



Faculté des sciences de la Terre
Département de Géologie

Année 2009

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

**DYNAMIQUE DES SYSTEMES ET STRATEGIE
D'AMENAGEMENT ET GESTION DE LA RESSOURCE
EN EAU EN ZONE SEMI ARIDE :
CAS DE LA REGION D'EL EULMA.
WILAYA DE SETIF**

Option
Hydrogéologie

Par
KHEMMOUDJ Kaddour
(Ingénieur d'Etat en Hydrogéologie. Magister en Chimie analytique)

DIRECTEUR DE THESE : BOUDOUKHA Abederrahmane Professeur , Université Hadj Lakhdar Batna

DEVANT LE JURY

PRESIDENT	:	MESSAADI Djelloul	Professeur, Université Badji Mokhtar Annaba
EXAMINATEURS:		DJABRI Larbi	Professeur, Université Badji Mokhtar Annaba
		HANI Azzedine	Professeur, Université Badji Mokhtar Annaba
		CHABOUR Nabil	M. de Conf, Université Mentouri Constantine
		ROUABHIA Abdelkader	M.de Conf, Université Larbi Tebessi Tebessa

ملخص

تعتبر دراسة حركة الأتربة من بين الدراسات الحديثة في المجال العلمي والإنساني 'ولا إذا السبب فمننا
به الدراسة التحليلية من^أ إذا التوج لمعرفة مدي علاقة الأنظمة الجولوجية ، التربة ، النباتات ،
الحيوانات ، الهواء والإنسان وعلاقتهم مع الموارد المائية في المنطقة الشبه جافة للشرق الشمالي
الجزائري المتمثلة في منطقة العلمة لولاية سطيف .
في الفصل الثاني فمننا بدراسة الموارد المائية وتشمل الجانب المورفولوجي للمنطقة والتساقطات ،
متبوعة بدراسة جوفرائية لمعرفة شكل المكامات الحاوية للمياه الجوفية .أما الدراسة الجولوجية
والدروكمانية لخصت لنا مصادر المياه الجوفية ونوعيتها .
في الفصل الثالث فمننا بدراسة مصادر التلوث وحساسية المنطقة للتلوث مع دراسة تصورية لحركة
الملوثات داخل المكامات الرملية الطينية .
الفصل الرابع والآخر يحتوي على كلفة التلوث والتسرب للموارد المائية في المنطقة.
الكلمات الدالة =النظام ،الحركة ، الجولوجيا ، الدروكمانية ،التسرب ،الحساسية
،التلوث.

Résumé

L'étude des systèmes est entamée afin de comprendre les phénomènes naturels et sociaux d'une région déterminée. En se basant sur l'information collectée sur terrain, nous avons pu définir plusieurs systèmes (géologique, pédologique, végétatif, animal, air et la population) et leur interaction avec la ressource en eau.

Dans la deuxième partie, on a abordé l'étude de cette ressource à l'aide des outils géomorphologiques, hydroclimatologiques, la géométrie des aquifères, l'hydrogéologie, l'hydrochimie qui nous ont permis d'avoir des données sur les ressources en eau souterraine et leur interaction avec le sous sol.

La troisième partie est consacrée à étude des sources de pollution industrielles, agricole et urbaine. L'étude de la vulnérabilité a permis la réalisation d'une carte de vulnérabilité suivi d'une étude de la propagation d'un polluant dans les aquifères.

Dans la quatrième et dernière partie on a soulevé le problème de gestion des ressources en eau avec la proposition de quelques directives pour l'aménagement.

Mots clés : système, dynamique, hydrogéologie, hydrochimie, aménagement, gestion, pollution, vulnérabilité.

Abstract

We begin the system study for understand the naturals and socials phenomons of a determinated area. Using the information collected on the ground, we have defined many systems (geologic, pedologic, vegetal, animal, air and the population) and there interaction with water resource.

In the second part, we have began the study of this resource with some geomorphologic, hydroclimatologic, aquifers geometry, hydrogeology, hydrochemistry tools which we permit to have some data on the groundwater resource and there interaction with the underground.

The third part is devoted to the urban, agricol and industrial pollution sources stueded. The vulnerability study has permitted the realization of vulnerability map added with the study of the propagation of a pollutant in aquifers.

In the forth and last part, we have noted the problem of the management of water resources with the proposition of some directive sustainable.

Key Words: system, dynamic, hydrogeology, hydrochemistry, sustainable, management, pollution, vulnerability.

DEDICACE

A la mémoire de mes parents

A ma famille

Remerciements

le présent travail rentre dans le cadre d'une étude pluridisciplinaire , sur les stratégies d'aménagement et de gestion des ressources en eaux dans une région semi aride (région d'El Eulma) et les facteurs qui les conditionnent .Elle a été réalisée sous la direction du **Professeur BOUDOUKHA ABDERHMANE** de la faculté des sciences de l'ingénieur de l'université Hadj Lakhdar de Batna , je vous remercie d'avoir accepté de diriger cette thèse ,de votre sympathie et votre encouragement ,de me faire profiter de votre expérience et de m'avoir donné plus de liberté dans ce travail.

Mes remerciements vont également aux membres de jury :

Monsieur **le Professeur MESSAADI DJELLOUL** ,de la faculté des sciences de l'université d' Annaba qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury ,je le remercie pour sa disponibilité et son encouragement qu'il trouve ici toute ma gratitude .

Monsieur **le Professeur LARBI DJABRI** , de la faculté des sciences de la terre de l'université d'Annaba d'avoir accepté de juger de soutenance et de participer au jury ,qu'il me soit ainsi permis de le remercier sincèrement.

Monsieur **le professeur HANI AZZEDINE**, de la faculté des sciences de la terre de l'université d'Annaba d'avoir accepté de juger ce travail et de participer au jury de soutenance , je le remercie pour sa disponibilité et qu'il trouve ici toute ma gratitude .

Monsieur **le docteur CHABOUR NABIL**, maître de conférences de la faculté des sciences de la terre de l'université Mentouri de Constantine ,d'avoir accepté de juger ce travail et de participer au jury de soutenance .

Monsieur **le docteur ROUABHIA ABDELKADER**, Maître de conférences de l'université de Tébessa ,qui m'a fait le plaisir de participer au jury et l'intérêt qu'il a accordé à ce travail.

Mes remerciements vont également à monsieur **le Professeur LAOUAR RABAH** , pour les discussions et les prises de photos des lames minces.

Je remercie monsieur **le Professeur MEZIANE TOUFIK** de l'université de Batna pour les conseils durant la période de rédaction de ce travail.

Je remercie monsieur **ZAIDI FAROUK Maître de conférence** , Université Mentouri de Constantine , pour les conseils et les discussions scientifiques dans le domaine de la chimie .

Je remercie vivement monsieur les directeurs et les responsables des laboratoires des entreprises telle que ENAMC (El Eulma) ,Tréfisoude (El Eulma) ,ENPEC (SETIF) ,CRD Sonatrach BOUMERDES , Le directeur du laboratoire de chimie industrielle de université Mentouri Constantine , laboratoire de pédologie de l'université Farhat ABBAS Setif de m'avoir accueilli dans leurs laboratoires pour les analyses des échantillons.

Je remercie **Mr DJAAFER** responsable du laboratoire de pétrographie, département de géologie université d'Annaba pour la préparation des lames minces.

Un grand remerciement à ma femme Nadia et à mes deux filles Sarah et Imane ainsi qu'au petit Aymen qui ont été un symbole de patience et une source de volonté afin que je puisse achever ce présent travail à temps .

Mes remerciements à tous mes collègues enseignants des laboratoires de géologie et de pédologie de l'université A/MIRA Béjaia pour leurs aides et encouragements et en particulier Mrs :Baaziz ,Larachi , Tafer ,Hassissene, Ben Abdelmoumen ,Bennai , Mellahi , Brara et Frites

N°	Tableau	Pages
1	Composition chimique de la matrice solide d'un sol	28
2	Les éléments chimique dans les plantes.....	32
3	Pourcentage des éléments chimiques dans les plantes...	33
4	Plantes endémiques de la région d'El Eulma	34
5	Elevage de la région d'El Eulma	36
6	Animaux de la foret de Ouled Amrane	36
7	Oiseaux migrants des zones humides de la région d'El Eulma.....	39
8	Composition de l'air.....	44
9	Nomenclature de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH) des bassins et sous bassins en Algérie	47
10	Nomenclature des sous bassins versants des bassin versants	47
11	Caractéristiques morphométriques des sous bassins versants	49
12	Indice de compacité	50
13	Densité du drainage	51
14	Tranches d'altitudes partielles et cumulés	51
15	Altitudes pondérés	51
16	Dimension du rectangle équivalent	52
17	Indice de pente	53
18	Classification selon Ig par ORSTOM.....	53
19	Stations d'observations.....	54
20	Série d'observations	54
21	Distributions interannuelle des précipitations mensuelles....	5
22	Précipitations mensuels 1971-2006.....	56
23	Précipitations saisonnières 1971-2006.....	57
24	Précipitations annuelles et coefficients pluviométrique.....	57
25	Lame d'eau méthode de Thiessen.....	59
26	Lame d'eau moyenne.....	62
27	Couverture nivale.....	62
28	Température min ,max, moy.....	63
29	Indice d'aridité.....	64
30	Indice d'aridité selon DE MARTONNE 1923.....	65
31	Indice d'aridité mensuelle.....	66
32	Calcul d'ETP selon Turc et Thorntwaite 1971-2006.....	66
33	ETP des trois stations	70
34	Calcul de ETR selon TURC.....	71
35	Calcul de ETR selon Coutagne	71
36	Calcul de ETR selon Wundt.....	72
37	Bilan hydrique selon THORNTHWAITE station EL Eulma 1971-2006.....	72 73
38	Bilan hydrique selon THORNTHWAITE station Bir El Arch 1971-2006.....	74
39	Bilan hydrique selon THORNTHWAITE station Beni Fouda 1971-2006.....	74
40	Résultats des quatre méthodes.....	74
41	Evolution de ETR de la station d'El Eulma.....	74
42	Ruissèlement.....	75
43	Temps de concentration.....	75
44	Débits instantané selon Samie.....	77
45	Débits instantané selon Turaza.....	77

