "Saint Pierre"	2,354	0,378	0,577	0,023
14	Source "Cueva Del Agua"	-0,767	0,166	0,653	0,120

L'étude de la répartition des individus, parallèlement à celle des variables, fait apparaître les regroupements de points suivants (fig. n° 41).

Groupe 1 : P1, P2 et P4 ; eaux à faciès bicarbonaté-calcique et à minéralisation faible ($400 < RS < 1200$) caractérisant les formations carbonatées de la zone occidentale.

Groupe 2 : P3, P5, P7 et P8 ; eaux situées dans la partie sud/sud-ouest du secteur étudié, à faciès chloruré-sodique et à sous-faciès bicarbonaté-magnésien.

Groupe 2' : P9 & P10 ; eaux situées dans la partie sud-est du secteur étudié caractérisées également par le faciès chloruré-sodique, à sous-faciès bicarbonaté-magnésien. Ces deux points se caractérisent par les plus fortes teneurs en nitrates, respectivement 94 & 151 mg/l.

Groupe 3 : P11, P12, P13 et P14 ; correspondant aux eaux situées dans la partie nord-est du secteur (zone d'affleurement du complexe dunaire). Ils se caractérisent par le faciès chloruré-sodique à sous-faciès bicarbonaté-calcique (P11 & P12) et sulfaté-calcique (P13 & P14).

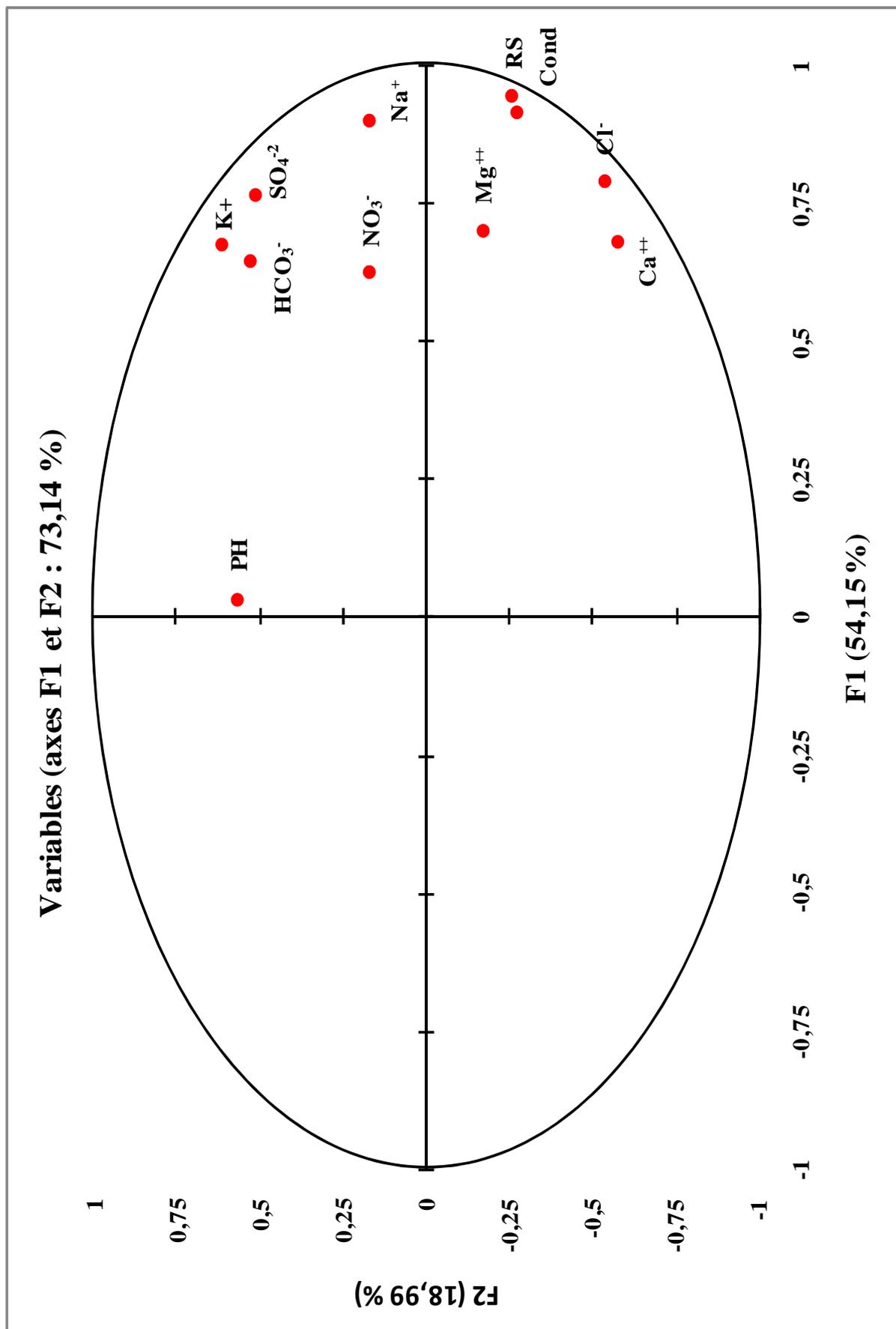


Fig. n° 40: Cercle de corrélation : axes 1 et 2, variables.

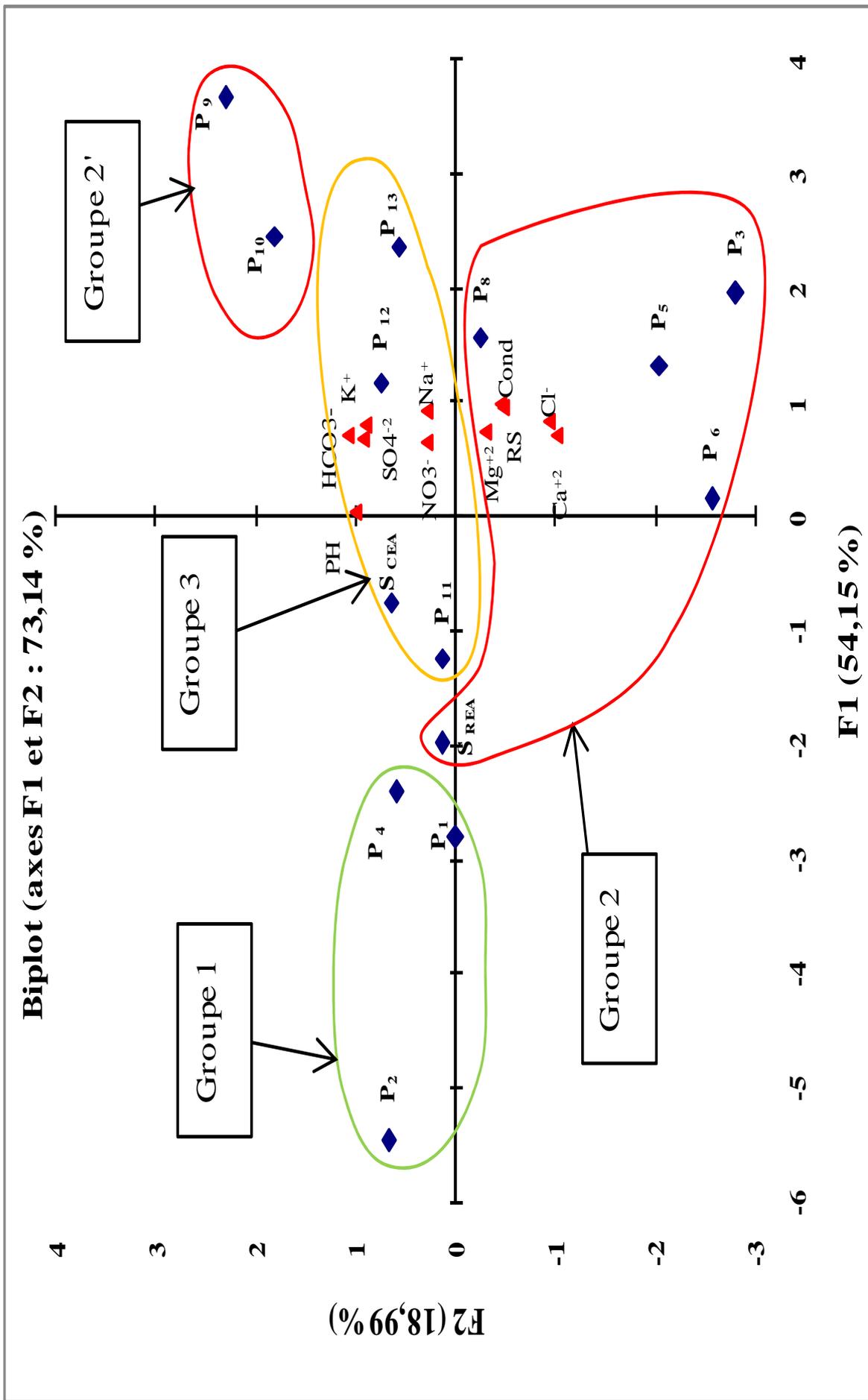


Fig. n° 42: Cercle de corrélation : axes 1 et 2, variables et individus..

5-3- Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

5-3-1- 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 (l'utilisateur sait combien de classes il veut obtenir), soit de critères plus objectifs.

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

5-3-2- 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.

5-3-3- Résultats pour la Classification Ascendante Hiérarchique dans le secteur d'étude :

Les données utilisées dans cette classification correspondent aux données hydrochimiques des quatorze points de prélèvement.

Le but est ici de créer des groupes homogènes d'individus.

L'application de la méthode CAH au moyen du logiciel XLSTAT nous a permis de faire ressortir beaucoup de résultats : statistique 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 , etc. (non présentés ici).

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

Le dendrogramme complet permet de visualiser le regroupement progressif des objets, où le trait en pointillé marque le niveau auquel est effectuée la troncature (fig. n° 42).

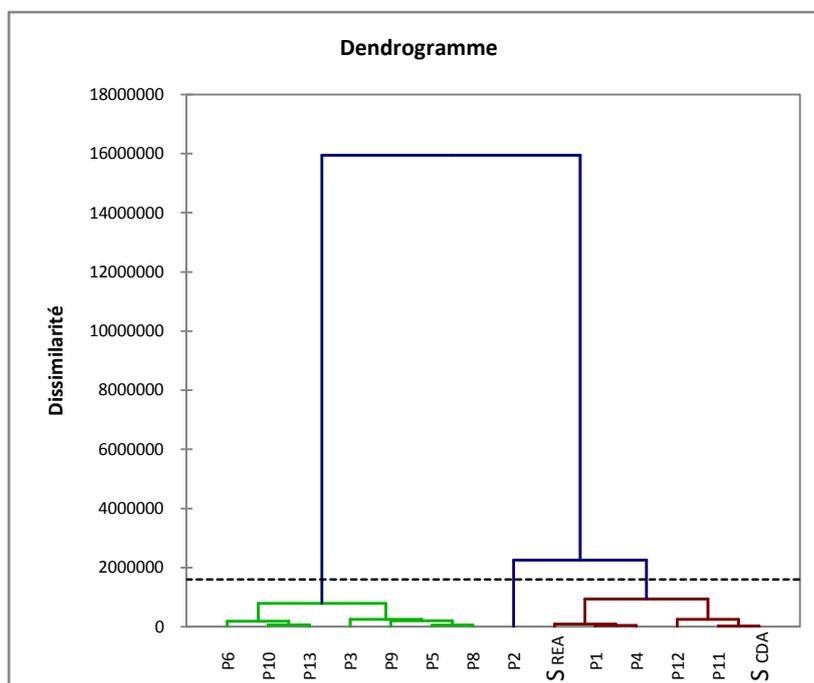


Fig. n° 44: dendrogramme complet visualisant le regroupement progressif des objets.

Après troncature, le dendrogramme permet de visualiser trois classes (fig. n° 43).

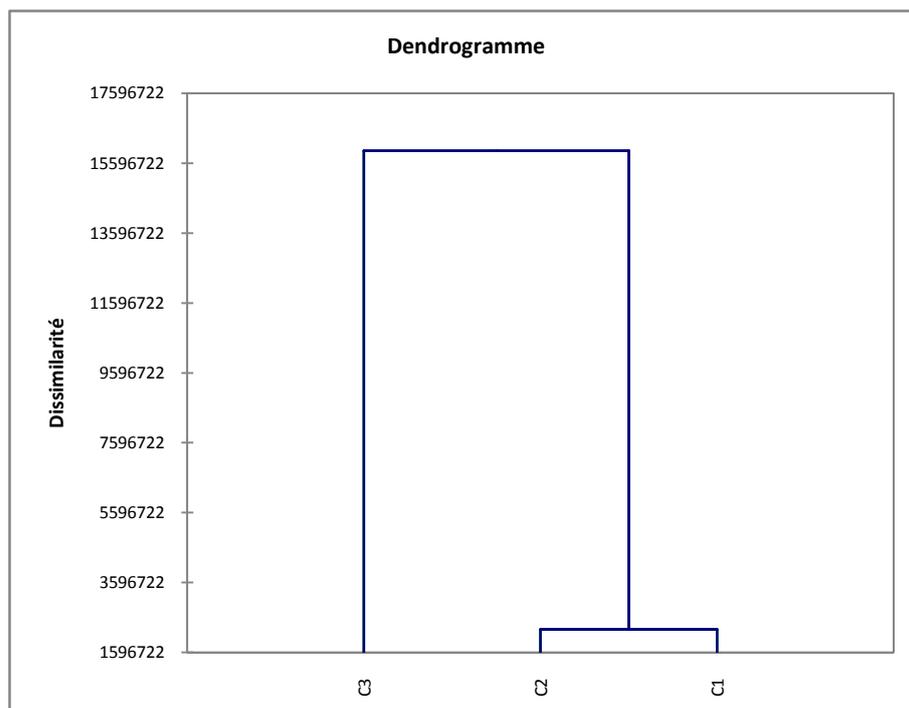


Fig. n° 45 : Le dendrogramme tronqué.

Les résultats par classes sont indiqués dans le tableau n° 26 où sont indiqués, pour chaque classe, les objets (individus) correspondants.

Tableau n° 26 : Classes des objets (individus).

<i>Classes</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Objets (individus)	P1	P2	P3
	P4		P5
	S _{REA}		P6
	P11		P8
	P12		P9
	S _{CDA}		P13

Le résultat obtenu semble indiquer que les trois regroupements s'est établi non sur la base de faciès hydrochimique mais plutôt sur la base de classes de minéralisation :

- classe 2 : Résidu sec = 400 mg/l
- classe 1 : 940 Résidu sec 2040 mg/l
- classe 3 : 2100 Résidu sec 3060 mg/l

6-Aptitude des eaux à l'irrigation :

Sous l'effet de climat de type semi-aride, 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. Dans la zone étudiée, en dépit d'une extrême extension et de l'intense densification urbaine, l'activité agricole se maintient encore (difficilement) dans certains secteurs essentiellement dans la partie sud-ouest (secteur du cimetière d'Ain El Beida-El Hassi). A cet effet, nous avons étudié l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation des cultures. Nous avons utilisé les valeurs de la conductivité électrique à 25°C et celles du coefficient d'adsorption du sodium (SAR).

6-1- Evaluation de risque d'alcalinité :

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 méq/l.

La comparaison des valeurs du SAR calculées (tableau n° 27) avec les valeurs portées au tableau n° 28, nous a permis de déduire les résultats suivants :

Tableau n° 27: Les résultats des valeurs de SAR

Point d'eau	SAR	Point d'eau	SAR
P1	2,43	P8	8,49
P2	0,64	P9	11,07
P3	3,86	P10	7,42
P4	4,56	P11	4,63
P5	7,07	P12	5,96
P6	4,75	P13	4,11
S _{REA}	4,47	S _{CDA}	4,97

Tableau n° 28 : classes d'alcalinité selon U.S.S.L (1954).

Classes	SAR	Echantillons	% correspondant
S1	<13	P1, P2, P3, P4, P5, P6, S _{REA} , P8, P9, P10, P11, P12, P13 et S _{CDA}	100 %
S2	13-23	/	00 %
S3	>23	/	00 %

- Tous les points d'eau du secteur d'étude, appartiennent à la classe S1.

6-2- Evaluation du risque de salinité (diagramme de Riverside) :

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 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° 44). 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 distribuent en trois groupes :

Groupe 1 : P1, P2, P4 et S_{REA} avec des risques de salinisation des sols faible et des risques de sodisation faibles à moyens,

Groupe 2 : P3, P5, P6, P10, P11, P12 et S_{CDA}, avec des risques de salinisation moyens et de forts risques de sodisation,

Groupe 3 : P8 et P9, avec des risques de salinisation élevés et de forts risques de sodisation.

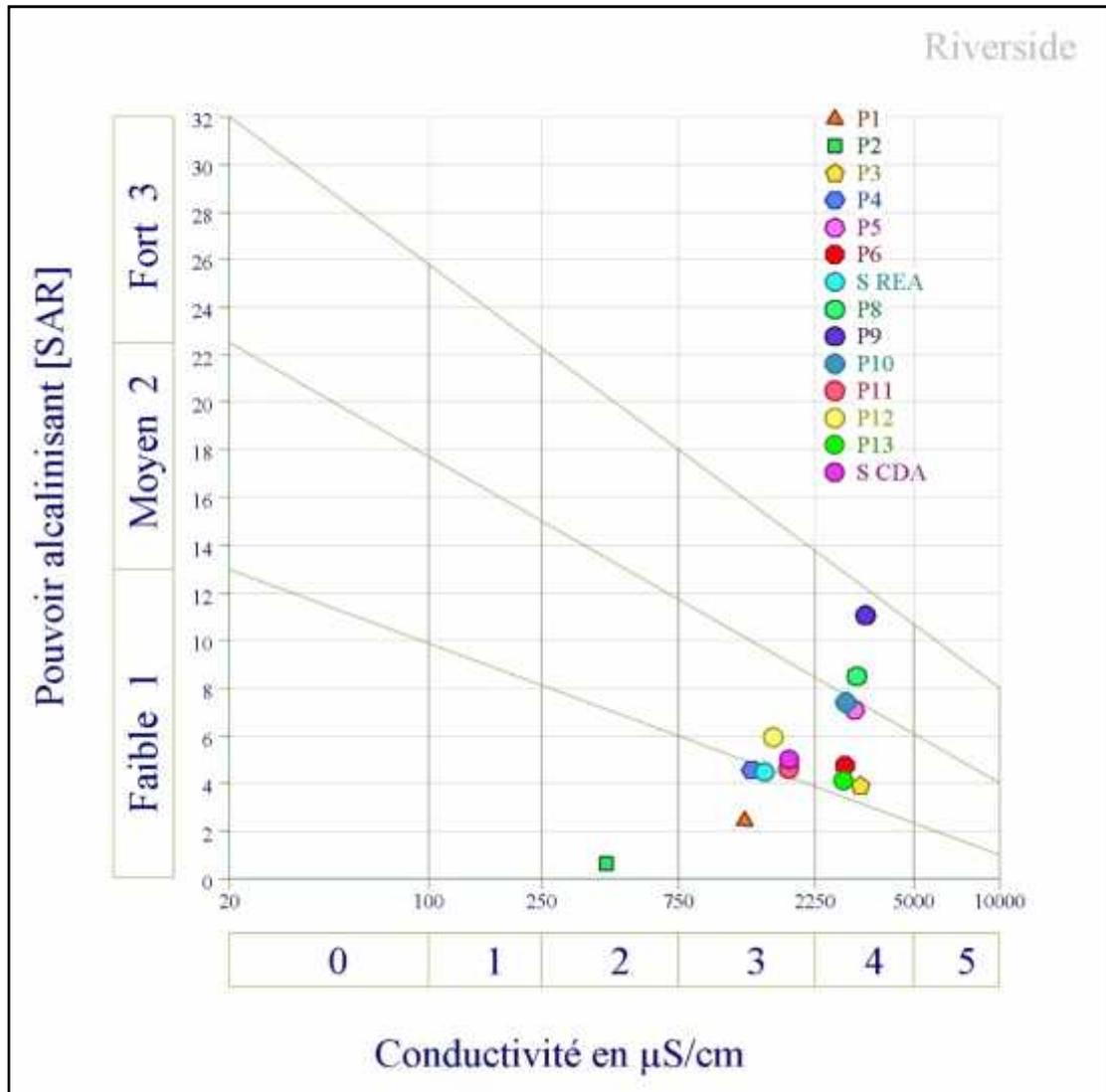


Fig. n° 46 : Représentation graphique sur le diagramme de Riverside.