46	Débits instantané selon Giandotti	78
48	Calcule de la perméabilité.....	85
49	Résistivité des formations géologiques	87
50	Types d'aquifères	89
51	Paramètres hydrodynamiques	92
52	Evolution du nombre des points d'eau	95
53	Forages du secteur étatique	95
54	Répartition des points d'eau analysés	99
55	Les sources de la région d'El Eulma	101
56	Les températures des sources	101
57	La conductivité électrique des eaux de surface.....	102
58	Ph des eaux de sources	103
59	Oxygène dissout des sources.....	104
60	Potentiel Oxydo rédox des eaux de sources	106
61	Analyse des eaux de surface.....	112
62	Evolution des faciès hydrochimique	116
63	Constante A et B.....	126
64	Indice de saturation	127
65	Rapport molaire Sr/Ca.....	133
66	Statistique simple des anions et cations	134
67	Valeurs propre.....	134
68	Matrice de corrélation.....	134
69	Coordonnées de variables	136
70	Statistique simple des métaux lourds.....	138
71	Les formes de l'azote dans l'environnement.....	151
72	Composants de la fumée de l'essence et des tabacs.....	157
73	Paramètre DRASTIC	177
74	Indice de vulnérabilité.....	178
75	Cotation des paramètres DRASTIC.....	189
76	La méthode de résolution des EDP.....	194
77	Paramètre du modèle	206
78	Paramètres physiques des formations géologiques	207
79	Fiche signalétique	212
80	Types de colmatages et remèdes.....	216
81	Colmatages dans les puits d'injection et les remèdes	218

N°	Figures	Pages
1	Organigramme d'interaction de systèmes.....	1
2	Répartition de l'énergie dans unsystème.....	2
3	Carte géologique de la région El Eulma.....	6
4	Carte géologique structurale simplifiée de la région de Sétif1/200000.....	13
5	Présentation du modèle de KaziTani.....	15
6	Bloc diagramme structurale des formations géologiques	16
7	Histogramme de la composition géochimique des calcaires Dj Braou.....	17
8	Histogramme de la composition géologique des calcaires de la nappe de Djemila.....	19
9	Schéma d'une Bactérie.....	20
10	Histogramme de la composition géochimique des argiles du Mio –Plio-Quaternaire.....	21
11	Lame mince des calcaires gréseux de la nappe de Djemila.....	21
12	Lame mince des marno-calcaire du Maestrichien de la nappe de Djemila..	21
13	Lame mince des calcaires à silex	22
14	Lame mince du calcaire jurassique massif Djebel Braou	23
15	Texture des sols.....	26
16	Carte pédologique de la région d'El Eulma.....	27
17	Histogramme de la composition géochimique des sols de la région d'El Eulma	29
18	Carte de végétation de la région d'El Eulma.....	35
19	La foret de OuledAmrane.....	37
20	Vestiges archéologique époque romaine de la région d'El Eulma	41
21	Modèle dynamique de la population.....	42
22	Histogramme de l'évolution de la population de la région d'El Eulma.....	42
23	Carte de la répartition de la population dans la région d'El Eulma.....	43
24	Zones de qualité de l'air.....	45
25	Interaction air ,sol, plante , animaux et homme.....	45
26	Interaction eau ,géologie ,pédologie ,flore ,faune ,air homme.....	45
27	Les différents bassins et leurs sous bassins de la région d'ElEulma.....	48
28	Carte du bassin de la région d'El Eulma.....	49
29	Courbe hypsométrique du bassin de la région d'El Eulma.....	52
30	Carte de position des stations	55
31	Histogramme des précipitationsannuelles.....	56
32	Histogramme des précipitations mensuelles interanuelles.....	57
33	Histogramme des précipitations saisonnières station d'El Eulma	58
34	Coefficient pluviométrique annuel station d'El Eulma	60
35	Coefficient pluviométrique annuel station Bir El Arch.....	60
36	Coefficient pluviométrique annuel station Beni Fouda.....	61
37	Chute de neige 27 décembre 2006 OuledAmrane.....	63
38	Régime thermique Station d'El Eulma.....	65
39	Indice d'aridité mensuel.....	66
40	Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martone 1923.....	67
41	Diagramme Ombrothermique Station d'El Eulma.....	68
42	Carte d'implantation des sondages verticaux (SEV).....	81
43	Coupe géo électrique C avec les forages implantés dans la région.....	82
44	Carte d'égales épaisseurs des sables argileux	83
45	Carte d'égales épaisseurs des calcaires lacustre.....	84
46	Carte de répartition de la perméabilité dans la région d'El Eulma.....	86
47	Coupe hydrogéologiques synthétique	90

48	Conditions aux limites du système aquifère des sables argileux	91
49	Conditions aux limites des calcaires lacustres.....	92
50	Cartes des perméabilités	93
51	Carte des transmissivités	94
52	Carte piézométrique basses eaux de la nappe superficielle 2001.....	96
53	Carte piézométrique nappe basses eaux nappe superficielle 2006.....	97
54	Carte piézométrique nappe hautes eaux nappes superficielle 2006.....	98
55	Carte de situation des sources	100
56	Températures des sources.....	102
57	Variation de la conductivité des sources.....	103
58	pH des eaux de sources	104
59	Oxygène dissout des sources	105
60	Potentiel oxydo- redox des sources	106
61	Diagramme de Piper des eaux de sources	107
62	Diagramme de Schoeller - Berkaloof des sources.....	108
63	Stations de prélèvement des eaux de neige	109
64	Stations de prélèvement des eaux de pluie.....	109
65	Evolution des éléments chimiques des eaux de neige	110
66	Evolution des éléments chimiques des eaux de pluie.....	110
67	Carte de position des stations de prélèvement des eaux de surface	111
68	Evolution spatiale des éléments chimiques sur Oued Djehadi	113
69	Evolution spatiale des éléments chimiques sur Oued Guitoune	113
70	Evolution spatiale des éléments chimiques sur Oued Djermane.....	114
71	Evolution spatiale des éléments chimiques sur Oued Medjaz	114
72	Facies hydrochimique des eaux des Oueds Djermane ,Guitoune ,Medjaz ,DJehadi.....	115
73	Facies chimiques de l'aquifère des sables argileux selon diagramme de Schoeller –Berkaloof .	118
74	Facies chimiques de l'aquifère des calcaires lacustre selon le diagramme de Piper	119
75	Facies chimiques de l'aquifère des calcaires lacustre selon le diagramme Schoeller –Berkaloof	120
76	Facies chimique de l'aquifère des marno-calcaires schisteux selon le diagramme de Piper	121
77	Facies chimique de l'aquifère des marno-calcaires schisteux selon le diagramme de Schoeller-Berkaloof.....	122
78	Facies chimique de l'aquifère des formations carbonatées selon le diagramme de Piper	123
79	Facies chimique de l'aquifère des formations carbonatées selon le diagramme Schoeller –Berkaloof	124
80	Carte des Chlorures basses eaux de la nappe superficielle des sables argileux 2006	129
81	Carte des sulfates basses eaux de l'aquifère superficielle des sables argileux 2006	129
82	Carte du calcium basses eaux de l'aquifère superficielle des sables argileux 2006	130
83	Evolution de la conductivité électrique de l'eau selon le profil Nord Sud 1986-2000-2006.....	131
84	Carte de la conductivité région d'El Eulma 2006.....	132
85	Carte du strontium de la nappe superficielle des sables argileux 2006	132

86	Carte des rapports molaire ($\text{Sr}^{++}/\text{Ca}^{++}$) de la nappe superficielle des sables	133
87	argileux 2006	135
		137
88	Variables (F_1/F_2 62.02)	138
89	Sources de pollution industrielle	139
90	Scattergrams des métaux lourds	
91	Carte de répartition du Plomb dans la région d'El Eulma 2006	
92	Carte de répartition du Zinc dans la région d'El Eulma 2006.....	140
93	Carte de répartition du Chrome dans la région d'El Eulma 2006.....	141
94	Carte de répartition du Nickel dans la région d'El Eulma 2006	142
95	Carte de répartition du Cadmium dans la région d'El Eulma 2006.....	144
96	Carte de répartition du Fer dans la région d'El Eulma 2006.....	115
97	Carte de répartition du cuivre dans la région d'El Eulma 2006.....	146
98	Carte de répartition des phénols dans la région d'El Eulma 2006.....	147
99	Carte de répartition du manganèse dans la région d'El Eulma 2006.....	148
100	Trajet des métaux lourds dans l'environnement	149
101	Le cycle de l'azote dans la nature	150
102	Carte des nitrates 2002.....	152
103	Sebkhat bazer avec rejet des eaux usées	152
104	Carte des nitrates 2004.....	153
105	Cimetière au Nord de la ville D'El Eulma.....	153
106	Carte des nitrates 2006.....	154
107	Carte des P_2O_5 dans la région d'El Eulma 2006.....	155
108	Carte des PO_4 dans la région d'El Eulma 2006.....	156
109	Evolution des concentrations du Nickel ,phénols et du cuivre selon la direction Nord –Sud dans la plaine d'El Eulma	158
110	Evolution des concentrations du manganèse ,du Chrome et du Plomb selon la direction Nord –Sud dans la plaine d'El Eulma.....	159
111	Evolution des concentrations du Fer et des phosphates selon la direction Nord –Sud dans la plaine d'El Eulma	159
112	Zone industrielle de la ville d'El Eulma	160
113	Terrains agricole Sud de la plaine d'El Eulma	160
114	Organisation générale du diagramme de Pourbaix	161
115	Représentation des mesures Eh-pH sur le diagramme d'équilibre du Cd .	160
115-1	Pourcentage du domaine de stabilité du Cd.....	162
116	Représentation des mesures Eh-pH sur le diagramme d'équilibre du Pb	163
116-1	Pourcentage du domaine de stabilité du Pb	163
117	Représentation des mesures Eh-pH sur le diagramme d'équilibre du Cu	164
117-1	Pourcentage du domaine de stabilité du Cu	164
118	Représentation des mesures Eh-pH sur le diagramme d'équilibre du Mn	165
118-1	Pourcentage du domaine de stabilité du Mn	165
119	Représentation des mesures Eh-pH sur le diagramme d'équilibre du Ni	166
119-1	Pourcentage du domaine de stabilité du Ni	166
120	Représentation des mesures Eh-pH sur le diagramme d'équilibre du Zn	167
120-1	Pourcentage du domaine de stabilité du Zn	167
121	Représentation des mesures Eh-pH sur le diagramme d'équilibre du Fe	168
121-1	Pourcentage du domaine de stabilité du Fe.....	168
122	Représentation des mesures Eh-pH sur le diagramme d'équilibre du Cr	169
122-1	Pourcentage du domaine de stabilité du Cr.....	169
123	Représentation des mesures Eh-pH sur le diagramme d'équilibre du N	170
123-1	Pourcentage du domaine de stabilité du N.....	170

124	Modèle Karstique	176
125	Carte des indices de profondeurs	180
126	Carte des indices de recharge	181
127	Carte du matériel aquifère.	182
128	Carte de la nature du sol	183
129	Carte des indices de pente.....	183
130	Carte de la zone non saturée	184
131	Carte des indices de Conductivité	185
132	Carte de vulnérabilité de la région d'El Eulma	186
133	Présentation de la masse élémentaire.....	187
134	Cas de l'effet de la dispersion numérique	196
135	Cas de l'effet de l'oscillation artificiel.....	196
136	Présentation du profile de vitesse d'écoulement.....	197
137	Présentation de la dispersion longitudinale et transversale	197
138	Profile de l'évolution de la concentration du polluant	198
139	Discrétisation des mailles par la méthode des caractéristiques.....	202
140	Discrétisation de la méthode des caractéristiques	205
141	Photo satellite de la ville d'El Eulma avec autoroute Est –Ouest	207
142	Présentation de la discrétisation de la région avec piézomètres .d'observation	208
143	Présentation du polluant dans l'aquifère en 3D avec discrétisation	209
144	Présentation de la propagation du polluant en 3D avec sens d'écoulement	209
145	Évolution de la concentration en fonction de la distance parcourue.....	210
146	Évolution de la concentration avec le temps	210
147	Carte du réseau d'observation des ressources en eau	212
148	Les étapes d'aménagement	213
149	Modèle d'aménagement	214
150	Retenue du barrage de Djebel Diss.....	215
151	Réalimentation par puits dans une nappe libre.....	217
152	Réalimentation par puits dans une nappe captive.....	217
153	Les étapes du système aquifère traitement.....	219
154	Dynamique du SAT.....	220
155	Carte d'aménagement des eaux dans la région d'El Eulma.....	220
156	Conseil locale de l'eau.....	221

A = Concentration molaire
a , b , c, d = coefficients de la réaction
m = La concentration molaire
I = La force ionique
Z_i = La charge d'ion
 γ_i = Coefficient d'activité ionique de l'espèce i
 α = Activité chimique.
IS = Indice de saturation
PAI = Produit d'activité ionique.
K_s = produit de solubilité calculé du minéral
 ΔG_0 = Enthalpie libre standard.
R = Constante des gaz parfait.
T = Température Kelvin
P = Précipitation.
ETP = Evapotranspiration potentiel.
ETR = Evapotranspiration Réel.
RFU = Réserve facilement utilisable.
DA = Déficit agricole.
K = Perméabilité
T = Transmissivité
S = Coefficient d'emménagement
CE = Conductivité électrique.
 θ = Porosité du milieu souterrain.
n = Porosité.
e = Epaisseur.
C^k = Concentration dissout d'espèce k.
T = Temps.
X_{i,j} = Distance de coordonné cartésien .
D_{i,j} = Tenseur de coefficient de dispersion hydrodynamique .
V_i = Vitesse d'écoulement des eaux.
Q_s = Débit d'écoulement par unité de volume de l'aquifère.

Table de matière

Introduction générale.

Partie 1 : LES SYSTEMES

1 Définition	1
1-1 Feed back positive.....	3
1-2 Feed back négative.....	4
1-3 Organisation hiérarchique des systèmes	4
2 Conclusion	4

A-LE SYSTÈME GEOLOGIQUE

1 Introduction.....	5
2 Stratigraphie.....	5
3 Tectonique.	12
4 Géochimie.....	15
5 Conclusion.....	22

B LE SYSTÈME PEDOLOGIQUE

1) Introduction	24
2) Les différentes phases du sol.....	24
2-1 La phase gazeuse.....	24
2-2 la phase liquide.....	24
2-3 la phase solide.....	24
3) Les différents types de sols.....	26
3-1 Sols sans différenciations pédologique particulière.....	26
3-2 Sols à caractères vertiques dominants.....	26
3-3 Sols à profils marqué par la matière organique.....	26
3-4 Sols marqués par les carbonates et les sulfates de calcium.....	27
3-5 Sols à caractères marqués par les sels solubles.....	27
3-6 Sols à caractères hydro morphes dominants.....	27
3-7 Sols rubéfiés.....	27
4) Pédogéochimie des sols.....	28
4-1 Composition chimique moyenne de la matrice solide d'un sol.....	28
4-2 Géochimie des différents types de sols de la région d'El Eulma.....	29
5 Conclusion	31

C- LE SYSTÈME FLORE

1 Introduction.....	32
2 Rôle des éléments chimiques dans les plantes.....	32
3 Concentration moyenne des éléments chimiques % dans quelques plantes.....	32
4 Couvert végétale de la région d'El Eulma.....	33
4-1 Les grandes cultures.....	33

4-2 La culture maraichère.....	33
4-3 Les plantes endémiques de la région d'El Eulma.....	33
4-4 La forêt d'Ouled Amrane.....	35
3 Conclusion.....	35

D- LE SYSTÈME FAUNE

1) Introduction.....	36
2 Elevage de la région d'El Eulma.....	36
3 Les animaux de l'écosystème de la forêt d'Ouled Amrane et les oiseaux migrateurs...36	
4 Conclusion	40

E- LE SYSTÈME POPULATION

1 Introduction.....	41
2 Histoire de la population d'El Eulma.....	41
3 Dynamique de la population.....	41
4 Conclusion.....	43

F-LE SYSTÈME AIR

1 Introduction.....	44
2 Composition de l'air.....	44
3Qualité de l'air.....	44
4 Relation avec les autres systèmes.....	45
5 Conclusion	45
G Interactions systèmes-eau.....	46

Partie 2 : LA RESSOURCE EN EAU

1 GEOMORPHOLOGIE

1.Introduction	47
2. Délimitation et planimétrie du bassin versant	47
3 Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de la région d'El Eulma ...49	
4 Les caractéristiques de forme des sous bassins versants	50
4-1 Les caractéristiques de forme.....	50
4-2 Indice de compacité.....	50
4-3 Densité de drainage.....	50
4-4 Relief et indice de pente	51
4-4-1 Etude et représentation des altitudes	51
4-4-2 Altitude moyen et relief moyen.....	51
4-4-3 Discussion de la courbe hypsométrique	52
4-5 Rectangle équivalent.....	51
4-6 Indice de pente	52
5 Conclusion.....	53

2 HYDROCLIMATOLOGIE

1- Introduction	54
2 -Stations d'observations.....	54
3- Les précipitations	54
3-1- Précipitations annuelles.....	54
3-2 – Précipitations mensuelles	57
3-3- Précipitations saisonnières	58