7-Conclusion :

La minéralisation des eaux échantillonnées de la région d'étude varie de 400 mg/l à 3060 mg/l. Deux grands faciès chimiques se dégagent :

1 - la majorité des points d'eaux du plateau présentent un faciès chloruré-sodique (1, 3, 5, 6,7, 8, 9, 10,11, 12, 13 et 14). Ce faciès caractérise les eaux du complexe dunaire ainsi que ceux circulant dans les niveaux alluvionnaires.

Plus particulièrement, les eaux du complexe dunaire semblent se caractériser par un sous-faciès bicarbonaté-calcique (puits n° 11 et 12) et un sous-faciès sulfaté-calcique (puits n° 13 et 14).

Les eaux circulant dans les niveaux alluvionnaires se caractérisent quant à eux essentiellement par un sous-faciès bicarbonaté-magnésien (puits n° 3, 5, 7, 8, 9 et 10).

2 - les eaux des formations carbonatées (zone d'El Hassi) se manifestent par un faciès bicarbonaté-calcique (puits 1, 2 et 4). Un sous-faciès chloruré-magnésien caractérise les eaux dans la zone de recharge (puits n° 2) tandis que le sous-faciès chloruré-sodique constitue un sous-faciès de transition vers la zone alluvionnaire.

De la répartition spatiale des différents paramètres étudiés, il ressort qu'au niveau de la zone d'étude, la nature hydrochimique des eaux est déterminée essentiellement par la nature lithologique des formations des zones de recharge, calcaires du messinien ou complexe dunaire, par les distances parcourues ainsi que par l'amointrissement de la profondeur du niveau piézométrique, essentiellement au niveau de la zone alluvionnaire centrée sur le secteur de Dayet Morcelly..

L'étude statistique, par analyse en composante principale (ACP), a confirmé et bien précisé les affinités entre les différents ions renseignant sur l'origine ainsi que les regroupements spatiaux des échantillons étudiés. La méthode par "Classification Ascendante Hiérarchique" a débouché quant à elle à une classification par niveau de minéralisation.

Du point de vue de la qualité des eaux pour l'irrigation, la majorité des eaux des points étudiés présentent des risques de salinisation moyens et de forts risques de sodisation.

Chapitre III

Etude des éléments indicateurs de pollution

Etude des éléments indicateurs de pollution :

1- Définitions :

1-1- Définition de la pollution de l'eau :

Une eau est polluée lorsque, sous l'effet de l'activité humaine, elle devient impropre à satisfaire la demande d'utilisation où qu'elle présente un danger pour l'environnement (G. Castany, 1982). Les causes naturelles de la dégradation de la qualité de l'eau souterraine sont donc exclues de ce concept.

1-2- Origine de la pollution :

Selon l'origine de pollution, on peut distinguer trois grands groupes de pollution : urbaine, agricole et industrielle.

1-2-1- La pollution d'origine urbaine :

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.

1-2-1-1- La pollution organique :

Deux formes peuvent être distinguées :

a) **La pollution organique biodégradable** : issue des eaux ménagères (toilettes, lavages divers, etc.). Ce type de pollution est facilement éliminé, soit par le pouvoir auto-épuratoire au niveau du sol, soit par l'épuration biologique dans les stations d'épuration.

b) **La pollution organique difficilement biodégradable** : elle correspond en grande partie aux détergents synthétiques contenus dans les produits de nettoyage domestique. L'inconvénient de leur présence dans l'eau réside dans l'apparition de mousse qui diminue l'oxygénation de l'eau et perturbe le fonctionnement des stations d'épuration.

1-2-1-2- La pollution bactériologique :

Elle est due aux microorganismes pathogènes qui peuvent être présents dans l'eau.

1-2-2-Pollution d'origine agricole :

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 (insecticides, fongicides, herbicides, etc.).

L'utilisation irrationnelle de ces produits peut entraîner des risques graves et polluer les eaux souterraines.

1-2-3-Pollution d'origine industrielle :

Elle peut être provoquée par les 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.

1-3- Types des polluants**1-3-1- Les principaux éléments indicateurs de la pollution organique :****a- L'ammonium:**

L'ammonium est souvent rencontré dans l'eau. Il traduit habituellement un processus de dégradation incomplète de la matière organique. Généralement, l'ammoniaque se transforme rapidement en nitrites (NO_2) et en nitrates (NO_3) par oxydation. L'O.M.S préconise pour l'eau potable comme teneur en ammonium une valeur admissible maximale de 0.5 mg/l.

b- Les nitrites :

Les nitrites peuvent être présents dans l'eau mais généralement à des doses faibles. Ils peuvent avoir comme origine l'oxydation incomplète de l'ammoniaque, ou bien une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiante.

Pour l'eau destinée à la consommation humaine, il est recommandé comme valeur limite 0.1 mg/l l (annexe n°03).

c- Les nitrates (NO_3) :

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 résiduaires, 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. En outre, ils peuvent avoir des mauvaises conséquences sur la vie de la faune aquatique et causer l'eutrophisation.

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

c- 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 de surface ou 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 (annexe n°03).

e- 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 goût dans l'eau. En plus, une teneur élevée en matières organiques pourrait faire suspecter une contamination microbienne.

f- La matière en suspension :

La teneur et la composition minérale et organique des matières en suspension dans les eaux sont très variables. Elles sont 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).

1-3-2- La pollution bactériologique

Une eau potable ne doit pas contenir d'organismes pathogènes, tout au moins en quantité susceptible de provoquer une contamination chez les personnes les plus sensibles ;

il pourrait donc sembler souhaitable que soit effectué la recherche de tous les germes responsables des maladies transmises par voie hydrique.

1-3-2-1- Bactéries indicatrices de contamination fécale :

Les micro-organismes, ayant pour origine la pollution fécale de l'eau, sont très nombreux et très variés et ne peuvent donc faire l'objet d'une recherche spécifique. De plus leur identification est très difficile, voire impossible dans le cas de virus. En outre, leur durée de vie peut être très courte.

Pour ces différentes raisons, il est préférable de rechercher des germes qui sont toujours présents en grand nombre dans les matières fécales des hommes et des animaux à sang chaud, qui se maintiennent plus facilement dans le milieu extérieur et qui sont clairement identifiés.

Ces germes sont dénommés "germes indicateurs" d'une contamination fécale. Leur mise en évidence dans l'eau n'est pas la preuve de la présence de danger, mais elle permet de le suspecter fortement.

Ces germes sont :

a- Les coliformes totaux : ce sont des bactéries en formes de bâtonnet, aérobies ou anaérobies facultatives. Ils se présentent naturellement dans le sol et dans le tube digestif des humains et des animaux. Par conséquent, leur présence dans l'eau pourrait indiquer une contamination fécale et également pourrait signifier que les eaux de surface s'infiltrent dans la nappe.

b- Les coliformes fécaux : ce sont un sous groupe des coliformes totaux, mais ils sont présents uniquement dans l'intestin des humains et des animaux. L'espèce la plus fréquemment associée à ce groupe bactérien est l'*Escherichia Coli* (E.coli).

Leur présence, dans l'eau d'un puits, indique sûrement une pollution d'origine fécale issue du fumier ou des eaux usées provenant d'une fosse septique avoisinante.

c- Les streptocoques fécaux : ce sont d'excellents indicateurs de pollution et sont généralement pris en compte comme des témoins de pollution fécale, car tous ont un habitat fécal.

1-3-2-2- Autres bactéries pathogènes :

A ces trois groupes, s'ajoutent d'autres bactéries pathogènes qui font l'objet d'analyses bactériologiques spécifiques du fait qu'elles sont à l'origine de maladies très dangereuses. Ces bactéries sont :

a- Le Vibriion Cholérae : cette bactérie provoque une maladie strictement humaine, le Choléra qui est une toxi-infection intestinales aigue,

b - La Salmonella : elle est responsable de la maladie typhoïde,

c- Le clostridium sulfito-réducteur : ce germe est présent dans la nature et également dans la flore intestinale de l'homme et de certains animaux. Il peut être responsable d'infections graves.

1-3-2-3- Les normes de qualité de l'eau :

L'eau doit être exempte de micro-organismes pathogènes et des micro-organismes indicateurs d'une contamination fécale.

La norme algérienne relative aux spécifications microbiologiques des produits alimentaires définit pour les eaux de distribution traitées les critères indiqués au tableau n° 29. Cette norme s'inspire de la norme O.M.S pour les eaux potables.

Tableau n° 29: Critères microbiologiques des eaux de distribution traitée selon la norme algérienne (Joradp, 1994).

Paramètres bactériologiques	Unités	Normes
Coliformes totaux	nombre de colonies/100ml	<10
Coliformes fécaux	nombre de colonies/100ml	00
Streptocoques fécaux	nombre de colonies/100ml	00
Clostridium sulfito-réducteur	nombre de colonies/20ml	00
Salmonella	/	Absence
Vibriion cholérae	/	Absence

I-3-3- La pollution par les métaux lourds :

Il est difficile de définir avec précision quels sont les polluants toxiques car la toxicité dépendent non seulement de la nature et de la concentration de ces agents mais aussi des caractéristiques du milieu récepteur (température, pH, présence d'autres éléments organiques ou minéraux, etc.).

Parallèlement à leur présence naturelle dans les eaux souterraines en fonction de la nature de sous-sol, la pollution métallique sous forme dissoute ou particulaire est souvent d'origine anthropique. Les sources majeures de Cadmium, cuivre, plomb, zinc, etc. sont les usines thermiques, la production primaire de métaux non ferreux et l'incinération d'ordures ménagères.

En milieu urbain et industrielle et lors d'un événement pluvieux, la pluie lessive tout d'abord l'atmosphère, corrode les différentes surfaces urbaines (toitures, façade de bâtiments, etc.), 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.

Les principaux éléments toxiques sont :

a) - 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 0.3 mg/l (annexe n°04).

b) - 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, etc.), 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.

c) - Le cuivre :

Il 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.

d) - 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 de laiton ou de fer galvanisé, attaquées par les eaux agressives ou riches en chlorures et sulfates.

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

D'un point de vue physiologique, il apparaît surtout que 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 (annexe n°04).

e) - 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.

Ce métal est actuellement si répandu et utilisé dans l'industrie que les possibilités de pollution sont extrêmement nombreuses et variées. Les activités humaines (emploi de plomb tétraéthyl dans les carburants comme anti-détonant, 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 0.1 mg/l.

f) - Le chrome :

Le chrome est présent en petites quantités dans la nature. Il est plus important 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.

I-2-3-2- Sources de pollution des substances toxiques :

Les sources industrielles de pollution par substances toxiques sont variées (J.F. Busse, 1980).

Tableau n° 30 : Les sources industrielles de pollution par des substances toxiques (J.F. Busse, 1980).

Sources (industrie)	Substances					Toxiques							
	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Cn	Pb	Se
Alliage		;		;									;
Céramique- Verrerie					;			;	;	;			
Chimie		;											
Colorants		;		;	;				;				
Cosmétiques					;				;				
Désinfection		;											
Galvanoplastie		;						;		;	;	;	
Papeterie		;											
Pesticides			;		;			;		;			
Peintures –Vernis					;			;					;
Pharmacie					;								
Photographie					;								;
Station d'épuration					;								

I-2-3-3- Mécanismes de migration et atténuation des polluants des nappes :

Entre la surface de sol et la surface piézométrique des nappes d'eau souterraines, les polluants subissent diverses formes de dégradations liées à la nature du sous-sol.

La vitesse d'écoulement n'est pas le seul mécanisme de migration des polluants dans un milieu perméable. Parallèlement aux processus hydrodynamiques, d'autres mécanismes liés à la nature du polluant et au milieu sont déterminants pour évaluer l'atténuation des contaminants.

Les principales réactions d'atténuation sont :

- les processus physiques (filtration, rétention capillaire, etc.).
- les processus biochimiques (biodégradation, etc.),

- les processus chimiques (précipitation et co-précipitation, etc.).

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

La localisation de la nappe d'eau souterraine dans une zone urbaine génère des risques de pollutions multiformes issues des activités domestiques, agricoles et industrielles.

A cela s'ajoute l'existence d'un réseau d'assainissement souvent vétuste entraînant d'importantes fuites d'eaux usées dans le sous-sol. Notons également l'existence d'importantes zones d'habitation et autres (Planteur, Ras- El Ain, El Hassi, etc.) ne disposant pas d'un réseau d'assainissement d'où le rejet des eaux usées dans des fosses perdues, creusées dans des formations carbonatées karstifiées (secteur occidental) qui n'assurent aucune filtration des éléments polluants qui peuvent migrer dans le sous sol à une vitesse très rapide.

Au sud de la zone urbaine se maintient une ceinture d'activité agricole utilisatrice d'engrais, pesticides, etc. Cela peut également participer à une pollution diffuse des eaux souterraines de la zone d'étude.

A cela s'ajoute la présence au sein de l'agglomération, de cimetières, de décharges sauvages, dépôts d'hydrocarbures, etc.

L'étude de certains éléments indicateurs de pollution contenus dans les eaux souterraines permet d'apprécier leurs degrés de vulnérabilité aux activités de surface.

2-2-Analyse des éléments indicateurs de pollution dans la zone d'étude :

Pour apprécier l'effet possible de la pollution des eaux souterraines dans la zone étudiée, nous avons procédé à l'étude de certains éléments indicateurs de pollution contenus dans les eaux souterraines afin d'évaluer le degré de vulnérabilité de la nappe à ce type de pollution.

A cet effet, l'analyse des échantillons d'eau prélevés a concerné, en plus des éléments chimiques majeurs, certains éléments indicateurs de pollution. Les résultats de l'analyse de ces derniers sont figurés dans le tableau n° 31.

Les principaux éléments analysés sont : les nitrates, les nitrites, l'ammonium, les phosphates, la matière organique acide, la matière en suspension, la silice et la turbidité.

La détection de ces éléments dans l'eau ou de leur non-conformité aux normes de potabilité pourrait informer de l'impropreté ou non à la consommation humaine des eaux échantillonnées.

Tableau n° 31: Résultats de l'analyse physico-chimique des éléments indicateurs de pollution des points d'eau prélevés (24/25-10-2011).

N°	Els. chimiques	NO ₃ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	Phosphates (mg/l)	MO Acide (mg/l)	MES (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	Turbidité (NTU)
	Points d'eau								
1	Puits "Mayouche"	66	0	0.05	0.05	1	2	20	1
2	Puits "Aroussi"	6	0	0.03	0.05	0.1	2	7.6	1
3	Puits "Moulgada"	89	0.02	0.05	0.06	6.3	4	25.9	2
4	Puits des "Amandiers"	52	0.01	0.03	0.05	0.1	5	19.5	4
5	Puits "Krachai"	68	0.01	0.05	0.04	6.3	2.3	16.9	1
6	Puits "Yaghmorassen"	69	0.02	0.06	0.03	4.3	3.2	20.5	2.4
7	Source "Ras El Ain"	71	0.01	0.03	0.01	3.5	4	17.6	2
8	Puits "Inesmo"	46	0.01	0.05	0.06	3.8	6	20.3	3
9	Puits "Mediouni"	94	0.02	0.1	0.1	5.1	2	23.8	1
10	Puits "Petit-Lac"	151	0.01	0.05	0.1	3.9	3	22.9	2
11	Puits "HLM"	35	0.09	0.04	0.05	2.4	25	20.2	3
12	Puits "Saint Eugène"	70	0.07	0.01	0.1	4.6	24	19.2	4
13	Puits "Saint Pierre"	68	0.06	0.05	0.04	3.6	12	7.2	4.6
14	Source de "Cueva Del Agua"	74	0.01	0.04	0.02	2.2	2	19.7	1

2-2-1- Les éléments nutritifs :**a) Les nitrates :**

D'après les résultats des analyses, on constate pour la plupart des points d'eau une teneur élevée en nitrates dépassant largement les normes de potabilité (fig. n° 45). Elle atteint un maximum au niveau du puits n° 10 (151 mg/l).

La plus faible teneur en nitrates se retrouve dans les eaux du puits n° 2 situé en amont de la zone urbanisée et loin de tout secteur d'activité agricole.

L'existence des nitrates à faible concentration aux puits H.L.M (35 mg/l) et Inesmo (46mg/l) est dû au fait que dans ces secteurs la zone non saturée de la nappe est importante et protégée à sa partie supérieure par une couche superficielle peu perméable.

b) Les nitrites :

Contrairement aux nitrates, les teneurs en nitrites dans tous les points d'eau sont faibles, en dessous des normes de potabilité. Elles s'échelonnent entre 0 mg/l et 0.09mg/l (fig. n° 46).

c) L'ammonium :

Dans notre secteur d'étude, les résultats obtenus sont nettement inférieurs aux normes de potabilité admises (0.5 mg/l) (fig.47).

d) Les phosphates :

Les valeurs les plus élevées de la teneur en phosphates se retrouvent au puits n° 9 (0.10 mg/l). Pour tous les autres puits, les teneurs restent faibles, inférieures aux normes de potabilité (0.4 mg/l) (fig. n°48).

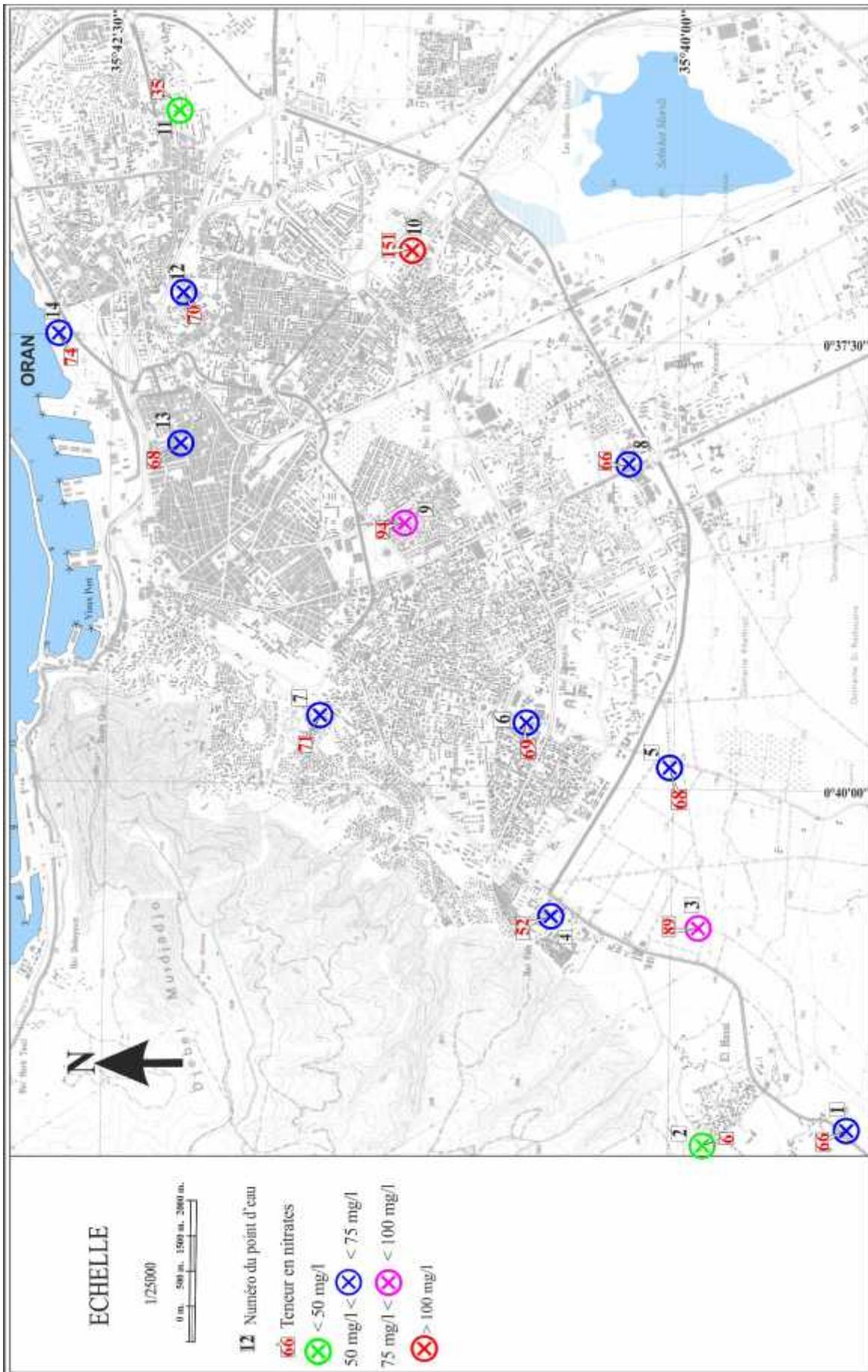


Fig. n° 47 : Carte des teneurs en nitrates (mg/l) des points d'eau (campagne du 24-25/10/2011).