3-4-Le coefficient pluviométrique relatif H.....	58
3-5-Détermination de la lame d'eau précipitée.....	61
3-5-1- La moyenne arithmétique	61
3-5-2- La méthode de Thiessen.....	62
3-6 La couverture nivale.....	63
4 -Etude de la température.....	63
Calcul de l'indice d'aridité.....	65
5-1 Indice d'aridité Annuelle de Martone 1923	65
5-2 Indice d'aridité mensuelle	66
6 Diagramme pluviométrique.....	67
6-1 Méthode de H.Gaussen et F.Bagnouls.....	67
6-2 Méthode de G.Euverte.....	68
7 Evapotranspiration.....	68
7-1 Evapotranspiration potentiel (ETP) selon la formule de Turc (1962).....	68
7-2) ETP Selon la formule de GW.Thorntwaite (1944).....	69
7-3 Calcul de ETR	71
7-3-1) La méthode de Turc.....	71
7-3-2) La méthode de Coutagne.....	71
7-3-3) La méthode de Wundt.....	72
7-3-4) L'abaque de Verdeil	72
8- Etablissement du bilan hydrique.....	72
8-1) Formule de Thorntwaite.....	72
8-2) Evolution de ETR à station d'El Eulma.....	75
9 Ruissellement.....	75
10 Discussion des résultats.....	76
11 Hydrologie de surface.....	76
11-1 les paramètres caractéristiques d'une crue.....	76
11-1-1 Le temps de concentration	76
11-1-2 Déterminations des volumes d'une crue	77
11-1-3 Détermination des débits instantanés.....	78
11-1-3-1-1- La formule de Turaza.....	78
11-1-3-1-1-La Formule de Giandotti.....	78
11-2 Discussion des résultats.....	78
12 Conclusion.....	79
3-GEOMETRIE DE L'AQUIFERE	
1- Introduction	80
2- Matériels et méthodes	80
3-Carte d'égales épaisseurs des différentes formations géologiques.....	82
3-1 Carte d'égales épaisseurs des argiles sableuses	82
3-2 Carte d'égales épaisseurs des calcaires lacustres.....	83
4 Exploitation de la résistivité apparente pour la détermination des paramètres hydrodynamiques.....	84
4-1 Méthode de corrélation perméabilité –résistivité	84
5 Résistivité des différentes formations géologiques.....	87

6- Conclusion	87
4 HYDROGEOLOGIE	
1 Introduction.....	88
2 Structure géologique et hydrogéologie.....	88
2-1 La nappe de Djemila.....	88
2-1-1) l'aquifère des calcaires à silex d' Yprésien.....	88
2-1-2) l'aquifère des marno calcaires schisteux du Maestrichtien.....	88
2-1-3) l'aquifère du calcaires Cénomanién.....	88
2-2 Le Mio-Plio-Quaternaire.....	88
2-2-2) La nappe des argiles sableuses	88
2-2-3) La nappe des calcaires lacustres.....	89
2-3) Ensemble allochtone Sud Sétifien.....	89
3 Géométrie du système aquifère.....	90
4 Conditions aux limites.....	90
4-1 La nappe des argiles sableuses	90
4-2 La nappe des calcaires lacustres	90
5-Les paramètres hydrodynamiques.....	92
5-1 La carte des perméabilités.....	92
5-2 Carte des Transmissivités.....	93
6 Piézométrie	94
6-1 Inventaire des points d'eau	94
6-2 Évolution de la piézométrie.....	95
6-2-1 Piézométrie de la nappe des argiles sableuses.....	95
6-2 -1 Evolution de la piézométrie entre 1974 -1985.....	96
6-2-3 Evolution de la piézométrie entre 1985-2001.....	96
6-2-3 Piézométrie 2006.....	97
7 Conclusion	98
5 HYDROCHIMIE	
1 Introduction.....	99
2 Répartition des échantillons.....	99
3 Matériels et Méthodes d'analyses.....	99
4 Les sources de la région d'El Eulma.....	100
4-1 La température.....	101
4-2 La conductivité électrique CE	102
4-3 Le potentiel hydrogène.....	103
4-4 Oxygène dissout.....	104
4-5 Le potentiel oxydo –rédox.....	105
5 Diagramme de Piper.....	106
6 Diagramme de Schoeller –Berkalof.....	107
7 Comparaison des eaux de pluie et les eaux de la neige.....	108
8 Les eaux de surface.....	111

8-1	Conductivité des eaux de surface	115
8-2	Facies chimique des eaux de surface.....	115
9	Facies chimique des eaux souterraines.....	116
10	Détermination des faciès hydrochimique des eaux souterraines.....	117
10-1	La nappe des argiles sableuses	117
10-2	La nappe des calcaires lacustres.....	118
10-3	La nappe des marno –calcaire –schisteux.....	120
10-4	Les nappes des formations carbonatées	120
11	Etude thermodynamique des solutions.....	124
11-1	les types de réactions chimiques dans l'eau.....	124
11-2	Activité chimique.....	125
11-3	Indice de saturation.....	126
11-4	Calcul de l'indice de saturation des points d'eau.....	127
11-5	Discussion des résultats.....	127
12	Evolution du calcium , chlore et les sulfates	128
13	12-1 Les chlorures.....	128
	12-2 les sulfates.....	129
	12-3 le calcium	129
14	la conductivité.....	130
15	Le Strontium.....	131
	14-1 Cartographie du Strontium.....	132
	14-2 Evolution du strontium.....	133
16	Analyse en composantes principales.....	134
	15-1 Matrice de corrélation	134
	15-2 Etude des plans factoriels.....	135
17	Conclusion.....	136

PARTIE 3 SOURCES DE POLLUTION

1	Introduction	137
2	La pollution industrielle	137
	2-1 Le plomb.....	139
	2-2 Le zinc.....	139
	2-3 Le Chrome.....	140
	2-4 le Nickel.....	142
	2-5 Le Cadmium.....	143
	2-6 Le Fer.....	144
	2-7 Le Cuivre	145
	2-8 Les phénols.....	146

2-9 Le manganèse.....	147
3Trajet des métaux lourds dans l'environnement	148
4 La pollution agricole.....	149
4-1 Introduction	149
4-2 Le cycle de l'azote	149
4-3 les formes de l'azote dans l'environnement	150
4-3 Discussion des résultats	151
le cycle du phosphore.....	154
5-1 Discussion des résultats.....	155
5-1-1 Les pentaphosphates	155
5-1-2 Les orthophosphates	155
6 La pollution urbaine	156
6-1 Introduction	156
6-2 les différentes sources de pollution.....	156
7 Evolution des concentrations des métaux lourds selon la direction Nord –Sud dans la région d'El Eulma	158
8 Spéciation des métaux lourds	160
8-1 Les diagrammes Eh –pH.....	160
8-2 Représentation des mesures Eh-pH.....	161
9 Conclusions.....	170

3 VULNERABILITE DE LA REGION A LA POLLUTION

1 Introduction.....	171
2 Définition de la vulnérabilité.....	171
3 Les critères de la vulnérabilité.....	172
3-1 Les critères de vulnérabilité intrinsèque.....	172
3-1-1 Critères relatif au sol.....	172
3-1-2 Les critères relatifs à la zone non saturée.....	172
3-2 Critères de vulnérabilité spécifique.....	173
4 Evaluation de la vulnérabilité.....	174
4-1 Les méthodes de cartographie à index.....	174
4-2 les modèles de simulation.....	175
5 Les différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.....	174
5-1 Risk.....	174
5-2 Epik.....	175
5-3 GOD.....	176
5-4 Méthode DRASTIC.....	177
5-4-1 Les paramètres DRASTIC.....	177
5-4-2 Calcul des indices Drastic.....	177
5-4-3 Interprétation de l'indice Drastic.....	178
5-4-4 Condition d'utilisation de la méthode Drastic.....	180
6 Établissement de la carte de vulnérabilité de la région d'El Eulma.....	180
6-1 Paramètre de la profondeur (D).....	180
6-2 Paramètre recharge efficace (R).....	181
6-3 Paramètre nature du matériel aquifère (A).....	182

6-4 Paramètre nature du sol (S).....	182
6-5 Paramètre topographie (T).....	183
6-6 Paramètre impact de la zone non saturée (Vadose) (I).....	184
6-7 Paramètre conductivité hydraulique (C).	184
7 La carte de vulnérabilité finale de la région d'El Eulma.	185
8 Conclusion.....	186
4 MODELISATION DE LA PROPAGATION DES POLLUANTS EN 3D	
1 Introduction	187
2 Equation de conservation de masse.....	187
3 Equation de mouvement.....	188
4 Equation de continuité.....	191
5 Equation de transport.....	193
5-1 Rappel de l'équation différentielle (EDP).....	193
5-2 Méthodes de résolutions des équations différentielles.....	193
5-3 Formulation de l'équation de transport.....	195
5-4 Advection.....	198
5-5 Dispersion longitudinale.....	197
5-6 Coefficient de dispersion.....	198
5-6 Conditions initiales et aux limites.....	202
6 Méthode des caractéristiques (MOC).....	200
6-1 Présentation des équations différentielles hyperbolique du premier ordre	200
6-2 Equation hyperbolique du second degré.....	201
7- Application de la méthode des caractéristiques pour la résolution de l'équation de transport des polluants.....	204
8-Simulation de la propagation d'un polluant dans la nappe superficielle	206
8-1 Présentation du problème	206
8-2 Application de la simulation.	206
8-3 Discussion des résultats.	218
9) Conclusion.....	210
PARTIE 4 STRATEGIE D'AMENAGEMENT.	
1 Introduction.....	211
2 Les différentes étapes d'aménagement des ressources en eaux	211
2-1- Le réseau de suivi et d'observation des ressources en eau.....	211
2-1-1 Le réseau pluviométrique	211
2-1-2 Le réseau hydrométrique	211
2-1-3 Le réseau piézométrique.....	211
2-1-4 Le réseau du suivi hydrochimique	211
2-1-5 Le réseau du suivi de la qualité des eaux et des sources de pollution	211
3 Réalisation d'une banque de données des ressources en eau	212
3-1 Inventaire des points d'eau	212
4 Investigation à l'échelle du bassin versant et collection des données	213
5 Développement du code de police de l'eau	213
6 Application et développement des modèles d'aménagement des ressources en eau dans la région	214