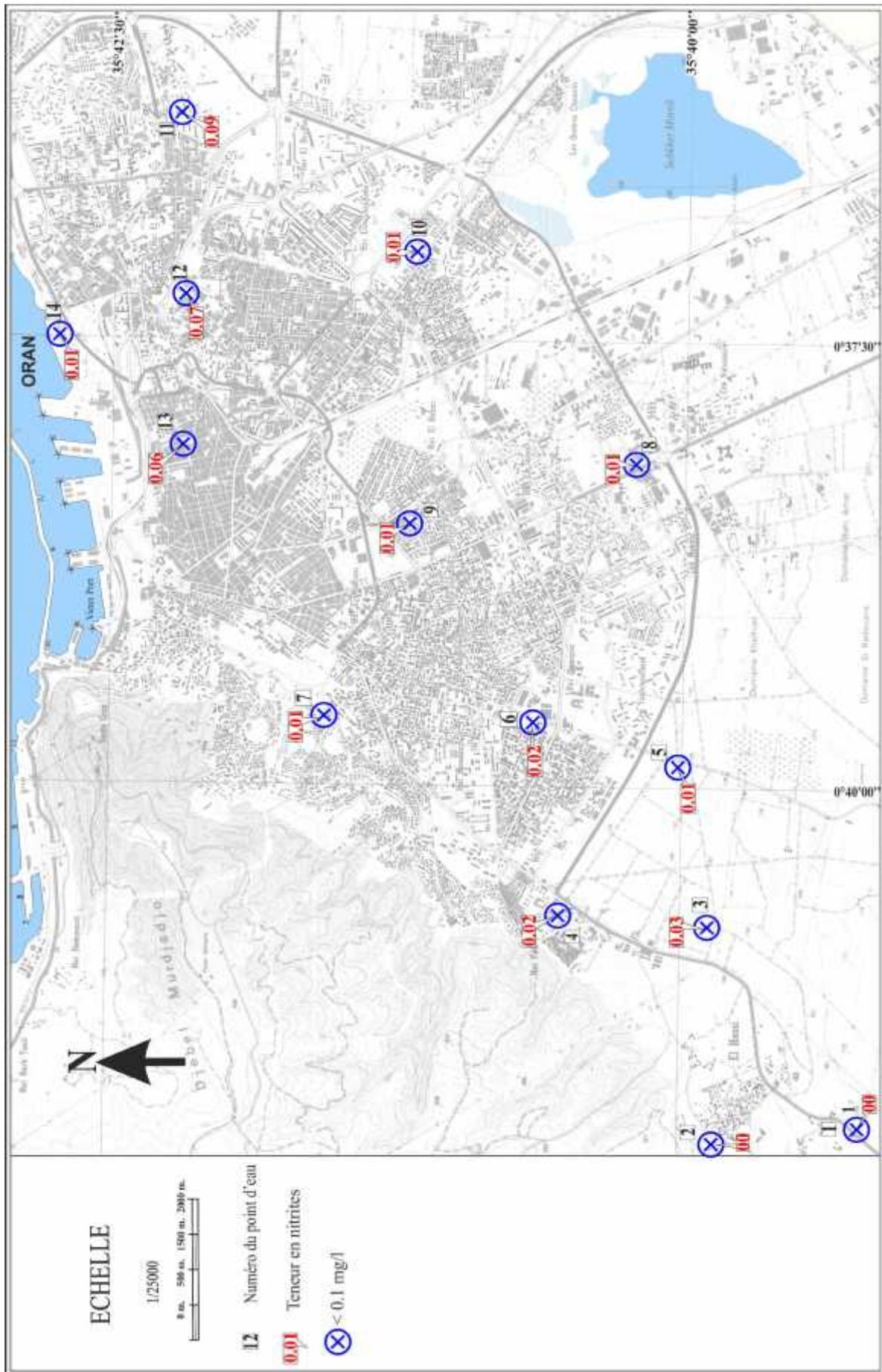


Fig. n° 48: Carte des teneurs en nitrites (mg/l) des points d'eau (campagne du 24-25/10/2011).

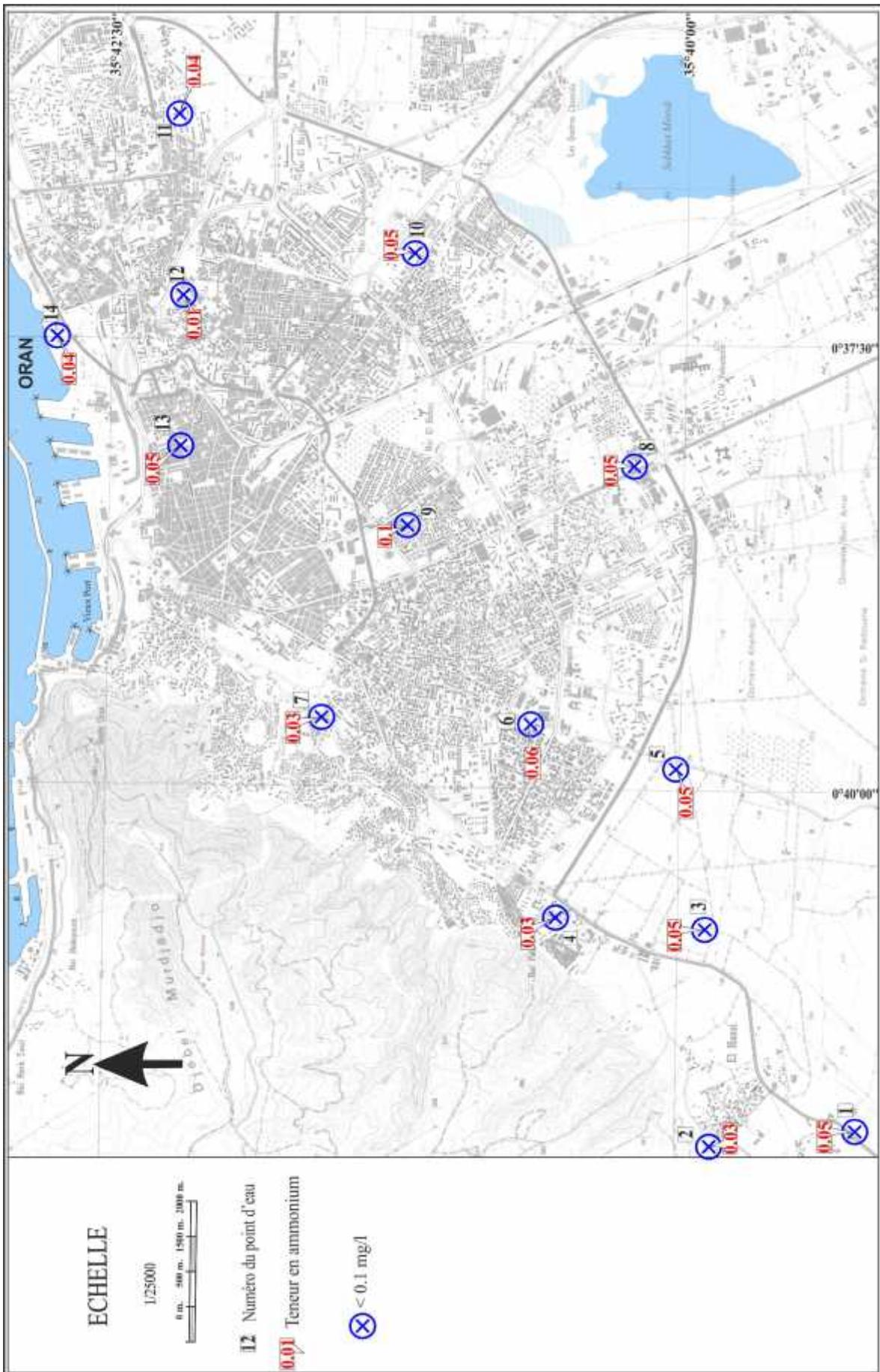


Fig. n° 49 : Carte des teneurs en ammonium (mg/l) des points d'eau (campagne du 24-25/10/2011).

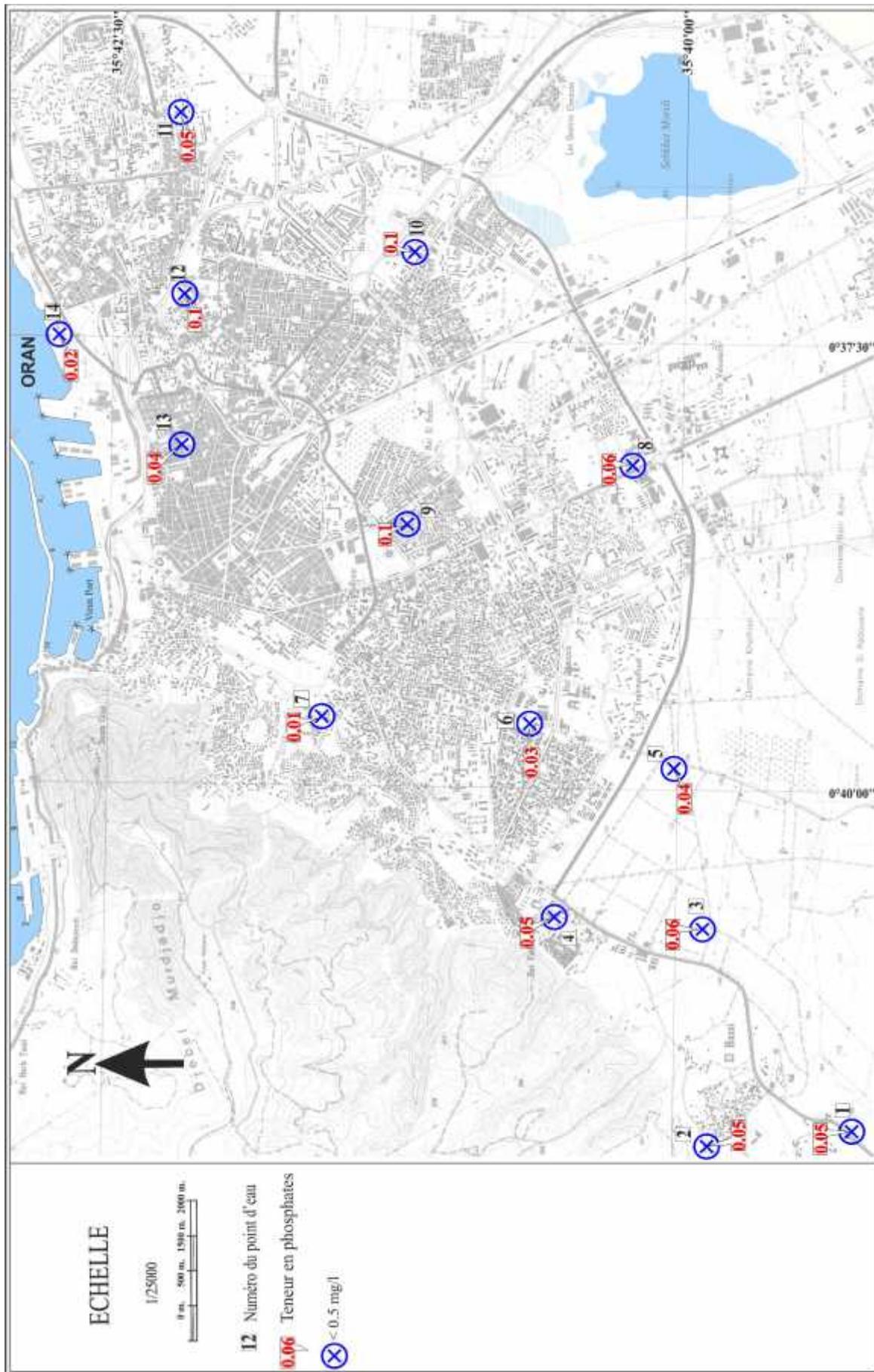


Fig. n° 50 : Carte des teneurs en phosphates (mg/l) des points d'eau (campagne du 24-25/10/2011).

e)- Les matières organiques ::

Les résultats d'analyse indiquent que les eaux souterraines du secteur étudié ne présentent pas des teneurs élevées en matières organiques acides. Le maximum est enregistré au niveau de puits de Moulgada (6.3 mg/l). Les matières organiques basiques n'ont pas été dosées.

f)- Les matières en suspension :

Les eaux souterraines du secteur étudié ne possèdent pas une forte teneur en MES. La valeur maximale est constatée au puits n° 11 (25 mg/l).

2-2-2- la silice :

La silice est rencontrée dans l'eau, soit à l'état dissous, soit à l'état colloïdal; les eaux des régions granitiques peuvent en contenir plusieurs dizaines de milligrammes par litre. Une eau potable de bonne qualité ne contient pas plus de 20 mg/l de silice. Selon les normes de l'O.M.S, il n'est pas recommandé une valeur maximale admissible. Cependant, il faut que les concentrations ne puissent pas entraîner directement ou indirectement un risque pour la santé publique.

Dans notre secteur d'étude, les valeurs des teneurs en silice s'échelonnent entre 7.2 mg/l (puits n°2) et 25.9 mg/l (puits n°3).

2-2-3- Analyses bactériologiques

Lors de la campagne d'octobre 2011, nous n'avons pas prélevé d'échantillons d'eau pour l'analyse bactériologique par défaut d'accord de laboratoire d'analyse. A cet effet, nous nous limiterons à présenter dans le présent travail, les résultats d'une campagne de prélèvement que nous avons effectué le 04 juin 2006 (Adda M. & Bouchenouk I., 2007). Cette campagne avait ciblé la partie occidentale de l'agglomération, entre El Hassi et Ras El Ain. Les points n°1, 3, 4 et 7 avaient été concernés par cette campagne (tableau n° 32 & figure n° 49).

Les analyses bactériologiques des échantillons d'eau avaient été réalisées au niveau du Laboratoire Régional d'Hygiène de la Wilaya d'Oran et ont concerné les eaux échantillonnées au cours de deux campagnes de prélèvement réalisées respectivement le 04 juin 2006 et le 01 juillet 2006.

Comme pour toute eau de puits ou de sources, les paramètres ciblés et analysés ont été :

- les coliformes totaux,
- les coliformes fécaux,
- les streptocoques fécaux,
- le vibrion cholerae,
- le clostridium sulfito-réducteur.

Tableau n° 32: Présentation des résultats de l'analyse bactériologique des eaux souterraines de la partie occidentale (campagnes du 04 juin 2006 et du 01 juillet 2006).

N°	Paramètres recherchés Points d'eau	Coliformes totaux (n C/100ml)	Coliformes fécaux (n C/100ml)	Streptocoques fécaux (n C/100ml)	Spores de clostridium sulfito-réducteur	Vibrion NAG (/450ml)	Autres germes
1	Puits "Mayouche"	07	00	00	/	absence	/
		09	00	00	/	absence	/
3	Puits "Moulgada"	150	00	00	/	absence	/
		150	00	00	/	absence	/
4	Puits des "Amandiers"	15	00	00	/	absence	/
		/	/	/	/	/	/
7	Source "Ras El Ain"	210	00	00	/	Vibrion NAG	/
		1400	00	93	/	absence	/
23	Puits "Labiad Rachid"	00	00	00	/	absence	/
		00	00	00	/	absence	/
24	Puits "Coca" (EMIS)	07	00	00	/	absence	Pseu. aé.
		00	00	00	/	absence	Pseu. aé.
25	Puits "Benya mina"	00	00	00	/	absence	/
		03	00	00	/	absence	/
27	Puits "lavage prestige"	28	00	00	/	absence	Pseu. aé.
		75	07	00	/	absence	/
28	Puits "Baaziz"	09	00	00	/	absence	/
		09	00	00	/	absence	/
29	Puits "Bentorki"	75	00	00	/	absence	/
		210	00	00	/	absence	/
31	Puits "Djelti"	00	00	00	/	absence	Pseu. aé.
		/	/	/	/	/	/
32	Puits "ferme Pénitentiaire"	1400	00	00	/	absence	/
		1400	00	00	/	absence	/

Pseu. aé. : *Pseudomonas aërogénosa*

La recherche et le dénombrement des coliformes ont été faits par la méthode de détermination du nombre le plus probable (NPP), par inoculation de tubes en milieu liquide (Rodier, 1984).

L'analyse avait également ciblé les germes *Pseudomonas* aérogénosa. Ces germes d'origine non fécale sont responsables en pathologie humaine de nombreuses infections de gravité et de localisation très diverses : suppurations locales après blessures et brûlures, infections des yeux et des oreilles, infections des tractus urinaires et digestifs, etc.

2-2-3-1- Résultats et discussion :

Dans le tableau n° 33, nous présentons les résultats des analyses bactériologiques des différents points d'eau lors des deux campagnes.

Tableau n° 33: Interprétation des résultats d'analyse bactériologique selon les normes algériennes.

Points d'eau n° :	Qualités bactériologiques	Observations
23 et 25	bonne qualité bactériologique	propres à la consommation humaine de point de vue bactériologique
01 et 28	qualité bactériologique médiocre (<10 colonies de coliformes totaux / 100 ml avec l'absence des autres germes)	susceptibles d'être consommées (le traitement reste nécessaire).
03, 04, 07, 24, 27, 29, 31 et 32	mauvaise qualité bactériologique	impropres à la consommation humaine et nécessitent une désinfection immédiate.

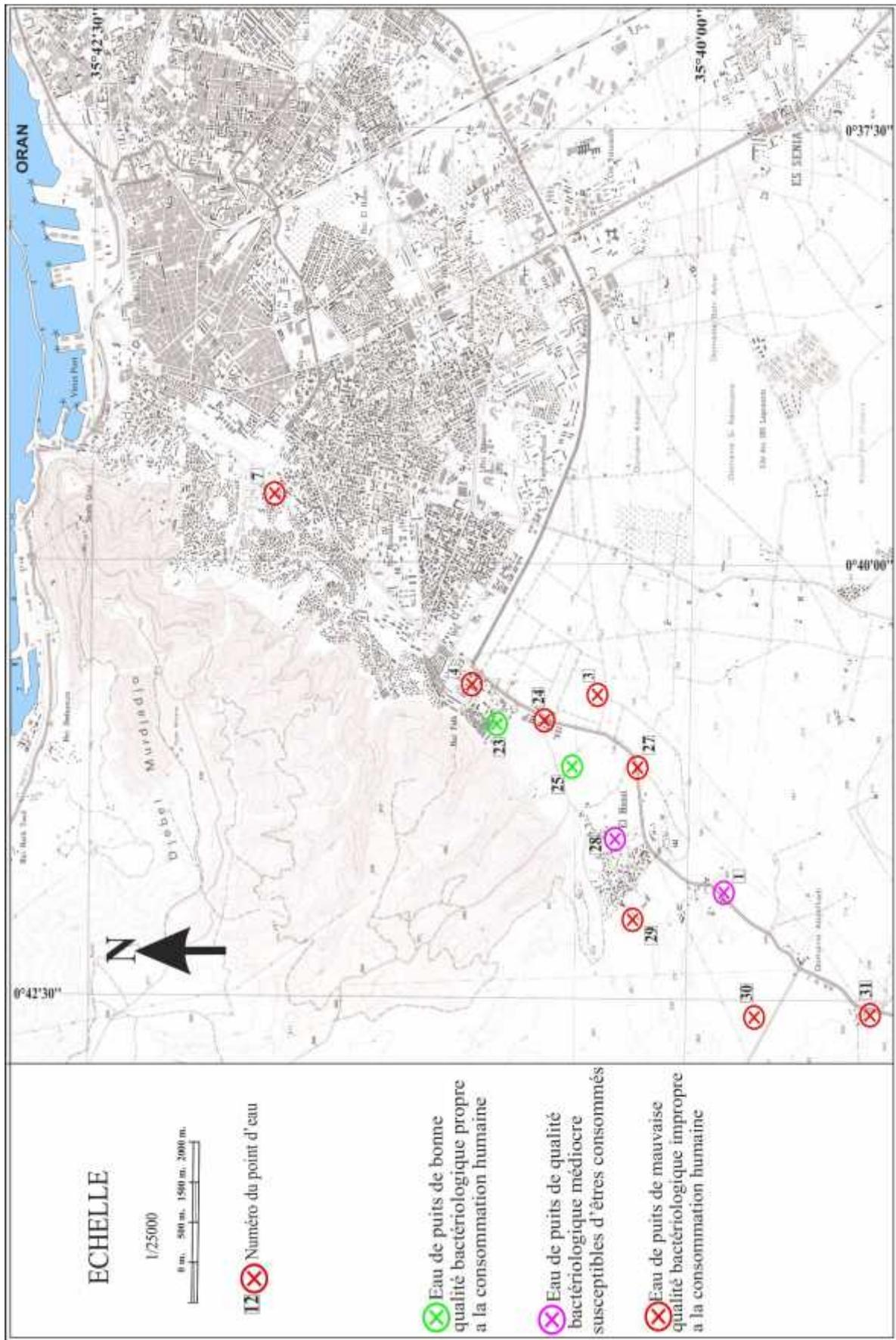


Fig. n° 51 : Carte de la qualité bactériologique des points d'eau (campagnes du 04 juin 2006)

- les eaux des puits 23 et 25 (situés dans le secteur du puits 2) présentent une bonne qualité bactériologique : teneur nulle en tout "germe indicateur",

- les eaux des puits n° 1 et 28 présentent des qualités bactériologiques médiocres avec des teneurs en coliformes totaux de l'ordre de 09 colonies/100ml et absence totale des autres germes,

- les eaux des puits n° 24 et 31 se caractérisent également par des teneurs conformes en "germes indicateurs" avec toutefois présence du germe *Pseudomonas aérogénosa*, ce qui les rend non potables et non utilisables pour bain de douche. Ceci est également le cas pour le puits n° 27.

- Les eaux de la source de Ras El Ain ainsi que des puits n° 3, 4, 26, 27, 29 et 31 présentent des teneurs en coliformes totaux supérieures à 10 colonies/100 ml.

- La teneur en coliformes totaux est particulièrement élevée à la source de Ras El Ain (1400 colonies/100 ml : campagne 2) où l'on note également la présence de *Streptocoques fécaux* (93 colonies/100 ml) et la présence de *Vibrien NAG* (vibrien non agglutinant) dans les eaux prélevées au cours de la campagne n° 1. Les eaux de cette source présentent également une importante variabilité de teneur en coliformes totaux : rapport de 7 entre la première et la deuxième campagne.

2-3 – Teneurs en éléments mineurs (métaux lourds) des eaux souterraines de l'agglomération :

Par manque de moyens d'analyse en laboratoire, lors du présent travail, il ne nous a pas été possible d'effectuer des mesures d'éléments mineurs sur les eaux prélevées. Néanmoins, il se trouve que la majorité des points d'eau étudiés lors de cette campagne avaient fait l'objet d'une opération de prélèvements et d'analyses des eaux souterraines, étalée sur trois campagnes, durant la période 2000/2001 (Hamadou H. et Zouaoui A, 2001). Pour rendre compte de l'ensemble des risques de pollution affectant la nappe s'étendant sous l'agglomération oranaise et avoir une vue plus large sur l'état de qualité des eaux souterraine, il nous a paru utile d'exploiter une partie des données des précédentes campagnes.

Les trois campagnes s'étaient déroulées respectivement le 31/10/2000, 14/11/2000 et du 29/01/2000. Les analyses ont été effectuées au niveau du laboratoire de chimie de la

Direction régionale Ouest de l'ANRH. Le tableau n° 34 regroupe les concentrations éléments mineurs lors de ces trois campagnes, notées 1, 2 et 3.

Tableau n° 34: Représentation des résultats de l'analyse chimique des éléments mineurs.

N°	Eléments chimiques	Numéros des campagnes	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cr (mg/l)
	Points d'eau							
4	Puits des Amandiers	01	0.490	0.016	0.007	0.265	0.066	0.003
		02	0.199	0.015	0.023	0.216	0.199	0.010
		03	0.121	0.005	0.023	0.978	0.089	0.010
7	Source de Ras El-Ain	01	0.182	0.024	0.014	0.018	0.083	0.009
		02	0.122	0.013	0.012	0.430	0.122	0.002
		03	0.070	0.015	0.023	0.883	0.041	0.006
8	Puits de l'Inesmo	01	0.328	0.016	0.039	0.295	0.059	00.00
		02	0.070	0.003	0.030	0.034	0.043	0.034
		03	0.073	0.013	0.005	0.014	0.046	0.021
9	Puits de Mediouni	01	/	/	/	/	/	/
		02	0.027	0.012	0.132	4.200	0.193	0.010
		03	0.114	0.008	0.011	2.104	0.090	0.018
11	Puits des H.L.M	01	0.011	0.183	0.019	0.700	0.087	0.002
		02	0.069	0.208	0.028	0.393	0.069	0.032
		03	0.071	0.125	0.006	1.237	0.007	0.010
12	Puits de St-Eugène	01	/	/	/	/	/	/
		02	0.121	0.007	0.085	4.840	0.167	0.037
		03	0.072	0.014	0.024	5.650	0.026	0.019
13	Puits de St-Pierre	01	0.584	0.022	0.019	0.501	0.062	0.001
		02	0.105	0.025	0.028	0.302	0.105	0.030
		03	0.808	0.022	0.030	3.580	0.065	0.007
14	Source de Cueva Del Agua	01	0.425	0.027	0.064	0.483	0.095	0.003
		02	0.076	0.009	0.024	0.412	0.076	0.006
		03	0.143	0.020	0.019	0.618	0.046	0.018
24	Puits ex-Coca	01	0.213	0.018	0.033	0.036	0.120	0.004
		02	0.194	0.009	0.021	0.201	0.194	0.007
		03	0.133	0.005	0.030	0.427	0.070	0.007
32	Puits de Miramar	01	0.137	0.017	0.066	1.010	0.029	0.003
		02	0.108	0.012	0.034	1.139	0.108	0.015
		03	0.088	0.014	0.028	0.617	0.023	0.012
33	Puits des Abattoirs	01	/	/	/	/	/	/
		02	/	/	/	/	/	/
		03	0.188	0.020	0.027	0.449	0.078	0.046
34	Puits de Dayat Morselly.	01	0.423	0.035	0.040	0.069	0.426	0.049
		02	0.356	0.043	0.065	0.072	0.356	0.050
		03	0.268	0.049	0.078	1.790	0.300	0.056
35	Dayat Morselly.	01	2.013	2.060	0.170	0.306	1.105	0.190
		02	/	/	/	/	/	/
		03	0.782	0.881	0.114	1.480	0.444	0.082
36	Puits Z.I. Es Senia (Districh)	01	0.163	0.034	0.028	0.021	0.123	0.019
		02	0.160	0.010	0.043	1.655	0.160	0.014
		03	0.207	0.018	0.048	0.643	0.076	0.027

Camp.1 : campagne du 31/10/2000

Camp.2 : campagne du 14/11/2000

Camp.3 : campagne du 29/11/2000

2-3-1- Description et répartition spatiale des résultats :

Les résultats représentés dans cette répartition spatiale concernent certains paramètres analysés suite à la deuxième campagne de prélèvements.

a) Le fer : (fig. n° 50)

Les eaux des calcaires : Ras El Ain et P24 (ex Coca) présentent une concentration qui ne dépasse pas les 0.2 mg/l à l'exception du P4 (Amandiers) qui a présenté 0.49 mg/l lors de la campagne n°1, soit au delà de la norme de potabilité qui est de 0.3 mg/l. Au cours de cette même campagne, l'eau de Dayat Morselly a atteint une valeur de 2 mg/l. Les eaux du Calabrien ne dépassent pas les 0.2 mg/l sauf à la source de Cueva Del Agua (0.4 mg/l à la campagne n°1) et au puits de St-Pierre (0.8 mg/l à la campagne n°3).

b) Le manganèse : (fig. n° 51)

Dans les eaux des calcaires, la teneur en manganèse reste inférieure à la valeur limite de potabilité prescrite par l'O.M.S, soit 0.1 mg/l. La teneur varie entre 0.013 mg/l et 0.024 mg/l à la source de Ras El Ain. Au sein du complexe dunaire, la teneur des eaux reste globalement faible et varie entre 0.009 mg/l à Cueva Del Agua et 0.025 mg/l au puits St-Pierre. Seul le puits des H.L.M se caractérise par une teneur atteignant 0.208 mg/l. Dans la zone d'Es-Sénia, les eaux de surface de Dayat Morselly atteignent la valeur maximum de 2,060 mg/l.

c) le cuivre : (fig. n° 52)

Dans les eaux des calcaires, la teneur en cuivre varie entre 0.007 mg/l et 0.033 mg/l, bien en dessous de la norme de potabilité qui est de 0.1 mg/l.

Dans la zone d'Es-Sénia et dans les eaux du Calabrien, les teneurs restent faibles. Les maximums de teneur se trouvent à Dayat Morselly (0.17 mg/l) et au puits de Mediouni (0.132 mg/l).

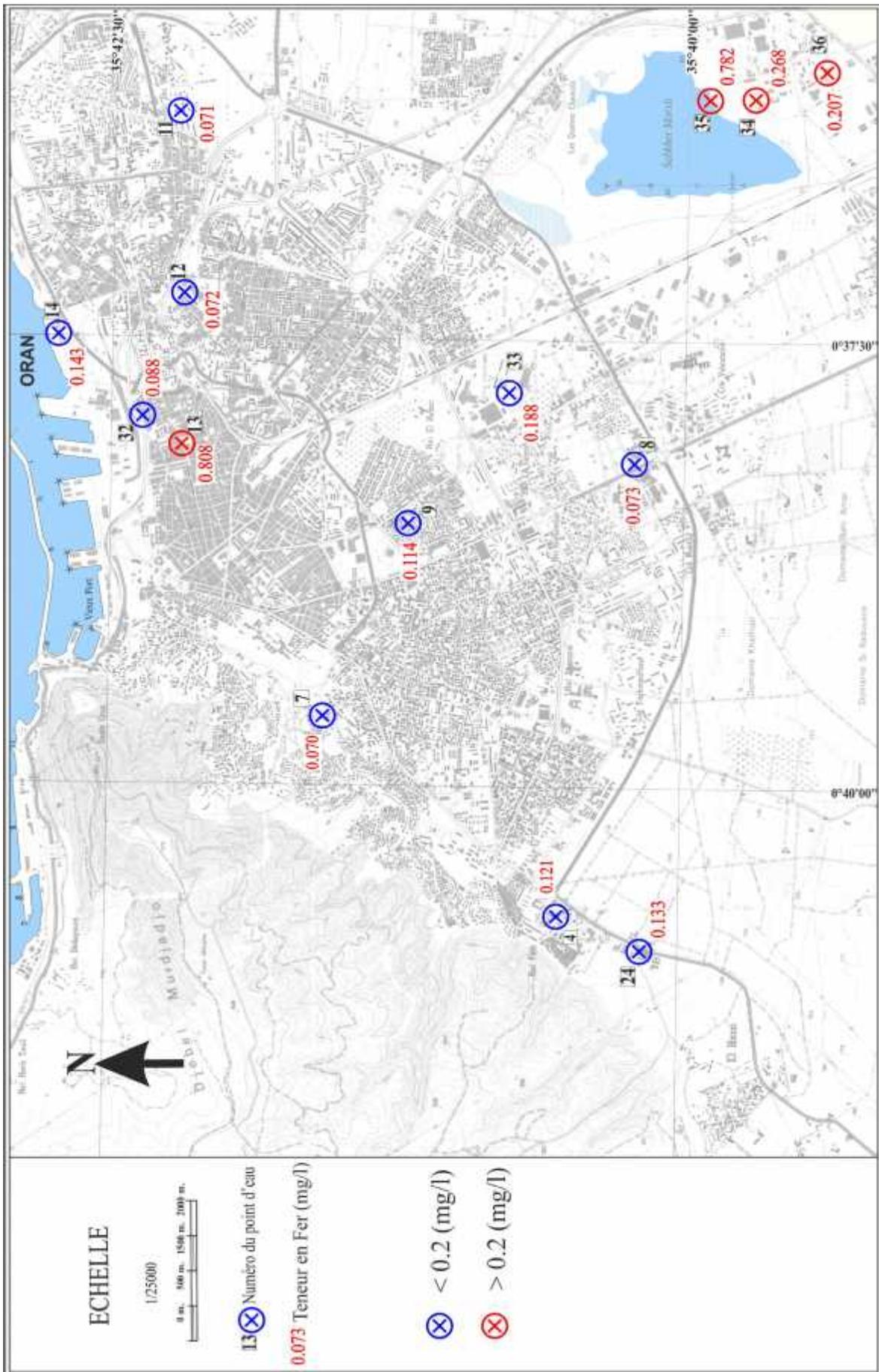


Fig. n° 52 : Carte des teneurs en fer (mg/l) des points d'eau (29/11/2000).

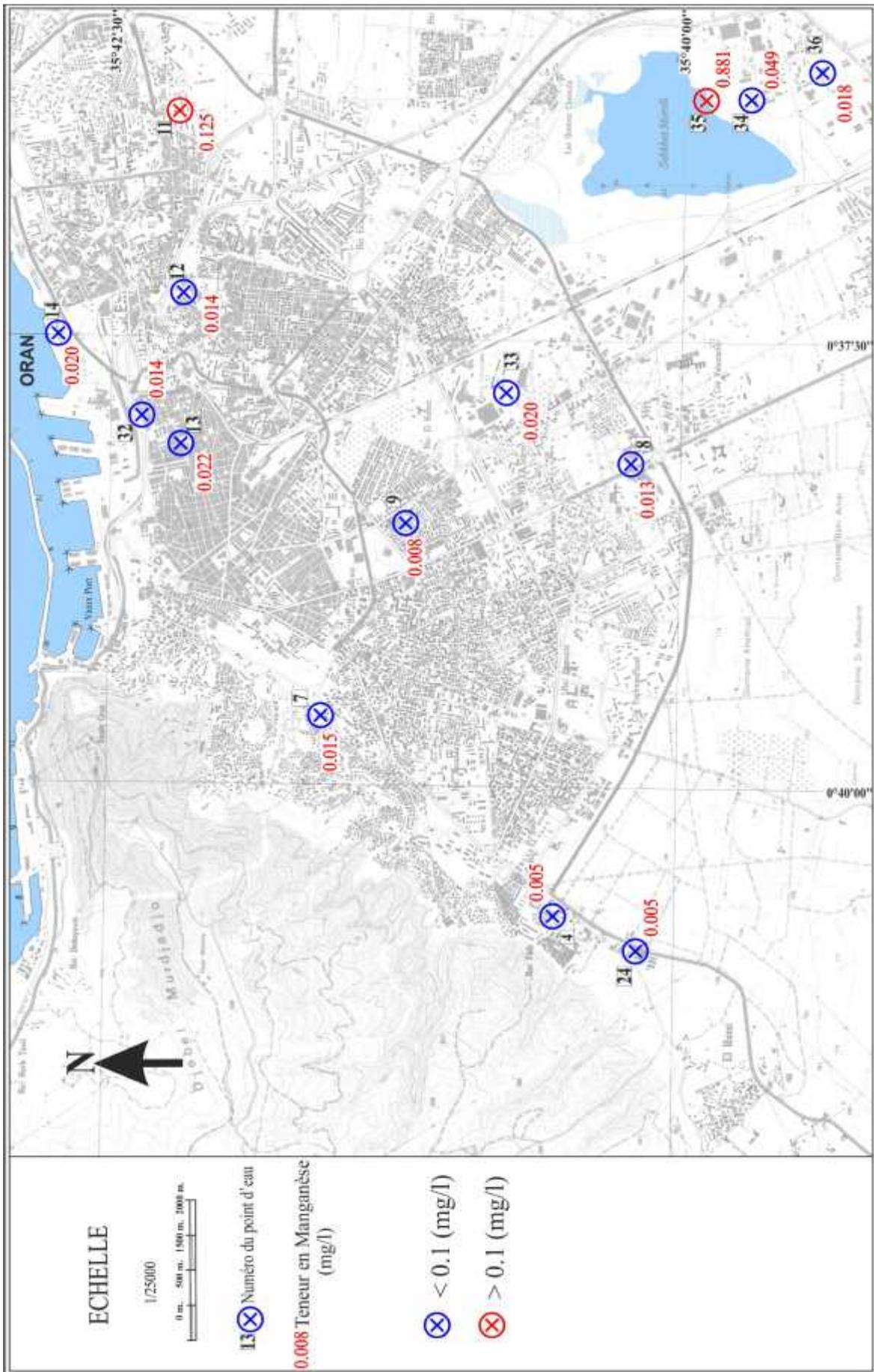


Fig. n° 53: Carte des teneurs en manganèse (mg/l) des points d'eau (29/11/2000).

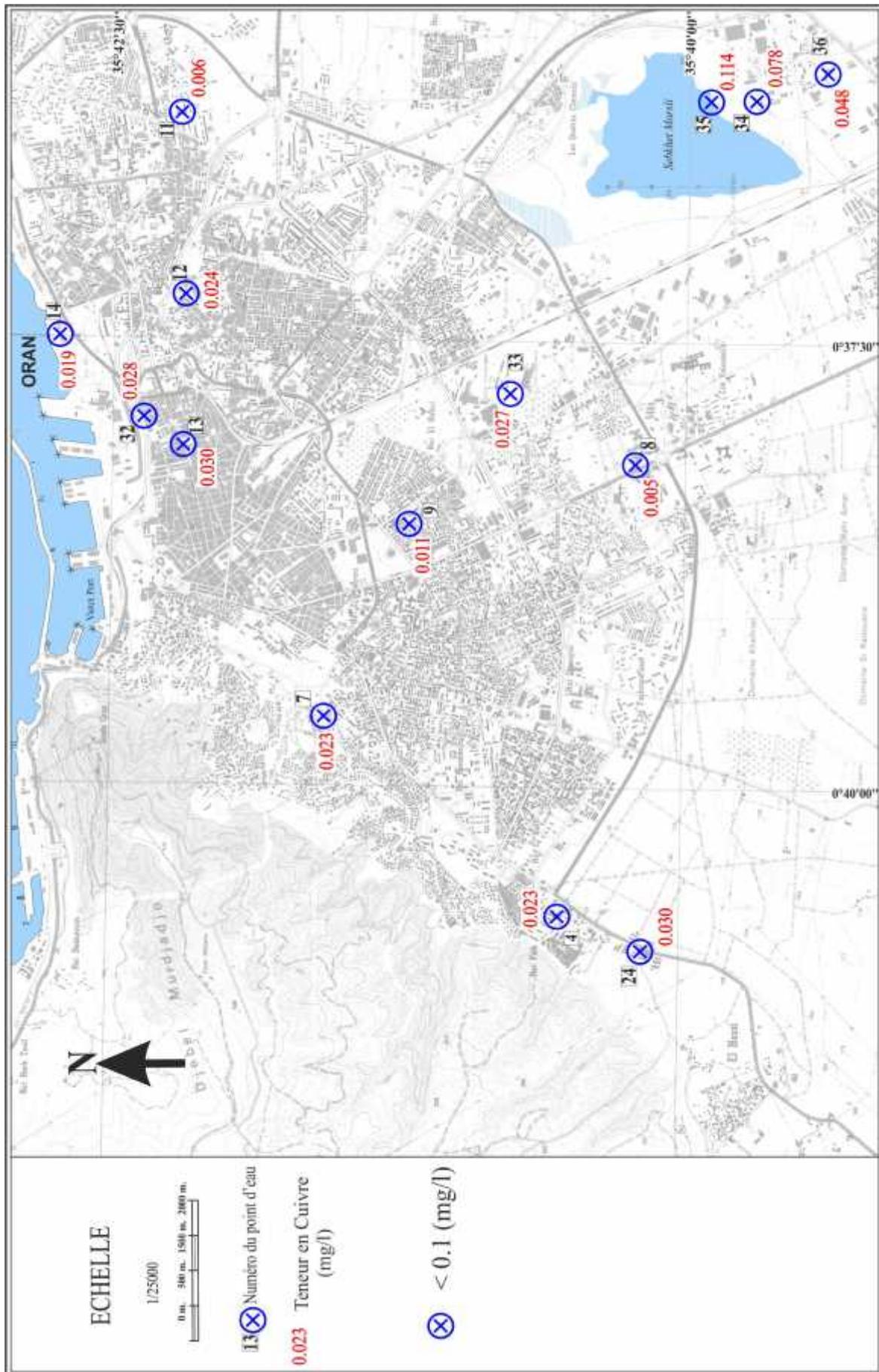


Fig. n° 54: Carte des teneurs en cuivre (mg/l) des points d'eau (29/11/2000).

d) Le zinc : (fig. n° 53)

Dans les eaux des calcaires et ceux de la zone d'Es-Sénia, les teneurs sont relativement faibles bien en dessous de la norme de potabilité qui est de 1 mg/l.