6-1 Les méthodes d'optimisation	214
6-2 Les modèles d'aménagement des eaux de surface.....	214
7 Mobilisation des eaux de surface	215
7-1 Impact du barrage de Djebel Diss sur la région	215
7-1-1 Impact direct.....	215
7-1-2 Impact indirect.....	215
8 Les techniques d'aménagement des eaux dans la région d'El Eulma.....	215
8-1 Aménagement des oueds	216
8-2 Le problème de colmatage dans les diguettes de réalimentation et les types de remèdes.	216
8-3 Réalimentation par puits	217
8-4 Les problèmes de colmatages dans le dispositif d'injection par puits et les types de remèdes.	218
9 Réalimentation par irrigation	218
10 Réalimentation par SAT système.....	218
10-1 Dynamique du SAT.....	219
11 Contrôle de la réalimentation naturel du bassin urbain de la ville d'El Eulma	221
12 Gestion durable des eaux souterraines de la région d'El Eulma	221
13 Gestion des forages et des puits	222
13-1 Alimentation en eau potable (AEP).....	222
13-2 Secteur industriel.....	222
13-3 Secteur agricole	222
14 Conclusion.....	222
5 Conclusion générale.....	223
6 Perspective de recherche	225
7 Bibliographie.....	226

INTRODUCTION GENERALE

L'analyse des systèmes rentre dans le cadre des nouvelles théories et techniques pour la compréhension du mode de fonctionnement et la résolution des problèmes rencontrés dans la vie courante du citoyen dans le cadre social, économique et techniques. Plusieurs théories et formules ont été développées et élaborées afin de trouver des solutions approchées. On peut également trouver des solutions analytiques ou des modèles mathématiques et des techniques d'optimisation.

Les ressources en eau constituent un système, soit sous forme des eaux souterraines (aquifères) soit les eaux de surface, précipitations et d'écoulements.

Les stratégies d'aménagement nommé aménagement intégré des ressources en eaux (**Integrated water resources management**) [I.W.R.M] donnent des solutions optimales des ressources en eaux dans une région pour un développement durable.

Cette thèse a pour cadre l'étude de la **dynamique des systèmes et stratégie d'aménagement et gestion de la ressource en eau en zone semi aride : Cas de la région d'El Eulma wilaya de Sétif**.

La région d'El Eulma appartient aux hauts plateaux constantinois, dans les hautes plaines sétifiennes. L'imitée au Nord par Djemila, au Sud par Ain Lahdjar, à l'Est par Bir El Arch et à l'Ouest par Ouled Saber.

Les ressources en eau considérées comme un système qui évolue dans l'espace et dans le temps, sont influencées aussi par la géologie, la pédologie, la végétation et la population dont la qualité peut être dégradée. La notion de système a été abordée sous l'angle des conditions naturelles. L'analyse de la quantité et la qualité des ressources en eau a été abordée selon une stratégie d'aménagement, pour atteindre un équilibre entre systèmes.

Pour répondre à ces préoccupations, cette étude comporte quatre parties.

Dans la première partie on a concerné la définition d'un système et la présentation de ces derniers évoqués dans le travail il s'agit :

Du système géologique dont lequel nous aborderons la description de la géologie, la structure et ses conséquences sur la présence du système aquifère ainsi que la géochimie des roches de la région ;

Du système pédologique dans lequel nous abordons la répartition, la description et la pédogéochimie des différents sols ;

Du système végétal au cours duquel nous étudierons les types de couvert végétal, les différentes cultures appliquées et développées dans la région ;

Il sera également question de l'élevage et de l'inventaire des oiseaux migrateurs dans la zone humide de Sebkhat Bazer ;

La population, sa répartition, sa densité et son évolution dans la région ;

L'air qui constitue un système très important dans la vie avec l'eau ;

La présentation de l'interaction entre les différents systèmes.

Dans la deuxième partie on a étudié les ressources en eau, par le biais de :

La présentation de la géomorphologie du bassin versant de la région étudiée.

L'étude hydro climatologique, avec une étude de la température, les précipitations et le bilan hydrologique.

La géométrie de l'aquifère.

L'hydrogéologie de la région avec une présentation des différents aquifères, les paramètres hydrodynamiques et l'évolution de la piézométrie.

L'étude hydro chimique, avec le présentation des paramètres physico chimiques, les faciès hydro chimiques, le traitement statistique des données et leur répartition dans l'espace et dans le temps.

Dans la troisième partie , on a abordé les sources de pollution rencontrées dans la région, la modélisation de la propagation d'un contaminant dans l'aquifère superficiel des argiles sableuses en 3D et la présentation de la carte de vulnérabilité de la région à la pollution.

Dans la quatrième partie, concerne l'aménagement et la gestion des ressources en eau dans la région d'El Eulma.

Nous avons achevé notre travail par une conclusion générale et par les perspectives de recherche.

1^{ère} Partie

Les Systèmes

1 Définitions.

Un système est un ensemble de phénomènes et d'évènements interdépendants que l'on extrait du monde extérieur par une démarche intellectuelle, en vue de traiter cet ensemble comme un tout.

On peut dire qu'un système est une portion de l'univers, implique qu'aucun système n'est isolé. Cela conduit à la notion d'organisation hiérarchique. C'est tout un ensemble de parties (ou d'éléments) interconnectés par des liaisons fonctionnelles dont résultent trois catégories de propriétés qui se suivent (Serge Frontier, Denis Pichot-Vial, 1998) :

L'ensemble d'éléments peut être représenté sous forme d'organigramme d'interactions dont lequel les lettres désignent des compartiments (éléments du système) et les flèches les interactions de toutes natures. Fig N°(01).

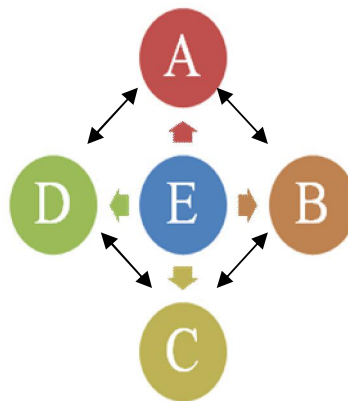


Fig N° 1 Organigramme d'interactions des systèmes.

L'agencement plus au moins complexe des actions crée un ensemble qui les caractérise d'une entité nouvelle, et manifeste des propriétés différentes de la simple superposition des propriétés des éléments.

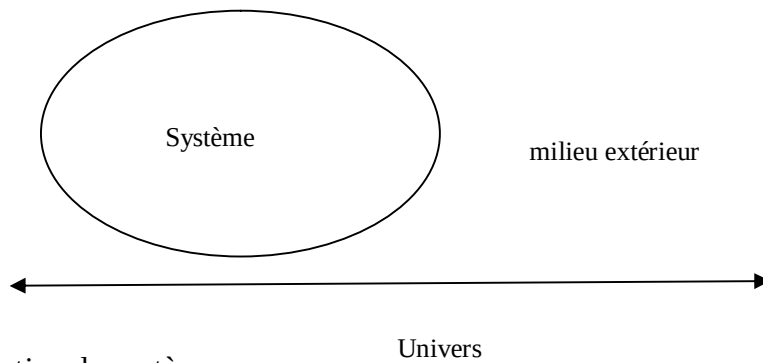
Le système agit sur les propriétés, le fonctionnement et l'évolution des éléments.

Bleefert et Perraud (1997) ont également défini aussi un système comme : Un ensemble constitué de plusieurs parties regroupées et combinées, c'est un groupement comportant des parties, qui sont en interaction les uns avec les autres. Un système est plus qu'une juxtaposition de parties, il se comporte différemment des parties qui le constituent. Il se différencie de la somme des parties qui le constituent qui sont la structure, l'organisation et le réseau des interactions.

Thermodynamiquement :

1 Un Système : ensemble d'objets ou de substances qui appartiennent à un domaine de l'espace. Ce qui n'est pas le système constitue le milieu extérieur.

L'ensemble du système et du milieu extérieur constitue l'univers .



Description du système

a) Paramètres d'état :

L'état d'un système est décrit par la connaissance d'un petit nombre de grandeurs macroscopiques appelées paramètres d'état ex T , P, V , n ... Certains de ces paramètres ne sont pas indépendants mais peuvent être reliés par une ou plusieurs équations d'états .

Ex : l'équation d'état des gaz parfaits : $PV = nRT$

Avec R : constante des gaz parfaits $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

P : Pression à l'intérieur du système en Pascal (Pa)

V : Volume du système en mètre cube (m^3)

T : température du système en Kelvin (K)

n : Nombre de moles de gaz du système en moles

b) Paramètres intensifs et extensifs :

Un paramètre intensif est proportionnelle à la quantité de matière .Il est définie pour l'ensemble du système .

Ex : V , masse , quantité de matière , charge électrique

Un paramètre intensif est défini en chaque point d'un système et est indépendant de la quantité de matière. Ex : T , P ...