Ceci est également le cas pour les eaux du complexe dunaire sauf au niveau de trois points d'eau où les teneurs sont relativement élevés : Puits St-Pierre (3.58 mg/l au cours de la troisième campagne), puits de Mediouni (4.2 mg/l) et puits de St-Eugène (5.65 mg/l).

e) Le plomb : (fig. n° 54)

Dans les eaux des calcaires, les teneurs en plomb varient entre 0.066 mg/l et 0.119 mg/l, soit légèrement en dessus des normes de potabilité fixées à 0.1 mg/l.

Dans la zone d'Es-Sénia, les teneurs sont relativement élevées au puits de Dayat Morselly et surtout dans les eaux superficielles de Dayat Morselly.

Les eaux du Calabrien, se caractérisent par des teneurs inférieures à 0.1 mg/l à l'exception des points de St-Eugène (0.167 mg/l) et Mediouni (0.193 mg/l), au cours de la deuxième campagne.

f) Le chrome : (fig. n° 55)

Dans tous les points d'eau échantillonnés, les teneurs en chrome restent de loin inférieures à la norme de potabilité (0.05 mg/l), à l'exception des eaux de Dayat Morselly qui ont présenté 0.190 mg/l lors de la première campagne et 0.082 mg/l lors de la deuxième campagne.

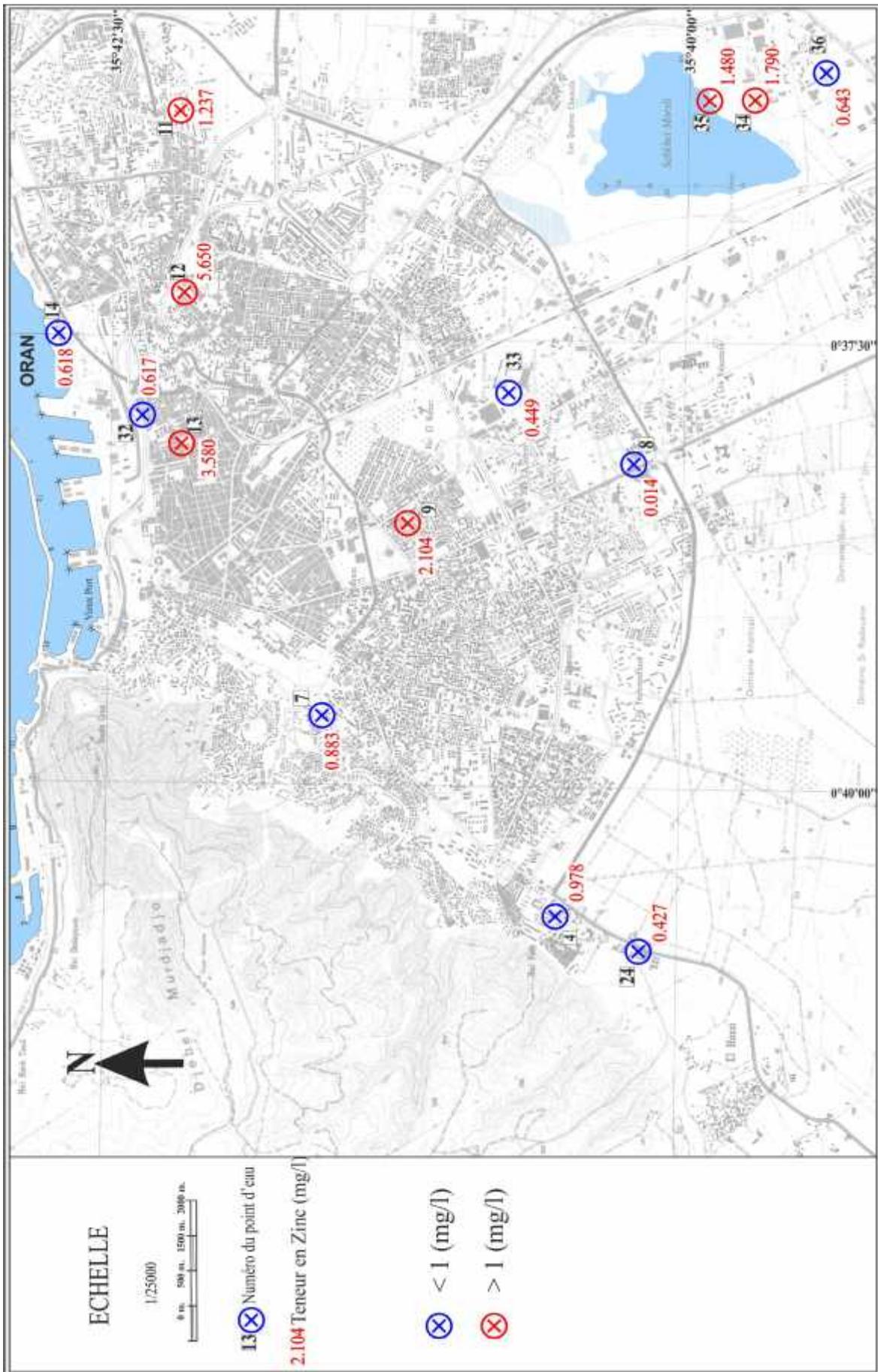


Fig. n° 55 : Carte des teneurs en zinc (mg/l) des points d'eau (29/11/2000).

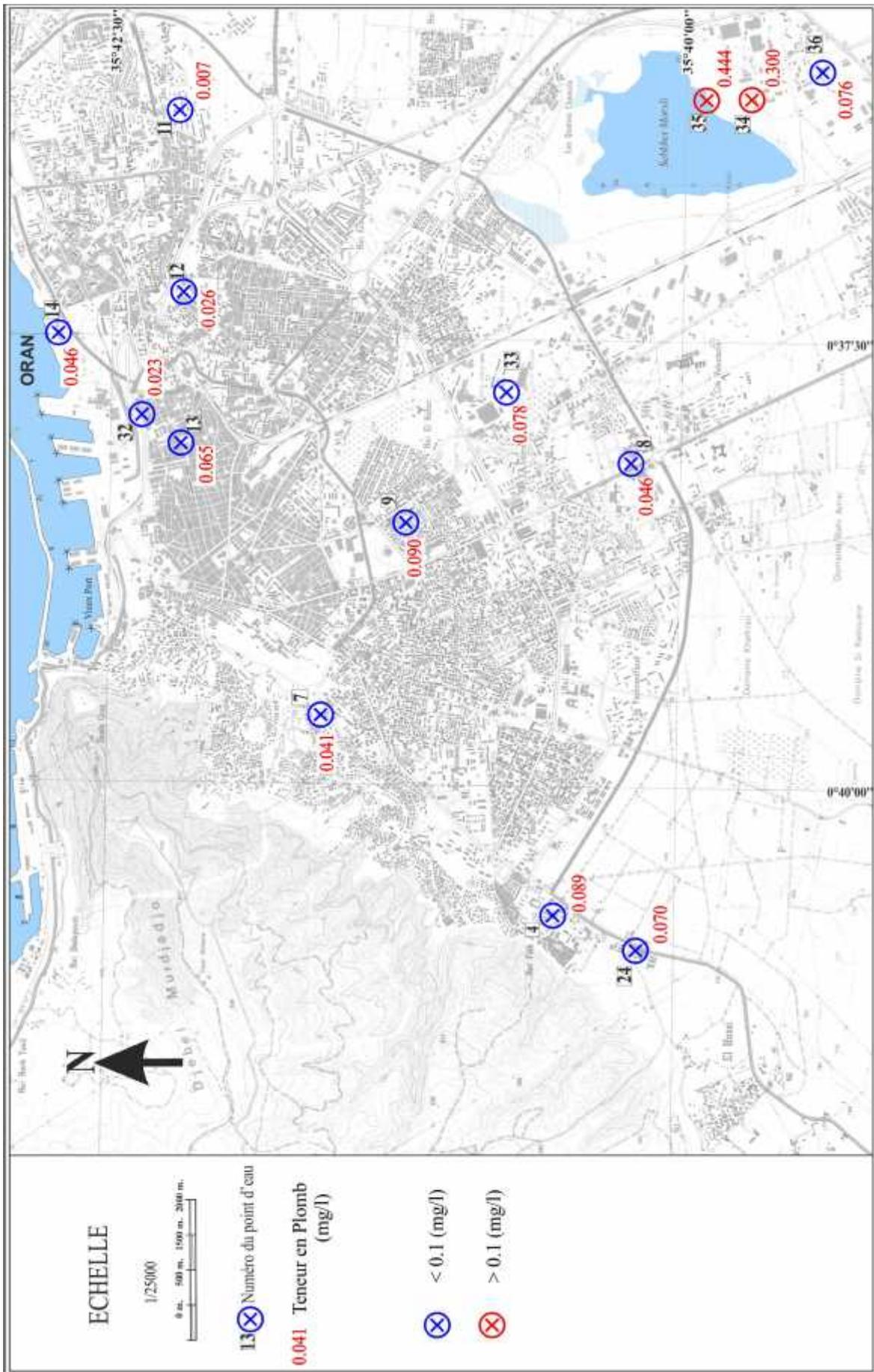


Fig. n° 56 : Carte des teneurs en plomb (mg/l) des points d'eau (29/11/2000).

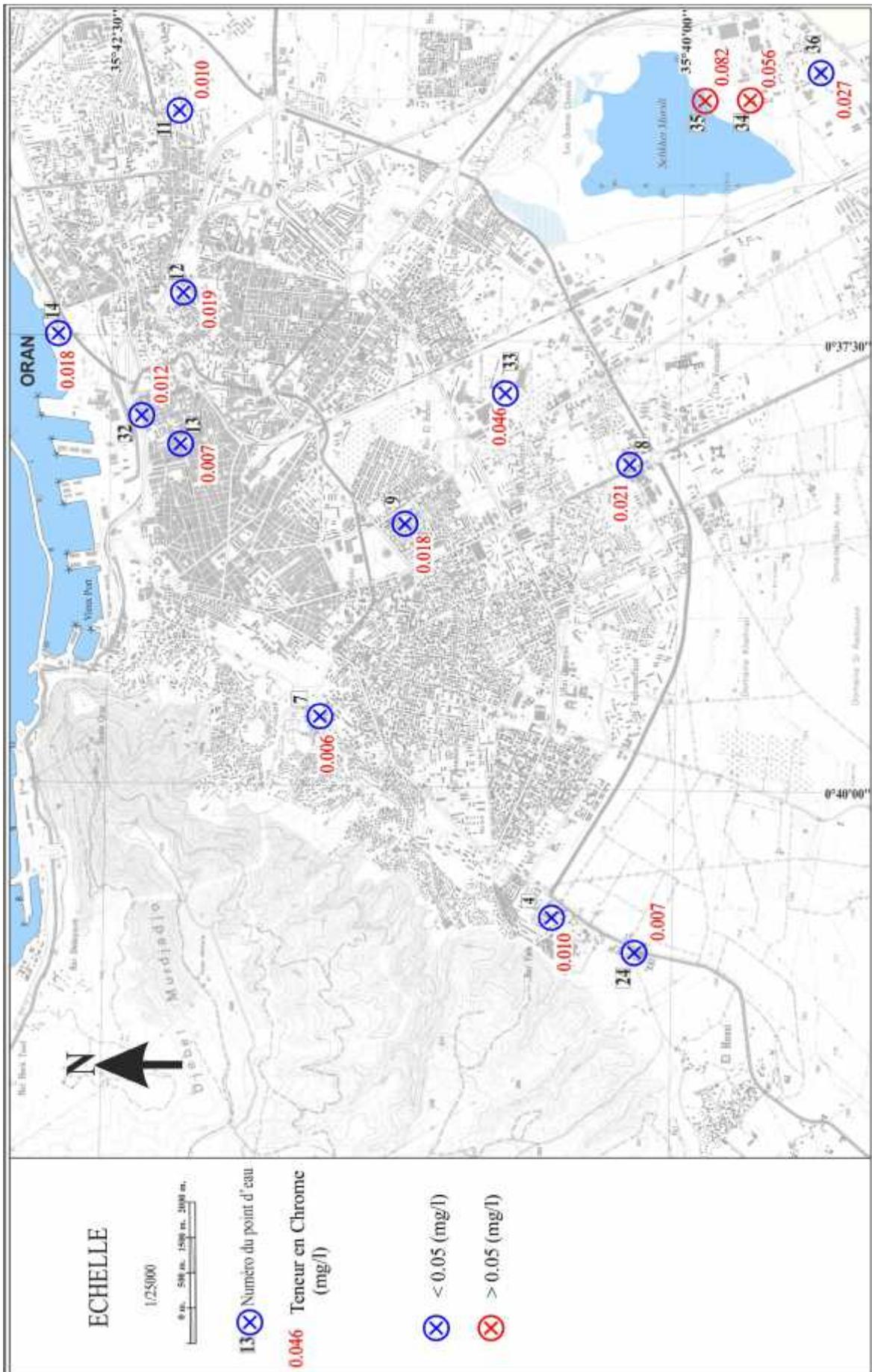


Fig. n° 57: Carte des teneurs en chrome (mg/l) des points d'eau (29/11/2000).

3-Conclusion :

Il apparaît que la majorité des échantillons d'eau prélevée présentent des teneurs en nitrates supérieures aux normes de potabilité. Les autres paramètres ne présentent pas de teneurs élevées. L'étude concernant la partie occidentale de l'agglomération (secteur d'El Hassi) indique qu'à part certains secteurs situés en amont, les eaux restent de mauvaise qualité bactériologique avec présence de germes indicateurs de contamination fécale. La présence des nitrates et des bactéries pourrait s'expliquer par leur origine anthropique commune. Pour rappel, ce secteur se caractérise par l'absence de réseau d'assainissement et donc prolifération de fosses perdues.

L'étude des résultats de l'analyse des éléments mineurs des eaux de la nappe révèle de faibles teneurs, généralement en deçà des valeurs limite de potabilité. Seul l'élément zinc semble présenter des teneurs importantes dépassant les normes au niveau de certains puits. Dans le cas de dépassement des normes de potabilité, l'utilisation des eaux de la nappe étudiée est déconseillée pour la boisson, comme eau de bain et pour usage en industrie agro-alimentaire sauf en cas de traitement spécifique de ces eaux.

Chapitre IV

Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

1- Introduction :

L'application de méthodes cartographique d'estimation de la vulnérabilité et du risque dans des contextes urbains est relativement fréquente, et se fait en règle générale à échelle cartographique régionale (Leal et al. 2010).

Dans ces études, la vulnérabilité est alors estimée sans tenir compte directement des éléments du construit urbain. Les sols et sous-sols urbains sont alors considérés dans leur globalité, en fonction uniquement de leurs caractéristiques hydrogéologiques naturelles.

L'objectif de ce chapitre est d'adapter une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe étudiée.

2- Rappels sur la notion de vulnérabilité des eaux souterraines :

L'impulsion au développement de la notion de vulnérabilité des eaux souterraines a été générée par les préoccupations mondiales relatives aux problèmes de contamination des eaux souterraines.

Dans la recherche de moyens et d'outils pour faire face à la contamination des eaux souterraines, la notion de vulnérabilité des eaux souterraines a été introduite dans les années 1960. Le concept original a été appelé "la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination" (Margat J., 1968), et depuis lors la vulnérabilité a été généralement apprécié que par rapport à la contamination.

La vulnérabilité des aquifères (à la contamination) peut être définie comme une propriété relative, non mesurable et adimensionnelle, basée sur la supposition que l'environnement physique (complexe sol-roche- eau souterraine) peut assurer un certain degré de protection aux eaux souterraines à l'égard de contaminants pénétrant dans le sous-sol. En effet, le sol et les matériaux à grains fins de la zone non saturée peuvent agir comme des filtres naturels pour écarter certains contaminants définissant ainsi la notion d'"auto-épuration" ou d'"atténuation naturelle". La vulnérabilité évalue donc la faiblesse ou non de cette protection naturelle.

La capacité d'atténuation, ou "capacité de d'épuration" des matériaux de sub-surface est constituée par l'interaction des nombreuses propriétés physiques, chimiques, et biologiques dans le système "sol-roche-eau souterraine" et est fortement affectée par les mécanismes de transport de soluté ainsi que les conditions hydrogéologiques.

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité ; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (Vrba J. & Zaporozec A., 1994) :

- 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 ;

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

Le risque de pollution résulte du croisement d'un ou plusieurs aléas et d'un ou de plusieurs enjeux : **(Risque) = (Aléa) x (Enjeux)**.

Un aléa : suppose une approche probabiliste, il s'agit de l'application d'un stress, (une action polluante par exemple) sur un point, un axe ou un espace plus ou moins vulnérable du milieu naturel au regard des eaux souterraines dans le cadre de cette étude.

Les enjeux représentent la cible qui ne doit pas être atteinte par les effets du stress sur le milieu naturel.

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. L'ensemble des critères de vulnérabilité rencontrés dans la littérature sont exposés au tableau n° 35.

Tableau n° 35 : Les critères de vulnérabilité couramment pris en compte.

VULNERABILITE INTRINSEQUE			VULNERABILITE SPECIFIQUE
Sol	Zone non saturée (ZNS)	Zone saturée	
Ruissellement - infiltration	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe ; libre ou captive	Occupation du sol : forêt/espaces naturels, agriculture/culture (l'irrigation augmente la percolation, le drainage la diminue), urbanisation/tissu
Pédologie ; perméabilité verticale des sols, nature et texture des sols	Temps de transfert ; perméabilité verticale	Temps de résidence dépend des paramètres hydrodynamiques des formations aquifères Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	Présence ou non de biseau salé
	Structure de la ZNS ; variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en m.o. et argile	Relation eaux souterraines/eaux superficielles	Points sensibles ; surfaces agricoles, décharges, rejets des établissements classés, densité des voies de circulation, prélèvements dans la nappe
		Piézométrie : évolution des sens et direction d'écoulement selon la période du cycle hydrologique	Capacités dispersives et épuratoires des sols face à un polluant spécifique
		Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)	Comportement du polluant potentiel (milieu fixe) ; soluble, insoluble, miscible, non miscible, plus dense, plus léger que
		Type de système hydrogéologiques : caractères plus ou moins capacitif et transmissif	Réseau hydrographique ; extension et vulnérabilité (qualité des cours d'eau)
		Direction et sens d'écoulement	
	Battement de nappe		
	Recharge : quantité d'eau atteignant la ZS sur une période donnée (recharge annuelle)		
	Fracturation, directions et densité		

3- Les méthodes de cartographie de la vulnérabilité :

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 36.

Tableau n° 36 : Principales méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines (Civita, 1993).

METHOD REFERENCE	TYPE	BASIC PARAMETERS															
		PRECIPITATION RATE & CHEMICAL COMPOSITION	TOPOGRAPHIC INFLUENCE	SLOPE VARIABILITY	HYDROGEOLOGICAL NETWORK DENSITY	CHARACTERISTICS OF SOILS				ACQUFER CONNECTIONS TO SURFACE WATER	NET RECHARGE	CHARACTERISTICS OF THE UNSATURATED ZONE	DEPTH TO WATER	WATER LEVEL CHANGES	HYDROBIOLOGICAL FEATURES	ACQUFER HYDRAULIC CONDUCTIVITY	
						THICKNESS, TEXTURE & HETEROGENEITY	EFFECTIVE POROSITY	PERMEABILITY	PHYSICAL & CHEMICAL PROPERTIES								
Albini & Margat (1970) B.R.G.M. (1976...)	HCS																
Vrana (1968) Olmer & Retac (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 Asuaris & Casas Ponsati (1984)	HCS																
Engelen (1985)	MS																
Zaporozec (1985)	RS																
Breuerwma 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																

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 disponibles dans certains contextes.

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 (Vrba J. & Zaporozec A., 1994).

3-1 -Evaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC

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 (Menani, 2001, etc.). 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:

- $I_d = (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w)$
- 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 (I_d) 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, vu 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 peu demandeuse de données difficiles à générer ou à estimer correctement. 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.

3-2 -Evaluation de la vulnérabilité par la méthode "G.O.D" (GOD) :

3-2-1- Présentation de la méthode GOD

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 (fig .n°56).

L'approche employée pour ce modèle a recours à trois paramètres identifiant le type d'aquifère, en fonction :

- du degré de confinement (**G**roundwater occurrence) (**G**)
- des 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**)
- de 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.

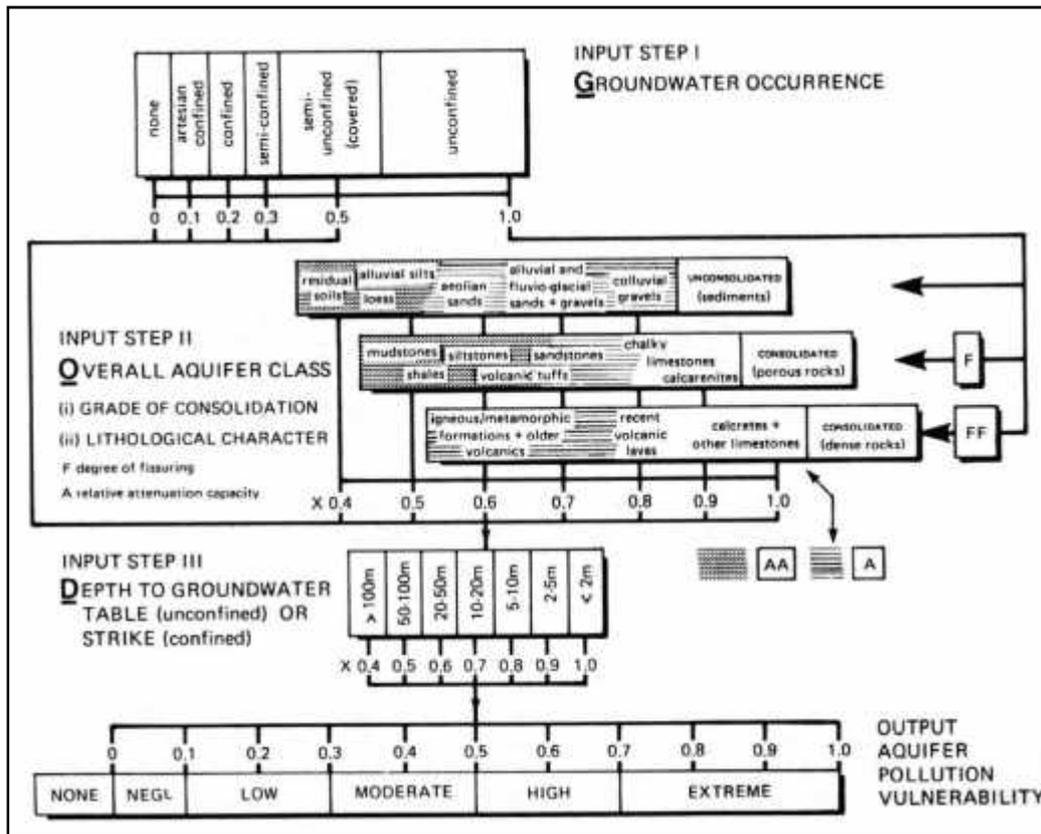


Fig. n° 58: Structuration de la méthode GOD pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la contamination (S. Foster, 1987).

3-2-2- 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 GOD.

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.

3-2-3- Acquisition et description des paramètres GOD :

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).

a- 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.

Tableau n° 37: Cotation accordée au type d'aquifère (G). Source (in M. Sinan, 2000)

Type d aquifère	Cote
Aucun aquifère	0
Aquifère confiné et artésien	0.1
Aquifère confiné et non artésien	0.2
Aquifère semi confiné	0.3
Aquifère avec couverture de surface assez perméable	0.4 - 0.6
Aquifère non confiné	0.7 - 1

b- Impact de la zone vadose (O) :

C'est un paramètre très important dans la méthode GOD. 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 GOD, 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° 57).

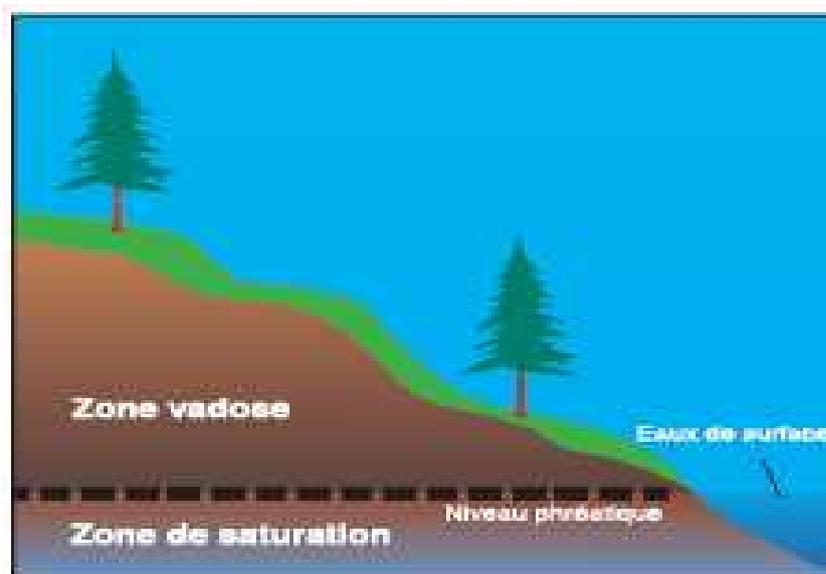


Fig. n° 59 : Schéma illustrative de la zone vadose (zone non saturée).

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 est 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.

Tableau n° 38 : Cotation accordé à la lithologie de la zone non saturée(O).*Source (in M. Sinan, 2000)*

Nature lithologique	Cote
Sol résiduel	0.4
Limon alluvial, argile, marne, calcaire fin	0.5
Sable éolien, siltite, tuf. roche ignée et métamorphique fracturée	0.6
Sable et gravier, grès, tuf	0.7
Gravier (colluvions)	0.8
Calcaire	0.9
Calcaire fracturé ou karstique	1

c- 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 n° 39.

Tableau n° 39 : Cotations accordées à la profondeur de la nappe - sol (D)
Source (in M. Sinan, 2000)

Profondeur (m)	0-2	2-5	5-10	10-20	20-50	50-100	>100
Cote	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4

Les différentes plages d'IG obtenues ont été mises en parallèle avec les classes de vulnérabilité pour interpréter les résultats. L'indice GOD a pour valeur minimum 0 et 1 comme valeur maximum. D'une manière générale, les indices GOD sont répartis en cinq classes de vulnérabilité allant du "très faible" à "extrême" (tableau n° 10). Le degré de vulnérabilité augmente avec l'indice GOD (IG).

Tableau n° 40 : Intervalles des valeurs de l'indice GOD et classes correspondantes
(Murat, 2000).

Intervalle	Classe GOD
0-0.1	Vulnérabilité très faible
0.1-0.3	Vulnérabilité faible
0.3-0.5	Vulnérabilité modérée
0.5-0.7	Vulnérabilité forte
0.7-1	Vulnérabilité extrême

3-3- Mise en application de la méthode GOD :

La méthode GOD s'applique suivant une logique "raster" c'est-à-dire que la zone d'étude est subdivisée en grilles régulières constituées de petites zones appelées cellules ou pixels dont la forme géométrique est carré, donc les trois paramètres de GOD sont homogènes (système de projection UTM, même résolution). Le Système d'Information Géographiques (SIG) est l'outil idéal pour cette application. A cet effet, on a utilisé le logiciel *MapInfo* (SIG vecteur) pour établir les cartes paramétriques et *Vertical Mapper* pour la superposition des cartes paramétriques (multiplication).

3-3-1- Méthodologie :

La démarche suivie peut être synthétisée par le schéma suivant (figure 59) :

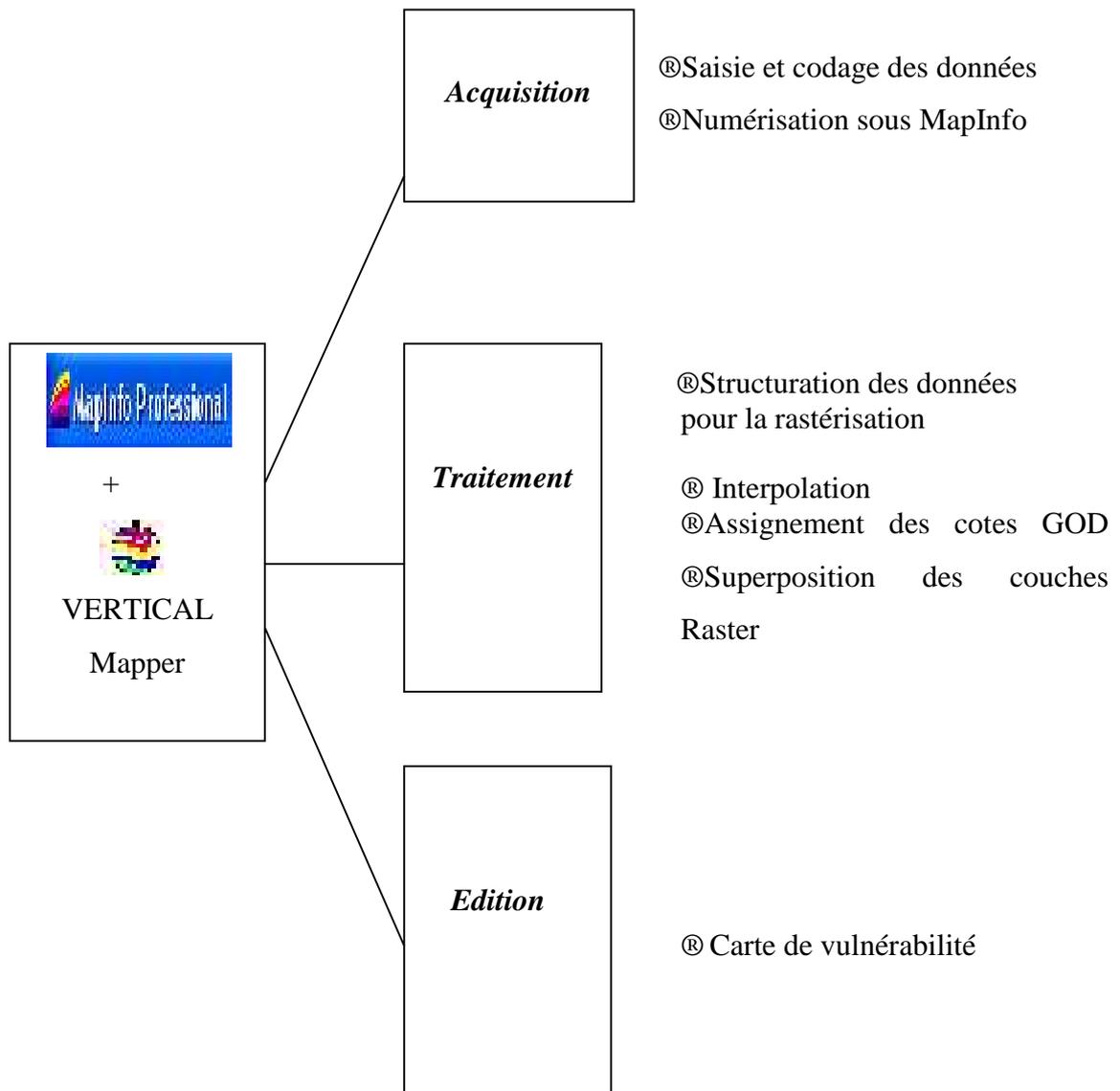


Fig. n° 60: Déroulement de la spatialisation numérique.

3-3-2- Stratification des paramètres GOD :

Chaque paramètre GOD est représenté par une couche d'information indépendante selon l'organigramme ci-dessous (figure (59)) :

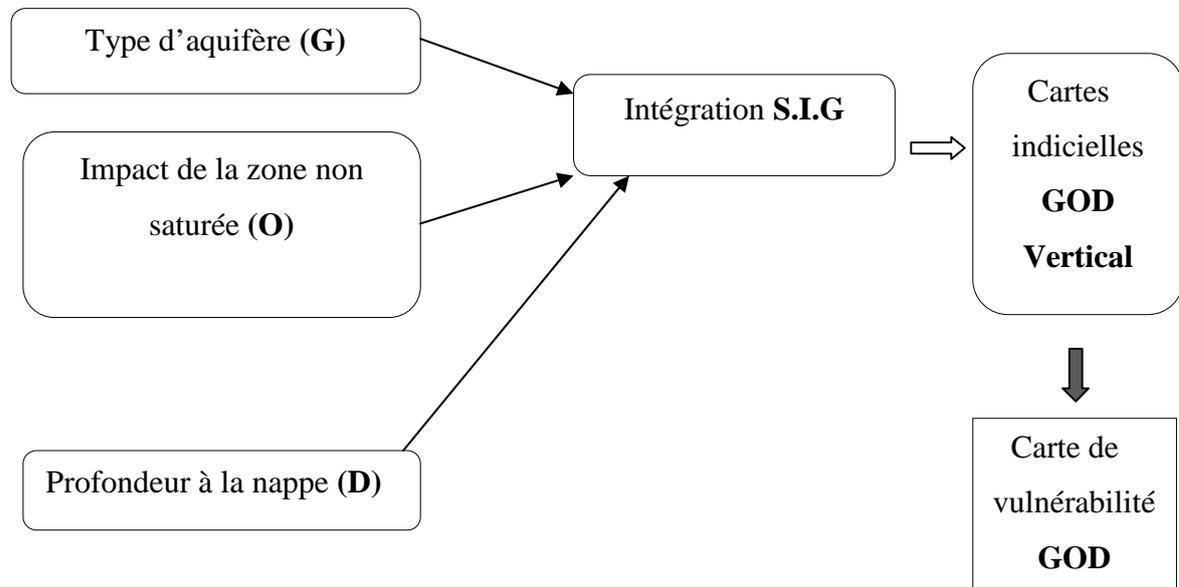


Fig. n° 61: Organigramme illustrant l'organisation en couches d'information "Raster".

3-3-3-Acquisition des données et moyens :

Cette première phase est très importante dans l'application des fonctionnalités des S.I.G. L'identification des unités hydrogéologiques ainsi que l'évaluation des trois paramètres requièrent la connaissance de la géologie et de l'hydrogéologie qui sont à l'origine de l'estimation des trois paramètres de base.

La détermination de l'indice GOD doit indiquer clairement la source des informations utilisées ainsi que le cheminement et les hypothèses qui ont mené à l'estimation de chacune des cotes. Le lecteur pourra ainsi juger de la valeur des cotes attribuées, car la fiabilité ou leur précision de l'indice de vulnérabilité dépend de la quantité et de la qualité des données qui ont servis à l'évaluation.

Pour bien mener ce travail, nous avons collecté le maximum d'informations sous forme de supports cartographiques et de données:

3-3-4- Supports cartographiques :

- La carte topographique "feuille d'Oran à l'échelle 1/25.000 (INCT-1988)
- La carte géologique "feuille d'Oran à l'échelle 1/50.000 (Y Gourinard-1957)

Des cartes thématiques à l'échelle 1/25000 réalisées dans le cadre de l'étude de l'assainissement du groupement urbain d'Oran (Agep-Sogreah, 1997), à savoir :

- La carte des critères d'aptitude des sols et sous sols à la ré infiltration
- La carte des inventaires des ouvrages
- La carte des profondeurs de l'eau

3-3-5- Supports logiciels :

Le traitement de ces données a été effectué à l'aide des logiciels suivants :

- MapInfo Professionnel version 7.5 (SIG vectoriel),
- Overlay
- Vertical Mapper

3-3-6- Traitement des données :

Toutes les cartes ont été scannées en format A0 et numérisées avec calage des supports de cartes avec le système de projection : (Universel Transverse Mercator U.T.M 30). Cette étape est primordiale pour la numérisation et la production des bases de données utiles pour la mise en œuvre de la spatialisation numérique.

Les couches d'informations ont été numérisées à l'aide du logiciel MapInfo Professionnel sous formes de tables (figure n° 60). En réalité, la table est un ensemble de fichiers qui sont manipulés ensemble par le logiciel. Ces fichiers se résument comme suit :

- ✓ **Fichier (. dat)** : c'est un fichier qui contient les données attributaires de la table. Sa taille est proportionnelle au nombre d'enregistrements dans la table.
- ✓ **Fichier (. map)** : c'est un fichier binaire qui contient l'information géométrique de la table.
- ✓ **Fichier (. Id)** : c'est un fichier qui va faire correspondre les parties alphanumérique et géométrique des " objets".
- ✓ **Fichier (. Ind)** : c'est un fichier d'index sur une colonne. Il peut y avoir plusieurs colonnes d'une table indexée : " les tables d'index".

- ✓ **Fichier (. mif/mid)** : c'est un fichier d'import/export des tables MapInfo vers d'autres logiciels SIG.

4- Mise en œuvre de la méthode GOD dans le secteur d'étude :

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, comme suit

4-1- Type d'aquifère (G) :

L'écoulement d'eau dans un aquifère est conditionné par les matériaux de l'aquifère. Ainsi, le cheminement que doit suivre un polluant est dépendant du système d'écoulement d'un aquifère

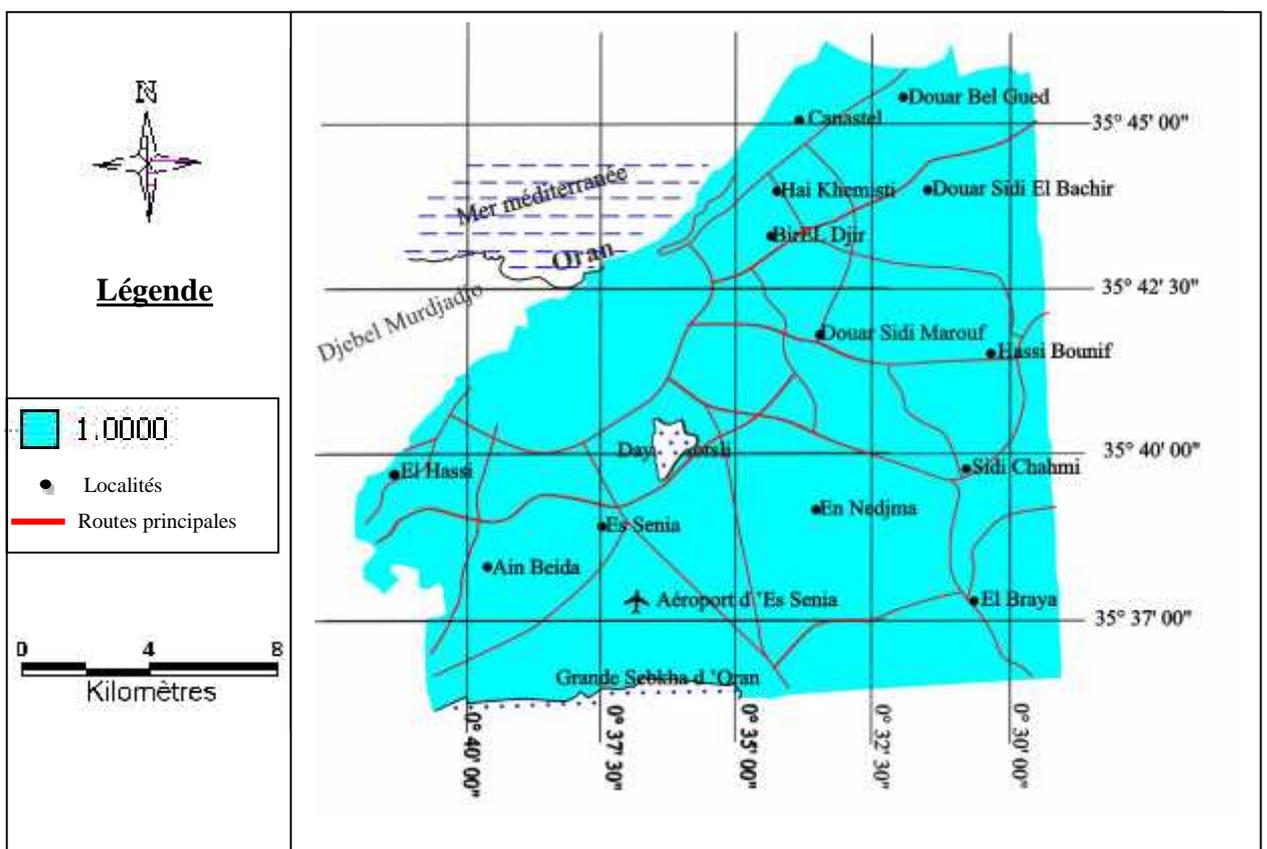


Fig. n° 62: Carte des types d'aquifères du secteur d'étude classés selon la cotation GOD.