3) Transferts possibles entre le système et le milieu extérieur.

- Transfert d'énergie sous forme de la chaleur notée Q et sous forme de travail mécanique noté W ou de travail électrique noté W' .
- Transfert de matière .

4) Différents types de systèmes .

Selon la nature de la frontière entre le système et le milieu extérieure, on distingue différents systèmes :

Système fermé : Il n'échange pas de matière avec l'extérieure ; Exemple : réacteur clos, montage à reflux.

Système isolé : aucun transfert avec l'extérieur ; exemple univers.

Système ouvert : il échange de la matière et de l'énergie avec l'extérieur ; Cellule vivante .

Système	Nature des transferts		Exemple
	Énergie	Matière	
Isolé	Non	Non	Univers
Fermé	Oui	Non	Montage à reflux
Ouvert	Oui	Oui	Cellule vivante

Le premier principe dit aussi principe de conservation de l'énergie, stipule que :

L'énergie du système se conserve au cours des transformations du système

L'énergie du système est seulement transformée d'une forme d'énergie en une autre

L'énergie d'un système isolé reste constante, $U = \text{cte}$.

L'énergie d'un système non isolé peut varier par suite d'échange d'énergie (Q, W) avec le milieu extérieur, alors le système évolue d'un état 1 à un état 2 : on dit qu'il subit une transformation.

La variation d'énergie interne du système au cours d'une transformation est égale à la somme algébrique des énergies échangées $W+Q$

L'énergie interne du système varie donc pendant la transformation de

$$\Delta U = U_2 - U_1 = W + Q$$

Expression mathématique du premier principe est donc :

Pour un système fermé

Si la transformation est finie : $\Delta U = U_2 - U_1 = W + Q$

Si la transformation est élémentaire $dU = dW + dQ$

Pour un système ouvert

c.à.d pour un système avec écoulement de fluide , il faut ajouter en plus la variation d'énergie cinétique du fluide .

$$\Delta U + \Delta E_C = W + Q$$

A température et pression constantes, on définit l'entropie (dS) qui exprime l'écart par rapport à un arrangement parfaitement ordonné des atomes.

La deuxième loi de la thermodynamique selon laquelle « la chaleur ne peut passer d'elle-même d'un corps plus froid à un corps plus chaud » permet d'établir la relation entre les changements d'entropie et d'énergie dans un système à température et pression constantes.

$$dS = dQ/T$$

Aux températures très basses l'ordre des atomes atteint presque la perfection et on considère que cette perfection est atteinte et que $S = 0$.

Un système en équilibre permet de vérifier la relation suivante :

$$G = U + PV - TS$$

Et sa dérivée :

$$dG = VdP - SdT$$

Un système est d'autant plus stable, il a d'autant moins de chance de se transformer à

température et pression constantes que son énergie libre est plus faible. Fig 2

La systémique est l'étude logique de tel ensemble. Elle analyse la manière dont les propriétés des éléments et leurs interactions aboutissent à des propriétés globales spécifiques.

La notion de boucle de rétroaction ou Feed-back est définie comme étant une interaction réciproque entre les éléments A et B. Une action dans un sens (A vers B) a pour corollaire une action en sens inverse (B vers A)

1-1 Feed-back Positive :

Un Feed Back est positive si une modification entraîne par rétroaction et une accélération de cette modification. La boucle étant permanente, selon les cas suivants :

On a une diminution exponentielle de la grandeur concernée entraînant une extinction de l'élément ;

On a une augmentation exponentielle ou emballement basculement du système dans un autre état.

1-2 Feed –Back négative

Un Feed –Back est négative si une modification entraîne l'apparition des forces qui s'y oppose et le ralentissent. La boucle étant permanente, il s'ensuit une régulation du phénomène.

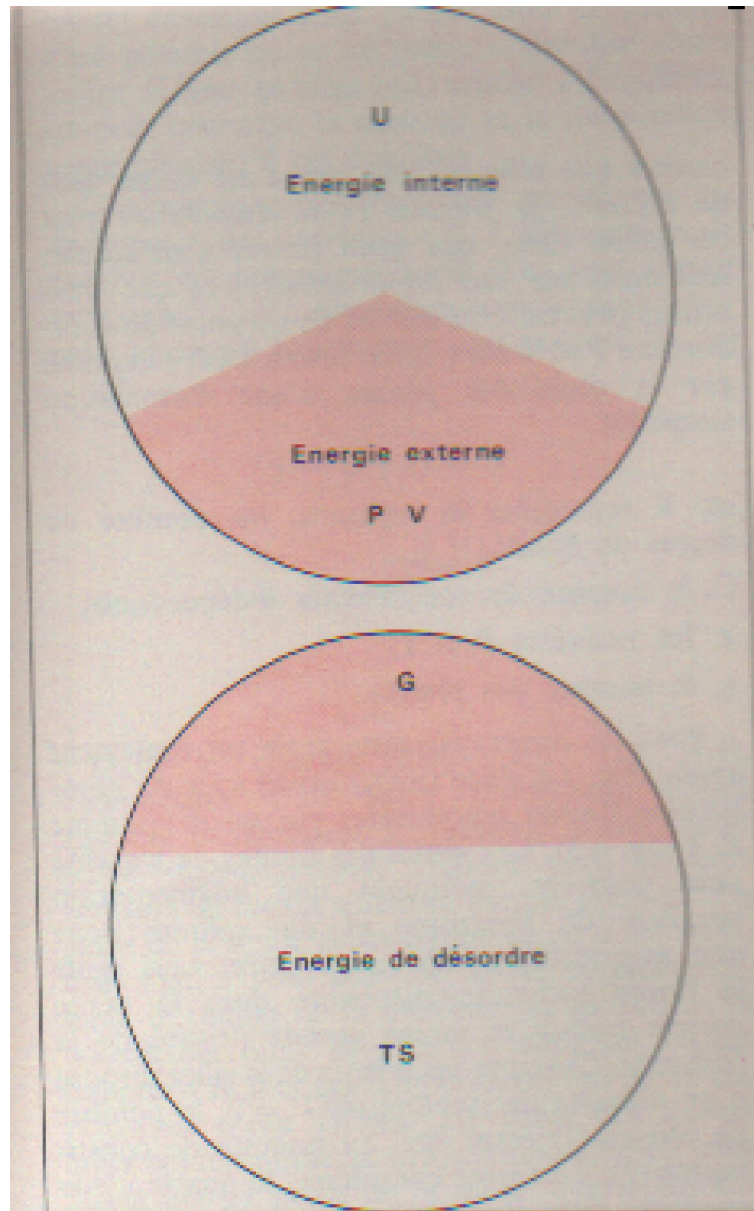


Fig N ° 2 Répartition de l'énergie dans un système.

1-3 L'organisation hiérarchique des systèmes.

L'analyse d'un système complexe permis de voir que les éléments sont eux mêmes complexes, chacun d'eux pouvant lui-même être analysé en tant que système (ou sous système).

A travers cette étude on a définie dans la région d'El Eulma 6 systèmes.

- Le système géologique.
- Le système pédologique.
- Le système végétal.
- Le système animal.
- Le système air.
- Le système population.

L'ensemble de ses systèmes sont en interaction entre eux et avec le système eau.

2 CONCLUSION :

L'étude de la théorie des systèmes permet de définir un système, son organisation et son interaction, on a définie les systèmes géologique, pédologique, végétal, animal, l'air et la population et leurs interactions avec La ressource en eau.

Géologie

1-)Introduction.

La région d'El Eulma appartient aux hautes plaines sétifiennes. Parmi les auteurs qui ont travaillé dans la région on peut citer J.Savornin (1920), R.Guiroux (1973) qui ont pu faire de nouvelles datations des formations géologiques de Dj Braou et Youcef . J.M.Villa et M.Leikine avec leur mise en valeur de la région de Sétif ont précisé la cartographie des hautes plaines Sétifiennes. Cette région est le siège de deux types de formations .Ceux qui sont peu ou pas tectonisées comme ceux du Quaternaire et ceux qui sont tectonisées pour le reste des terrains .

2-)Stratigraphie

2-1) Formations peu ou pas tectonisées.

2-1-1) Quaternaire

2-1-1-1) Villafranchien.

Il est formé par les calcaires lacustres des sols à croute calcaire et des cailloutis fluviaux. Ces formations sont caractéristiques des hautes plaines. Elles sont datées à Ain Boucherit et à Ain Hanech au Nord de la ville d'El Eulma dans les conglomérats situés sous les calcaires ; par des restes abondants de vertébrés. Fig. N°03

On distingue :

Un Villafranchien inférieur avec Anancus Osiris, ELéphas Aricanus, Huppopotamus Amphibus

Un Villafranchien supérieur avec Libythrion SP.

2-1-1-2) Glacis polygéniques nappant les reliefs.

On note un glacis ancien encrouté de cailloutis roulés ,de teinte brun rougeâtre à morphologie typique de glacis, visible uniquement aux environs d'Ain Lahdjar.

Les glacis polygéniques nappant les reliefs constituent la forme de relief caractéristique des hautes plaines sétifiennes.

2-1-1-3) Terre Arable, Formation de pente ; alluvions anciennes et quaternaire indéterminé.

Les terres arables sont installées sur des placages limoneux et supportent un sol brun peu ou pas calcaire.

2- 1-1- 4 Alluvions actuelles et récentes

Ce sont des sables, des limons, des graviers et des cailloutis. Ces formations se sont développées le long des oueds.