L'observation des données piézométriques, des coupes des sondages réalisés dans le cadre de l'étude Agep-Sogreah (1997) ainsi que certains comptes rendu de pompages d'essai ont indiqué que du point de vue hydrodynamique la nappe est essentiellement en régime libre. A cet effet, une cote = 1 a été affectée à l'ensemble du secteur (fig. n° 62).

4-2- Zone non saturée (O) :

Ce paramètre est important dans l'expression de la vulnérabilité à la pollution des nappes car la nature lithologique d'une formation peut retarder la propagation d'un polluant vers la nappe comme elle peut provoquer une propagation rapide du polluant vers la nappe et donc une dégradation plus importante de la qualité des eaux.

L'observation de la carte géologique du secteur (Gourinard, 1957) (fig. n°10) ainsi que les logs géologiques de différents sondages effectués dans la zone d'étude a permis de préciser la nature lithologique principale des terrains composant la zone non saturée sur l'ensemble de la région d'étude. Les cotes appropriées ont été attribuées conformément à la méthode. La carte de la nature de la zone non saturée s'établit comme suit (figure n° 63):

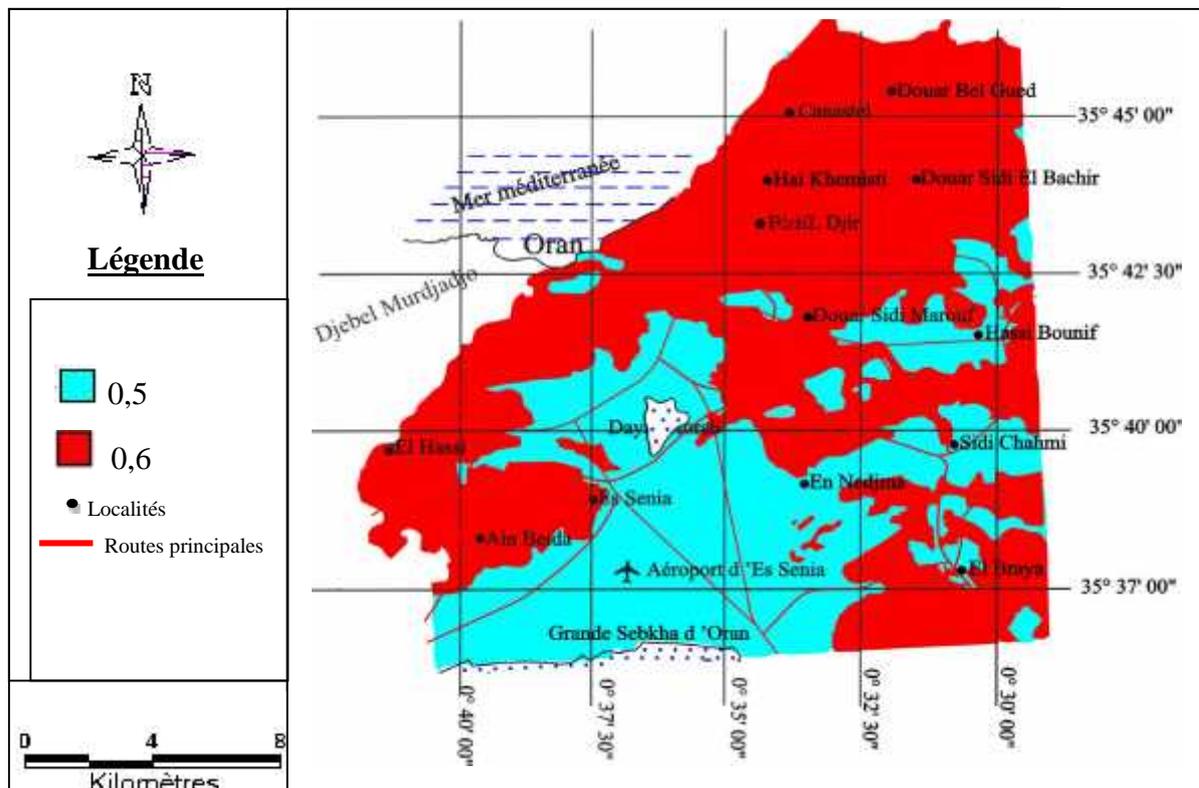


Fig. n° 63: Carte de la zone non saturée "vadoso" (O) de la région d'étude en fonction de la cotation GOD.

Deux cotes sont dominantes dans cette carte :

- La cote = 0,5 correspondant à la zone non saturée constituée par les formations alluvionnaires (limons, marnes, etc.), essentiellement dans les parties centrale et méridionale du secteur,

- La cote = 0,6 correspondant aux zones constituées, au nord, par les formations du complexe dunaire calabrien.

Dans la partie occidentale et en fonction de leur spécificité en termes de vulnérabilité nécessitant une approche particulière d'étude, les formations carbonatées n'ont pas été englobées.

4-3- Profondeur à la nappe (D) :

L'évaluation de ce paramètre a été directement effectuée à partir de la carte en courbes isobathes du toit de la nappe établie sur la base de la campagne piézométrique réalisée en septembre 1997 (Agep-Sogreah, 1997) (Fig. n°64).

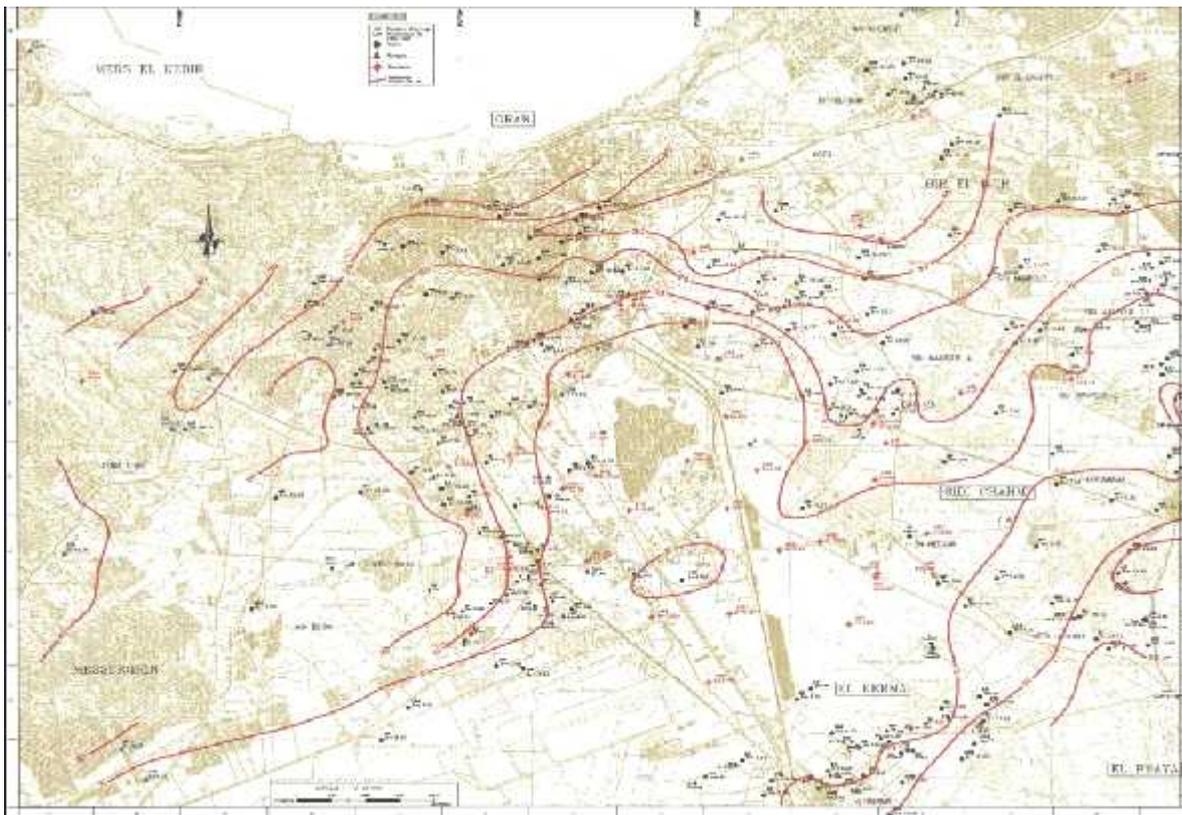


Fig. n° 64: Carte de la profondeur du niveau piézométrique de la région d'étude (Agep-Sogreah, 1997).

L'interpolation est réalisée par la méthode du "Naturel Neighbour" ou "Plus Proche Voisin" (P.P.V) 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 fonctionnalité "Reclass". Le résultat de l'interpolation est une carte en courbes exprimée par l'indice correspondant de la méthode GOD : (figure n° 65).

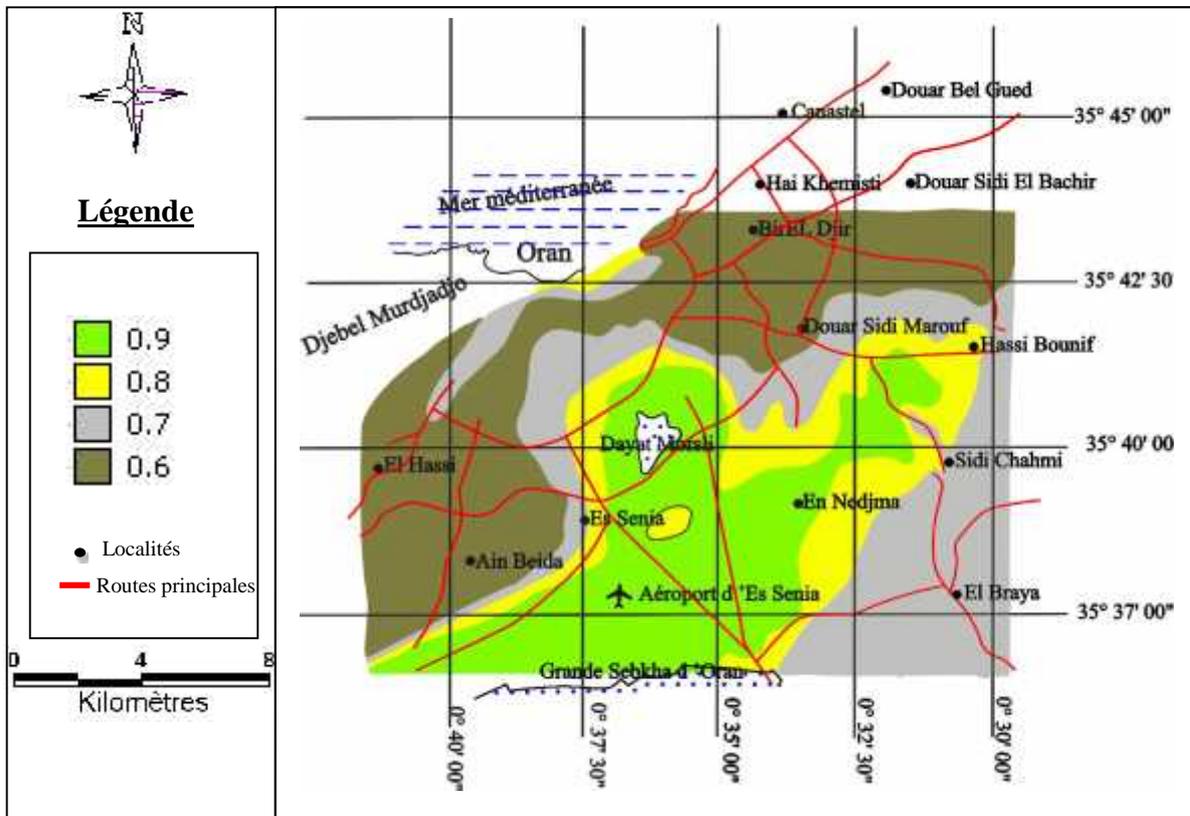


Fig. n° 65: Carte de la profondeur du niveau piézométrique (D) de la région d'étude en fonction de la cotation GOD.

A la baisse de la profondeur du niveau piézométrique correspondent les valeurs de cote les plus élevées, soit une forte vulnérabilité à la pollution. Cela est essentiellement le cas au niveau de la zone s'étendant entre la Dhaya Morselly, Es-sénia et l'aéroport d'Oran.

Le minimum de cote est de l'ordre de 0,6 dans la zone d'affleurement des formations calabriennes de Bir El Djir (profondeurs s'étalant de 30 à 50 m).

4-4- Etablissement de la carte de vulnérabilité GOD

L'indice de vulnérabilité (IG) relative à la méthode GOD est calculé par la multiplication des trois paramètres indiciaires. La valeur de l'indice est comprise entre 0 et 1. 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° 66:

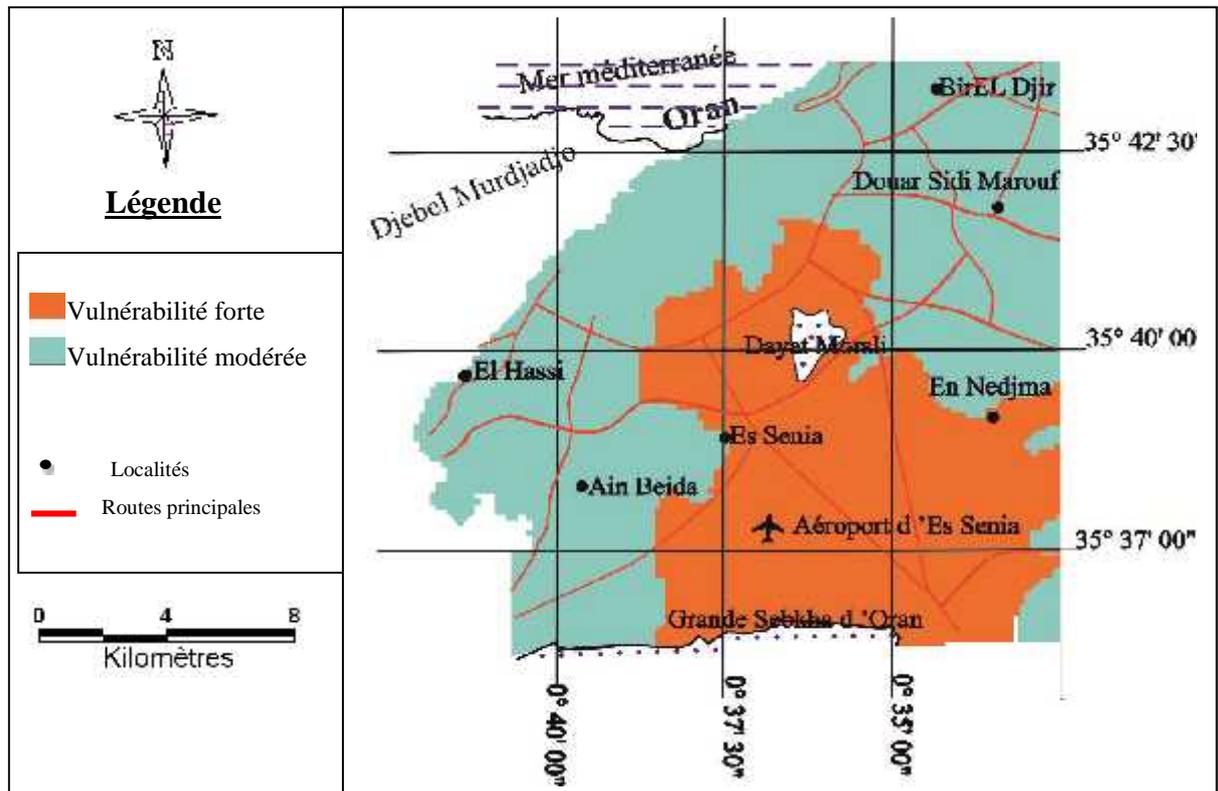


Fig. n° 66: Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du secteur d'étude par application de la méthode GOD.

L'analyse de la carte de vulnérabilité établie par la méthode GOD pour la région étudiée révèle deux indices principaux de vulnérabilité.

Une forte vulnérabilité à la pollution (indice compris entre 0,5 et 0,7) au niveau des secteurs s'étendant entre de la Dayat Morcelli vers Es-sénia, se prolongeant vers la zone de l'aéroport et des bordures de la grande Sebka ainsi qu'en direction d'En Nedjma. Ce fort degré de vulnérabilité s'explique essentiellement par les faibles profondeurs de la nappe dans ces zones pouvant atteindre des valeurs inférieures à 05 m.

Les zones à vulnérabilité modérée (indice compris entre 0,3 et 0,5) correspondent à celles où les profondeurs du niveau piézométrique restent supérieures à 5 m coïncidant souvent avec les zones à prépondérance du complexe dunaire. Cette classe garantit une pollution moins sévère en cas de contamination de la nappe. Elle représente près de 70 % de la zone d'étude (figure n° 67).

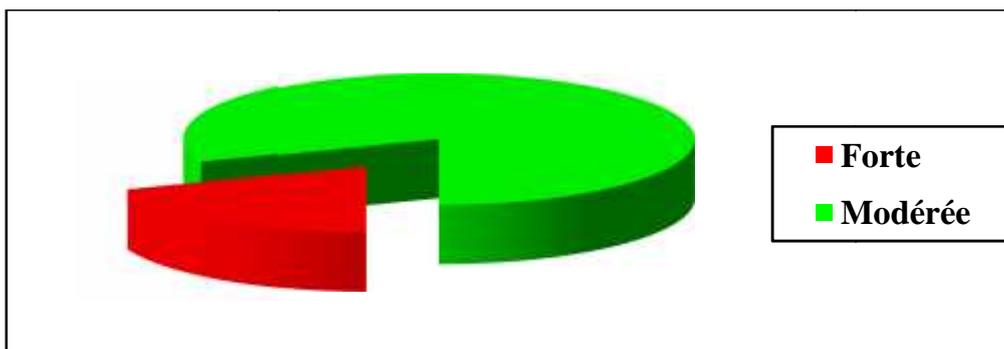


Fig. n° 67: Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution du secteur d'étude selon la méthode GOD.

De façon plus globale, on constate une variabilité spatiale modérée de l'indice de vulnérabilité (figure n° 68).

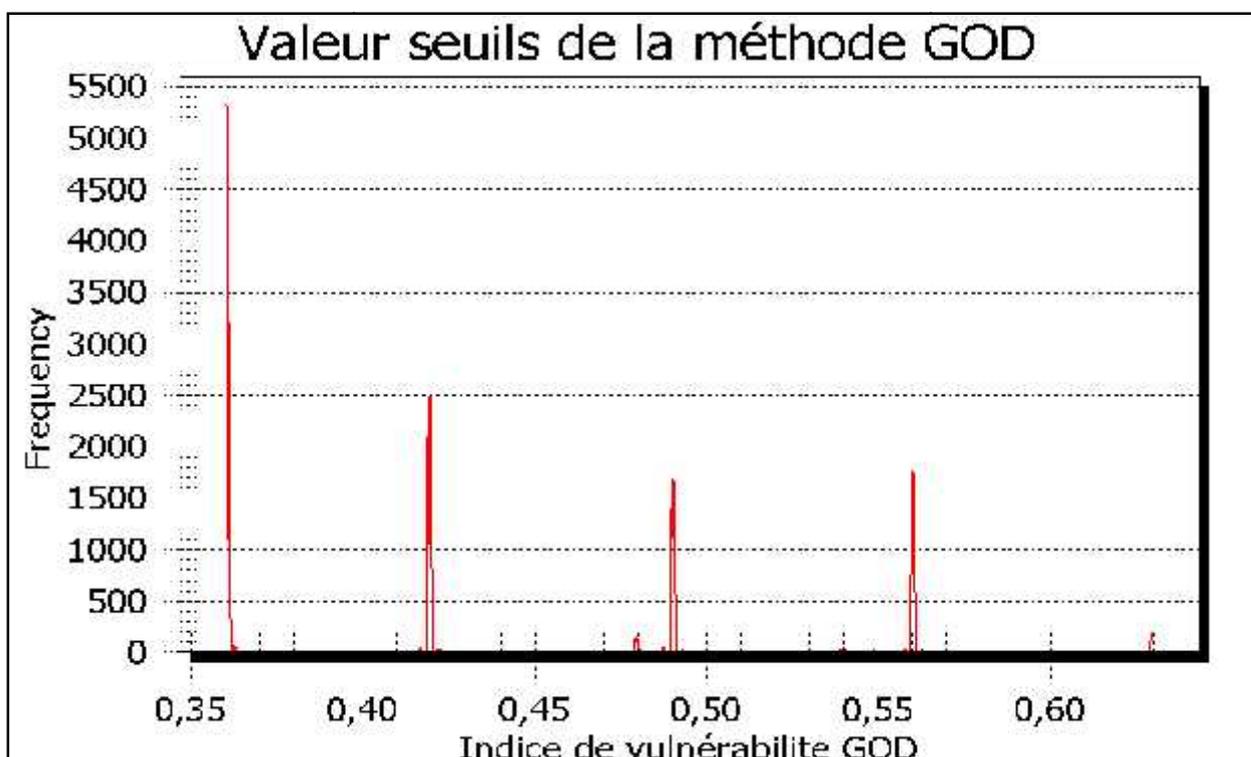


Fig. n° 68: Représentation de la variabilité fréquentielle de l'indice GOD des eaux souterraines du secteur d'étude.