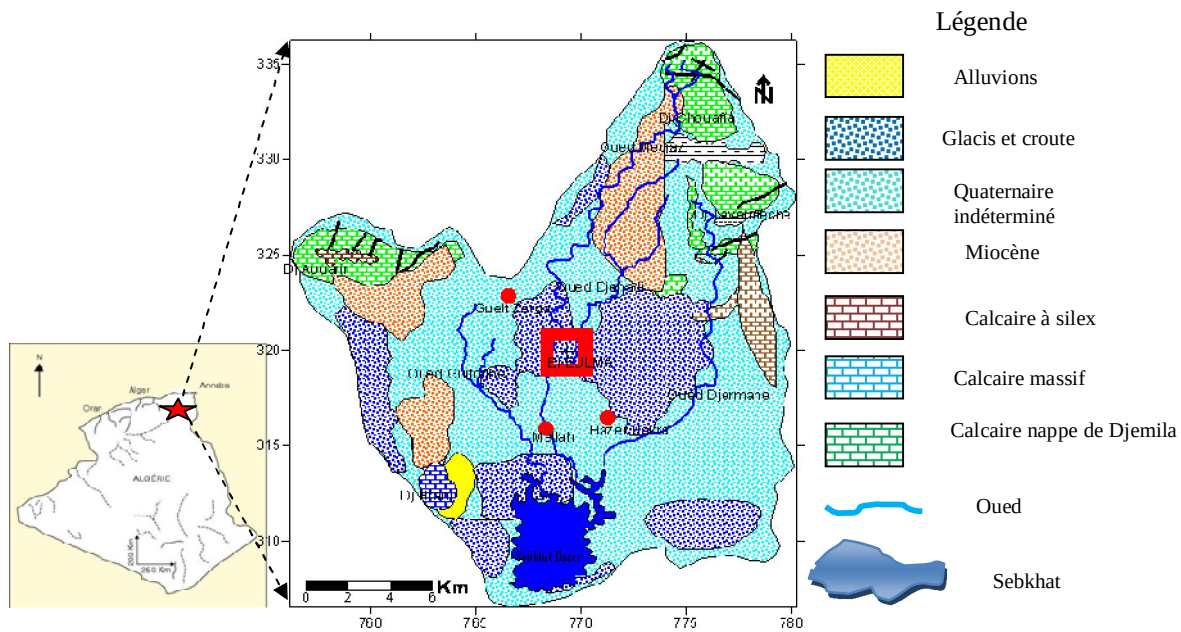


Fig N° 3 Carte géologique de la région d'El Eulma

2- 1- 1 – 5 Sols de Sebkhat

Se sont des vases salées qui garnissent Sebkhat Bazer, chotte El Frain, sebkhat EL Hamiet et Chott El Beida .Ces vases sont périodiquement inondables surtout pendant la saison des pluies et couvertes par des croutes salines pendant la saison sèche.

2-2) Mio –Pliocène continental.

Il est formé par des limons et des conglomérats rouges, des poudingues, des argiles gypseuses, des amas de galets et d'argiles rutilantes. C'est un ensemble très complexe de formations continentales occupant de vastes espaces dans la région. On a également des conglomérats à gros graviers surmontés par des argiles grises rougeâtres à niveau micro conglomératiques avec un niveau de lignite d'épaisseur 40m. Au dessus de cette série ,on a des argiles et des marnes parfois gypsifères alternent vers le haut avec des niveaux de calcaire lacustres dont l'épaisseur varie entre (150 -200) m. Au sommet , la série devient variable avec des intercalations lenticulaire, de poudingues grossiers ,des argiles ,à lentilles de lignite friable avec des lits gréseux gypsifères à petit bancs de calcaires .L'épaisseurs varie entre 150 à200 m . La série se termine par des dépôts fluviaux –lacustres de constitutions variés : Poudingues, calcaires stratifiés, lentilles de cailloutis et d'argile noire. L'épaisseur est de 150 m environ.

2-3 Formations Telliennes tectonisées :

2-3-1 Nappe de Djemila

2-3-1-1 Yprésien –Lutétien inférieure.

Cet étage est formée par des calcaires bitumineux blancs à cassure noire et à silex noirs. formé du haut en bas par :

- Des calcaires marneux noirâtres, gréseux ayant une épaisseur de 20m
- Des calcaires massifs gris ou blancs riches en silex ayant une épaisseur de 80 m
- Une alternance de marnes, de calcaires, de marnes calcaires ayant une épaisseur 100m

2-3-1-2 Maestrichtien supérieur au Paléocène .

Il est formé par des marnes noires parfois à boules jaunes. Cet ensemble affleure sur de faibles étendus, représenté par des marnes noires à grise à rares boules de calcaires jaunes. Au sommet de la série apparaissent des calcaires décimétriques à Huitres et Inocéramus. Cette série a une épaisseur très variable de 100 à 150 m suite aux phénomènes tectoniques consécutifs. On y rencontre comme microfaunes Globotruncana contusa, Globotruncana stuarti

2-3-1-3 Campanien supérieur et Maestrichtien.

Il s'agit de calcaires bien réglés en bancs métriques et riches en débris organiques. Cet ensemble est essentiellement carbonaté, les Lamellibranches sont abondants dans ces niveaux lumachelliques on y trouve des Gastéropodes, et des Echinodermes.

2-3-1-4 Campanien –Maestrichtien inférieur.

Il est formé par des marnes noires à boules jaunes, l'affleurement de cette série ne dépasse pas 1.5 Km². Ce sont des marnes à boules jaunes de très petite taille avec leur sommet quelques intercalations de calcaires marneux. L'épaisseur atteint 150 m on y trouve des Globotruncana formicata du Campanien supérieur et Globotruncana au sommet de la série du Maestrichtien.

2-3-1-5 Santonien supérieur à Campanien.

Il s'agit d'une alternance de marne grise ou gris noir et de calcaires en bancs métriques ocre ou blanchâtre lumachellique à Huitre. Le sommet est Campanien l'épaisseur de cet ensemble est environ 100m

2-4 Nappe Nérétique Constantinoise.

La nappe néritique constantinoise est visible dans la partie Est, à Djebel Meksem, Djebel Chebka, au Sud Est du Djebel Tnoutit est seul l'aptien visible.

Il s'agit d'une série renversée du Djebel Chebka qui débute par une barre calcaire à Réduste de 15m et se poursuit par 150 m de calcaires bien lités à Salpingoporella et à Dunaria et Ouvalviolina Reicheli

2-5 Ensemble Allochtone Sud Sétifien : Série des Djebels Yousef, Brao, Tnoutit Tafourer, Agmerouel, Ecaïlle d'Ain Lahdjar, Koudiat Tella, Série Supérieure de Djebel Kalaoun

2-5-1 Miocène :

Le Miocène débute par des conglomérats rougeâtres qui ravinent son substratum, il repose sur le Barrémien et au dessus des calcaires gréseux roux et des biosparites. La série se termine par des marnes jaunâtres ou rosées dont l'épaisseur varie entre 200 et 250 m.

2-5-2 Eocène :

Ce sont des calcaires blancs biosparitiques et détritiques (quartz et galets de silex noirs) surmontés de calcaires massifs à thersitées . L'épaisseur est de 100m à Oum Ladjoul et 50 m à Ain Lahdjar et à Beida Bordj.

2-5-3 Paléocène :

Se sont des marnes à débris d'*Exogyra Overwegi* et des argiles brunes –jaunâtre en surface, grises en profondeur gypsifère avec des petits bancs de calcaire marneux. Les marnes n'ont fourni que des Ostracodes et comme microfaunes *Globogérina* et *Globorotalia*. L'épaisseur est de 40 m.

2-5-4 Sénonien supérieur :

Il affleure au Nord de Djebel Sekrine, Djebel Kalaoun et à la Koudiat Tella. L'épaisseur est de 100 m, parfois gréseux en bancs de 2m. Les calcaires sont à cassure brillante (biosparite à Bryozoaires Echinodermes). L'épaisseur est de 100 m, la microfaune rencontrée est de type *Rotalia* et *Globotruncana*.

2-5-5 Albien –Vraconien :

Il est formé par des argiles et des marnes, des grès et des biosparites à *Mélobesoides* . En dessous de la barre Céno-mano-Turonienne avec des marnes jaunes contiennent des Echinides (*Hemiastrum batnensis*, *Hétérodiaderma Libycum*). L'épaisseur est de 60 m

2-5-6 Aptien calcaire à Orbitolines et couches à Ovalveoline reicheli au sommet.

L'albien débute par des calcaires bien lités en gros bancs de 50cm à 2 cm, à patine rousse ou brune, cassure beige ou grise. La microfaune est abondante et indique l'Aptien avec *Mésorbitolina Texana*, *Orbitolinopsis* sp, *Dasycladacées* et *Milioles*.

2-5-7 Aptien marneux.

Dans cette formation dominent les marnes jaunâtres très caractéristiques, datées par *Palorbitolina lenticularis*. La série ne dépasse pas 60 m

2-5-8 Barrémien : calcaire massifs, dolomies marnes et grés.