Cette faible variabilité s'explique par l'étalement de la nappe libre sous la surface d'un large plateau à la constitution géologique relativement homogène et faiblement affectée par les phénomènes structuraux. Le contraste entre secteurs hydrogéologiques reste peu marqué.

5- Conclusion

La cartographie par la méthode GOD de la vulnérabilité de la nappe libre de l'agglomération oranaise a permis d'établir une estimation rapide de la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines.

L'application la méthode à l'aide d'un SIG a permis de dégager deux classes principales de vulnérabilité ;

Une classe à vulnérabilité modérée qui occupe la majorité de la zone cartographiée correspondant aux secteurs où les profondeurs du niveau piézométrique restent supérieures à 5 m et coïncidant souvent avec les zones à forte prépondérance du complexe dunaire.

Une classe à forte de vulnérabilité, de moindre extension, caractérisant les secteurs s'étendant essentiellement dans la zone alluvionnaire caractérisée par une faible profondeur du niveau piézométrique essentiellement dans la partie méridionale de la zone d'étude (Dayet Morcelly, secteur de l'aéroport, etc.). Cette partie se caractérise par les eaux souterraines à plus fortes minéralisations > 2400 mg/l (voir chapitre 2) réduisant d'autant les enjeux en termes d'usages de cette ressource qui doit néanmoins être préservée et protégée.

Conclusion générale

Conclusion générale

A travers ce travail, nous avons commencé par présenter le cadre physique de la région d'étude incluant les contextes géographiques, climatiques morphologiques, hydrologiques.

L'étude géologique, basée sur les travaux de plusieurs auteurs ayant étudié la région, a permis de distinguer les principales formations géologiques de cette région ; à savoir :

- le substratum anté à synchro nappe constitué de formations d'âge allant du Jurassique moyen au Crétacé - Barrémien,

- les formations du Miocène supérieur constituées essentiellement par les marnes à tripoli qui affleurent en bordure du plateau d'Oran et qui sont surmontées au Djebel Murdjadjo par les calcaires récifaux, karstifiés,

- le complexe dunaire du Calabrien, grés-sableux, qui repose en discordance essentiellement sur la formation des marnes à tripoli. Il prend une grande extension dans le plateau d'Oran,

- le Quaternaire récent constitué essentiellement par des formations colluvionnaires et alluvionnaires qu'on retrouve dans la zone piémont du Djebel Murdjadjo et dans la partie méridionale de l'agglomération

Sur le plan hydrogéologique, les aspects lithologiques et structuraux des grandes formations géologiques de la zone d'étude déterminent les principaux systèmes aquifères présents, à savoir :

- l'unité des formations miocènes " calcaires du Murdjadjo",

- l'unité des grés et sables calabriens du plateau d'Oran,

- l'unité des colluvions et alluvions du Plio-Quaternaire (Pléisto-Holocène).

La carte piézométrique a permis de fournir des informations sur les sens d'écoulement souterrain et sur le mode d'alimentation du système aquifère. Dans notre secteur, la nappe étudiée est essentiellement libre, contenue dans les calcaires et dans les niveaux sablo-gréseux, passant latéralement dans les niveaux alluvionnaires. Elle est de type radiale à écoulement divergent au sud et convergent au nord. Au nord, deux directions d'écoulement convergent, l'une provient de la zone d'affleurement des calcaires. des du

Murdjadjo, l'autre provient de la partie nord – est du plateau. Ces deux directions finissent par converger au sud de l'agglomération en direction de la Dayet Morcelly.

L'étude hydrochimique a permis de caractériser les principaux paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau prélevés au cours de la campagne de terrain du 24 et 25 octobre 2011. La minéralisation des eaux échantillonnées varie de 400 mg/l à 3060 mg/l. La valeur minimum de résidu sec est constatée au niveau de la zone d'affleurement des calcaires messiniens. Sur l'ensemble du secteur, l'évolution du résidu sec est conforme aux grandes directions de drainage souterrain et des distances parcourues. Soit, selon une direction NW-SE dans la partie occidentale de l'agglomération. Dans la partie Nord-Ouest, cette évolution se fait selon la direction NE-SW, de la zone d'affleurement du complexe dunaire vers la région centrée autour de la Dayet Morcelly.

Deux types de faciès hydrochimiques se dégagent :

- Un faciès chloruré sodique dans la partie Nord-Est (complexe dunaire) et Sud (alluvions) de l'agglomération
- Un faciès bicarbonaté calcique qui caractérise les eaux des formations carbonatées (zone d'El Hassi).

De l'observation de la carte de répartition spatiale des différents paramètres étudiés et des sous-faciès hydrochimiques, il ressort qu'au niveau de la zone d'étude, la nature hydrochimique des eaux est déterminée essentiellement par la nature lithologique des formations des zones de recharge, calcaires du messinien ou complexe dunaire, par les distances parcourues ainsi que par l'amoindrissement de la profondeur du niveau piézométrique, essentiellement au niveau de la zone alluvionnaire centrée sur le secteur de Dayet Morcelly..

L'étude statistique, par analyse en composante principale (ACP), a confirmé et bien précisé les affinités entre les différents ions renseignant sur l'origine ainsi que les regroupements spatiaux des échantillons étudiés. La méthode par "Classification Ascendante Hiérarchique" a abouti à une classification par niveau de minéralisation.

Du point de vue de la qualité des eaux pour l'irrigation, la majorité des eaux des points étudiés présentent des risques de salinisation moyens et de forts risques de sodisation.

Concernant les éléments indicateurs de pollution, il apparaît que la majorité des échantillons d'eau prélevée présentent des teneurs en nitrates supérieures aux normes de potabilité. Dans la partie occidentale de l'agglomération, à part certains secteurs situés en amont, les eaux restent de mauvaise qualité bactériologique avec présence de germes indicateurs de contamination fécale. La présence des nitrates et des bactéries pourrait s'expliquer par leur origine anthropique commune. Ce secteur (El Hassi) se caractérise par l'absence de réseau d'assainissement et donc prolifération de fosses perdues.

L'étude des résultats de l'analyse des éléments mineurs des eaux révèle de faibles teneurs, généralement en deçà des valeurs limite de potabilité. Seul l'élément zinc semble présenter des teneurs importantes dépassant les normes au niveau de certains puits. Dans le cas de dépassement des normes de potabilité, l'utilisation des eaux de la nappe étudiée est déconseillée pour la boisson, comme eau de bain et pour usage en industrie agro-alimentaire sauf en cas de traitement spécifique de ces eaux.

Le quatrième chapitre a été consacré à l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions. Le choix pour l'établissement d'une cartographie de ce paramètre s'est porté sur la méthode GOD (Groundwater occurrence- Overall aquifer class-Depth to groundwater table) en raison de sa structuration simple et qu'elle soit peu demandeuse en données difficiles à générer ou à estimer correctement. L'établissement, par cette méthode, de la carte de vulnérabilité de la nappe libre de l'agglomération oranaise a permis d'établir une estimation rapide de la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. Deux classes principales de vulnérabilité ;

Une classe à vulnérabilité modérée qui occupe la majorité de la zone cartographiée correspondant aux secteurs où les profondeurs du niveau piézométrique restent supérieures à 5 m et coïncidant souvent avec les zones à forte prépondérance du complexe dunaire.

Une classe à forte de vulnérabilité, de moindre extension, caractérisant les secteurs s'étendant essentiellement dans la zone alluvionnaire caractérisée par une faible profondeur

du niveau piézométrique essentiellement dans la partie méridionale de la zone d'étude (Dayet Morcelly, secteur de l'aéroport, etc.). Cette partie se caractérise par les eaux souterraines à plus fortes minéralisations > 2400 mg/l (voir chapitre 2) réduisant d'autant les enjeux en termes d'usages de cette ressource qui doit néanmoins être préservée et protégée.

Références

bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

📖 **Agep-Sogreah, 1997.** Drainage de la zone sud du PUD Oran. Mission B. Ingénierie. Grenoble

📖 **ANRH., 2009.** Réalisation de la Carte des Ressources en Eau Souterraines du Nord de l'Algérie.

📖 **A.N.R.H, 2003-2004-2012.** Annuaire piézométrique du flanc sud de Murdjadjo et la plaine de Brédéah, Rapport interne.

📖 **Aissaoui A., 2010.** Etablissement d'une carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du Plateau d'Oran : Application de la méthode GOD.

📖 **Abid H. et Hacherouf B., 2001.** Caractérisation hydrochimique et pollution par les nitrates des eaux souterraines de la région d'Oran. Mémoire d'ingénieur d'état, Université d'Oran. 67 p.

📖 **Adda M. et Bouchenouk I., 2007.** Etude hydrochimique et bactériologique des eaux souterraines de la partie occidentale de l'agglomération oranaise (Secteur d'El Hassi "ex : Pont Albin") 104 p. 48 fig. Mémoire d'ingénieur d'état, Université d'Oran

📖 **Amichi F., 2010.** Cartographie de la qualité des eaux souterraines de la Mitidja Ouest : Cas du bassin versant de Sidi Rached (Tipaza). Mémoire d'ingénieur d'état, Université d'Alger.

📖 **Bellal S.A., 2009.** Ressources, usagers et gestionnaires de l'eau en zone semi-aride : Le cas des plaines littorales oranaises (Ouest algérien). Thèse de Doctorat, Université d'Oran.

📖 **Benabdellah M., 2010.** Mise en évidence des phénomènes dynamiques contrôlant le littoral oranais (de la Calère à la Pointe de Canastel) : étape fondamentale pour une cartographie des risques géologiques Thèse de magister, 283 p. 234 fig. 94 tab.

📖 **Bencherrki A. 2008.** Réalisation d'une carte de vulnérabilité des nappes phréatiques de la région de Saïda, en Algérie, avec l'aide des systèmes d'information géographique. Thèse de magister, université Moncton

📖 **Bestani B. et Mezmaz N., 2006.** Réactualisation de la cartographie piézométrique et l'évolution chimique des eaux souterraines du flanc sud du Murdjadjo (plaine Misserghin-Boutlelis). Mémoire d'ingénieur d'état, Université d'Oran. 132 p.

📖 **BETB, 2002.** Etude géophysique par prospection électrique : Etude hydrogéologique de la zone de Pont Albin (ferme du ministère de la justice).

📖 **Bézègues 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.al, 2002

📖 **Bouchentouf K., 1979.** Eude hydrogéologique du versant sud du Murdjadjo et du plateau d'Oran. Mémoire de D.E.S, Université d'Oran.140 p. 41 fig.

📖 **Bousmah H., 2005.** Traitement et analyses des eaux du Gargar alimentant les wilayas de Mostaganem et Oran. Mémoire D. E. S de biologie.

📖 **BRGM, 2008.** Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique Rapport final /RP-56283-FR Juin 2008

📖 **Castany G., 1998.** Hydrogéologie (principes et méthodes) édit : Dunod, 238 p.

📖 **Castany G. et Margat J.** Dictionnaire français d'hydrogéologie. Edit : Dunod.

📖 **Civita M. et De Maio M., (1993).** SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione e lacartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia &Automatizzazione. Pitagora Editrice, Bologna, Italia.

📖 **Dahmani B. et C. Bithorel, 2000.** Déminéralisation des eaux saumâtres de Brédéah dans la région du bassin hydrographie Oranie-Chott-Chergui. Université de Telemcen.

📖 **Debieche T. H., 2002.** Evolution de la qualité des eaux (saline, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle : Application à la basse plaine de la Seybouse- Nord-Est-Algérie. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté.

📖 **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. Rapport technique

📖 **Fenet B., 1975.** Recherche sur l'alpinsation 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.

📖 **Foukrache M., 2001.** Hydrogéologie de massifs côtiers Oranais (Arzew, Beni Saf). Thèse de magister, 321 p. 140 fig. 94 tab.

📖 **Foster S., 1987.** Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy vulnerability of soil and Grounwater to pollutants. RIVM. TNO on hydrological Research, pp. 69-86.

📖 **Gerras H., 2005.** Evaluation de la qualité bactériologique des eaux de baignade de la plage de Sidi Boucif (W. d'Ain Témouchent). Mémoire D.E.S de Biologie.

📖 **Gouaidia L., 2008.** Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de meskiana nord-est algerien. Thèse de Doctorat, Université de Badji Mokhtar-Annaba

📖 **Gourinard Y., 1952.** Le littoral oranais (mouvements verticaux et anomalies gravimétriques). Congr. Géol. Inter. Alger, Monographie régionales (1), 22, 63 p.

📖 **Guillemin C.et. Roux J.C., 1992.** La pollution des eaux souterraines. Manuels et Méthodes, n° 23, éd. BRGM.

📖 **Hadj-Said S., 2007.** Contribution à l'étude hydrogéologique d'un aquifère en zone côtière : cas de la nappe de guerbes. Thèse de Doctorat

📖 **Hamadou H. et Zouaoui A., 2001.** Etude hydrochimique et de la pollution par métaux lourds les eaux souterraines de l'agglomération oranaise. 90 p. 39 fig. Mémoire d'ingénieur d'état, Université d'Oran. 67 p.

📖 **Hassani M.I, 1987.** Hydrogéologie d'un bassin endoréïque semi-aride. Le bassin versant de la grande sebkha d'Oran (Algérie). Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle. Université de Grenoble. 304 p. 128 fig.

📖 **Hassani M.I., 2009.** Vulnérabilité et protection des eaux souterraines, photocopié cours de magister, 47 p.

📖 **Leal J. A. R., Noyola Medrano C. et Tapia Silva F. O. (2010).** Aquifer vulnerability and groundwater quality in mega cities: case of the Mexico Basin. Environ Earth Sci.

📖 **Joradp, 1994,** Arrêté du 23 juillet 1994 relatif aux spécifications microbiologiques de certaines denrées alimentaires. Journal officiel de la république algérienne n° 57, Alger.

📖 **Merabet Amina N. et Sebaa N, 1995.** Synthèse hydrogéologique de la carte d'Oran. (région comprise entre Kristel et Madakh). Mémoire d'ingénieur d'état, Université d'Oran. Carte au 1/50.000. 147 p. 88 fig.

📖 **E. Pételet-Giraud. N. Doerfliger. P. Crochet. 2000.** RISKE : Méthode d'évaluation multicritère de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques. Application aux systèmes des Fontanilles et Cents-Fonts (Hérault, S. France) – Soumis à l'hydrogéologie, 2000, 1 et 3 ANTEA Montpellier, 2 BRGM Montpellier.

📖 **Palmquist (1935).** Cartographie de la vulnérabilité des nappes de grande-terre et de Marie-Galante (Guadeloupe) s. Belzégues et E. des Garets 2002 BRGM/RP-51783-FR 2002

📖 **Perrodon A., 1957.** Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie Occidentale, Publ. Serv. Carte Géol. Algérie, 12, 328 pp.

📖 **Romain D., 2010.** Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu urbain. Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel.

📖 **Rodier 2010.** L'analyse de l'eau (eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer). éditions Dunod, Paris.

📖 **Rodier J., 1984.** Septième édition Dunod. L'analyse de l'eau (eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer).

📖 **Ricour J., 1988.** 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.

📖 **Slama Z., 1999 – 2000.** Rapport de stage du contrôle de qualité. DES de biologie. Université de Sidi Bel Abbas.

📖 **Sinan M., Haddouchi B., Razak M., El Hebil A., (2000).** Evaluation et gestion des ressources en eau souterraine des aquifères régionaux à l'aide des systèmes d'informations géographiques. Application à la nappe du Haouz de Marrakech – Maroc. Journal d'hydrogéologie B.R.G.M (France), N°4, pp 89 – 100.

📖 **Sourisseau B., 1976.** Etude hydrogéologique du massif du Murdjadjo (Brédeah-Bousfer). Rapport DEMRH, Oran.

📖 **Thinthon R., 1948.** Les aspects physiques du Tell Oranais Essi de morphologie du pays semi-aride. These doc. Es lettres. Musée d'Oran. 589 p. 86 fig. 83 pl.

📖 **Thomas G., (1985).** Géodynamique d'un bassin intramontagneux. Le bassin de bas Chélif occidental (Algérie) durant le moi-plio-quadernaire. Thèse Doc. U de Pau. 594 p. 161 fig. B.

📖 **Vittecoq D. Allier, V. Mardhel 2008.** Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique BRGM/RP-56283-fr

ANRH., 2012. Résultats des analyses chimiques fondamentales et complémentaires.

📖 **Vrba J. et Zaporozec A., Eds. (1994).** Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Contributions to Hydrogeology, vol. 16. Heinz Heise GmbH. Hannover

📖 **Zidouri A., 1986.** Contribution hydrogéologique du bassin d'alimentation de Ras El Ain. Mémoire d'ingénieur d'état, Université d'Oran.

Annexes

Annexes1: Les coordonnées géographiques des points d'eau prélevés a la campagne du 24 et 25 octobre 2011

N°	Lieux	Coordonnées Lambert	
		X	Y
1	Puits "Mayouche"	192,608963	267,231845
2	Puits "Aroussi"	192,421147	268,298684
3	Puits "Moulgada"	194,36691	268,370971
4	Puits des "Amandiers"	194,415612	269,468053
5	Puits "Krachai"	195,801259	268,622982
6	Puits "Yaghmorassen"	196,149969	269,691831
7	Source "Ras El Ain"	196,130456	271,228791
8	Puits "Inesmo"	198,502443	268,994999
9	Puits "Mediouni"	197,889398	270,64472
10	Puits "Petit-Lac"	200,33425	270,64788
11	Puits "HLM"	201,49066	272,40069
12	Puits "Saint Eugène"	199,865335	272,333445
13	Puits "Saint Pierre"	198,510219	272,319373
14	Source de "Cueva Del Agua"	199,457434	273,242182

Annexes n° 02 : 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

Annexes n°03 : : Normes des paramètres physico-chimiques (OMS)

Paramètres	Unité	Niveau guide	Concentration maximale admissible
pH		6.5	9
Conductivité	µs/cm	200	1000
Résidu sec	mg/l	-	1500
Dureté totale	°F	-	50
Calcium	mg/l	-	100
Magnésium	mg/l	-	50
Sodium	mg/l	-	150
Potassium	mg/l	-	12
Sulfates	mg/l	-	250
Chlorures	mg/l	-	600
Nitrates	mg/l	-	50
Nitrites	mg/l	-	0.1
Ammonium	mg/l	-	0.5
Phosphate	mg/l	-	5
Oxydabilité (K, Mn, O ₄)	mg/l	-	5
Oxygène dissous	mg/l	-	5
Aluminium	mg/l	-	0.2
Température	°C	-	25

Annexe n° 04 : Les substances indésirables ou toxiques (OMS)

Paramètre	Unité	Niveau guide	Concentration maximale admissible
Argent	mg/l	-	0.05
Arsenic	mg/l	-	0.05
Calcium	mg/l	-	0.01
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
Hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP)	mg/l	-	0.1

Annexes n° 05 : Photos

Photo n° 1 : vue de la superposition du complexe dunaire calabrien sur les marnes blanches du Miocène supérieur à "Gantera" (Ravin blanc).



Photo n° 2 : Emplacement du captage de la source de Ras El Ain



Photo 3 : Vue aérienne du secteur d'étude.