C'est une formation complexe composée de calcaires, dolomies et de grés avec de minces intercalations gréseuses ou marneuses. Cette série a une épaisseur de 500 m. Le Barrémien est représentée au Djebel Youcef et Djebel Tnoutit. C'est une série calcaire dolomitique et gréseuse à grosses barres dolomitiques rousses de 25 à 30 m d'épaisseur. Le Barrémien inférieur est caractérisé par *Choffatella Décipiens*, *Salpingoporella Muchlbergi*. Le Barrémien supérieur a livré *Palorbitolina lenticularis* et les *Dasycladacées*.

2-5-9 Néocomien : Marnes à petits bancs, Calcaires bio- détritique à Ammonites.

Les faciès du Néocomien sont variables ,il s'agit d'une série à dominance argileuse ,riche en intercalations carbonatées ,calcaires à Algues ,Ammonites .L'épaisseur est de 100 m ,avec la présence des Exogyras couloni ,Nautiloculina sp ,Milioles et Ostracodes .

2-5-10 Jurassique supérieure : Calcaire graveleux, calcaires à Clypeina jurassica, calcaires à Dasycladacées.

Le passage Crétacé –Jurassique est marqué par un faciès carbonatés graveleux beige à polypiers .L'épaisseur est de 20 m à Djebel Tafourer ,avec la présence de niveaux de débris de Gastéropodes silicifiés riches en Dasycladacées . Au sommet on a une masse de calcaire massif dont l'épaisseur est de 80 m riche en Kurribia Palastiniensis,Clypeina jurassica et Salpingoporella Annulata .

2-5-11 Jurassique moyen –supérieur : dolomitique

Les dolomies jurassique englobent de vastes lentilles de calcaires gris à grains fins en bancs de (20 –50) m avec des débris d'Ammonites .L'épaisseur est de 150 m. Au sommet on a une masse dolomitique azoïque.

2-5- 12 Dogger : Calcaire, Calcaire marneux lités.

C'est une formation de calcaire marneux fins à patines claire, à cassure grise d'une épaisseur de (250 –300 m) avec à la base des niveaux gris bleu à rognons de silex roux. Ces niveaux contiennent des débris de Lamellibranches, Echinodermes.

2-5-13 Lias : Marnes à Ammonites, Calcaires et Dolomies.

A Draa El Kenchoub, on a une dizaine de mètres de marnes verdâtre à jaunâtre à petit bancs de calcaires à Ammonites .Le Lias calcaro dolomitique peut dépasser 100 m.

2-6 Série à Jurassique intermédiaire de l'unité inférieure de Djebel Kalaoun :

2-6-1 Jurassique Dolomitique :

Cet étage est formée par une centaine de mètres de dolomie grise à grains fins visible au cœur de l'anticlinal.

2-6-2 Malm (Jurassique supérieur à Saccomomidés puis Calpionelles) pélagique.

Le Malm est représenté par quelques mètres de biomicrite à Calpionnelles ,la base de la série des calcaires fins à radiolaires et Saccocoma représente le Kimmeridgien –Portlandien et l'ensemble ne dépasse guère une dizaine de mètres

2-6-3 Berriasien à Vallanginien :(Néocomien pélagique) biomicrite à Calpionnelles

C'est un ensemble bien lité de calcaire fin en petits bancs de (5 -60) cm dont l'épaisseur est de (150 – 200) m. Ces calcaires sont de patine claire ,blanche ou jaunâtre ;la cassure a les mêmes teintes . Comme faune on a les Tintinnopsella Longa, Calpionellites Darderi pour le Valengignien inférieur, le Berriasien a été daté avec Tintinnopsella Carpathice.

2-7 Ensemble parautochtone et autochtone Hodnéen :

Les formations parautochtones sont représentées par la série du col Tifelouine, Djebel Hadjar Labiod (Ain Azel) et Djebel Gouzi, les série autochtones occupent une mince frange.

2-7-1 Miocène : Conglomérats, marnes jaunes à huitres, calcaires gréseux, grés roux

Le Miocène forme une longue bande depuis le kef Mounchar jusqu' 'au sud du Djebel Tafourer, c'est une série complexe avec des bancs de poudingues, de calcaire gréseux, des grés blancs, des marnes grises, des argiles à gypse, des marnes jaunes et des calcaires. Cette complexité provient du caractère lenticulaire de la plupart des niveaux. L'épaisseur du Miocène varie de (200 – 250) m surtout au Djebel Tifalouine.

2-7-2 Oligo –Miocène : Argile et Poudingues rouges.

Cette formation n'a été repérée que dans le col de Tifalouine. Ce sont des couches rouges d'argilites et de conglomérats.

2-7-3 Lutétien supérieur : argiles et poudingues rouges.

Série absente dans la région

2-7-4 Yprésien –Lutétien inférieur : Calcaires à silex, Calcaires phosphatés et couches à Thersités.

L'éocène n'a été reconnue que dans l'écaille du col de Tifalouine, se sont des calcaires massifs biosparitiques à débris de Gastéropodes (Thersités) et a petits galets de silex ne dépassent pas les 100 m.

2-7-5 Dano –Paléocène à Yprésien : Marnes noirâtre.

Se sont des marnes Suessoniennes de J.Savornin correspondant aux marnes argileuses noirâtres, avec des rares intercalations de Lumachelles, avec Exogyra –Overwegi

2-7 -6 Sénonien Supérieur : Marnes à galets marno calcaires et calcaires parfois gréseux à Orbitolines.

Le Campanien commence par une série marneuse avec des intercalations Lumachelliques, puis vient le Maestrichtien avec les calcaires .L'ensemble ne dépasse pas 350-400 m .La microfaune benthonique est très abondante avec des Orbitoides Média Cuneolina sp et des Miliolites

2-7-7 Sénonien inférieur : Marnes sableuses à galets, Calcaires, calcaires marneux, Lumachelles à Ostréidés.

La série ne dépasse pas 150 m d'épaisseur et montre des marnes jaunes verdâtres, sableuses à petits galets roulés (grés, silex) et une barre de quelques mètres de calcaires à galets dans les marnes. La série se rencontre à la périphérie du Djebel Otsmane et l'anticlinale de Ouled Tebbane, Dans le bassin versant de Bousselam.

2-7-8 Céomanien supérieur Turonien : Calcaire massifs et biomicrites à Miliolidés

Cette barre calcaire est très développée aux pieds du Djebel Mahdjouba et dans la série de Tifalouine. A la base des calcaires à rognons de silex clairs et à lits de chailles blanches ou beiges contenant Pseudorhynchonella Dubia, Spiroloculina Sp, Valvulina Picardi, c'est le Céomanien supérieur l'épaisseur est de 100 m. Au dessus, des marnes et des calcaires dolomitiques à débris d'Hippuritidés représentant le Turonien l'épaisseur est de 100 m.

2-7-9 Albien –Cénomanién : Marneux, grés, marnes jaunes.

L'Albien inférieur n'a pas été caractérisé. Au Djebel Hadjar Labiod, le Vraconien dont l'épaisseur est de 80-100 m repose directement sur l'Aptien calcaire, il est constitué par un ensemble de calcaire en petites dalles de grés et de marnes gréseuses jaunes à *Nautilus* élégants, *Oxytropidocères* sp. Au dessus, on a des intercalations de calcaires de calcaires marneux en plaquettes, le Cénomanién est marneux et il est épais de (250-300 m) avec une très riche faune de Lammélibranches et de Débris d'Echinides.

2-7-10 Aptien : Carbonaté, dolomie et calcaire à Orbitolines.

La série commence par une barre dolomitique de (10 -15) m d'épaisseur, se poursuit par des calcaires en gros bancs bien lités riches en Rudistes à Huitres et à Orbitolines. L'ensemble a une épaisseur de (300-350) m. Au Djebel Mahdjouba (anticlinale) et dans le col Tifelouine (série renversée), les derniers 100 m sont des calcaires riches en Miliolites et en Ovalvéoline Reicheli, *Pseudocyclamina* *Vascomina*, *cuneolina* sp *Orbitolina* sp *Quinqueloculina*SP, *Spiroloculina* sp.

2-7 -11 Aptien : marneux.

Cette formation de (60 – 80) m d'épaisseur est à dominance marneuse avec des intercalations d'argiles verdâtre dures et de petits bancs de grés et de calcaires marneux. Les marnes ont livré *Exogyra Latissima* et *Toucassia Carinata*

2-7 -12 Barrémien : Grés, Calcaire, Dolomie et petits niveaux marneux.

La lithologie du Barrémien est très variée, on y rencontre des dolomies, des grés roux, des intercalations argileuses et marneuses, des calcaires divers. Le Barrémien est caractérisé dans l'anticlinal du Djebel Mahdjouba , Djebel Fourhal .L'épaisseur varie de entre 650 et700m. Les calcaires à Algues (*Salpingoporella* *Muelhbergir*, *Nautiloculina*), des niveaux Lumachelliques ont livré près de Kherzet Youcef, *Exogyra* et *Toucasia* sp.

2- 7-13 Néocomien : Argile pélitique, grés, marnes à Ammonites et Brachiopodes.

Cette formation n'est visible qu'au pied du Djebel Mahdjouba. Se sont des marno –calcaires et des marnes, au dessus se développent des argiles, des marnes et des pélites. L'épaisseur peut atteindre 300 m. Comme faune on a *Aléctryonia* ef, débris de *Pyropes*, *Ammonites* ; le sommet de la série est daté du Valenginien par la présence de *Phylloceras* serum.

2-7-14 Jurassique supérieure Pélagique : marnes et calcaires marneux.

La série commence par 150 m de marnes à nombreuses intercalations de micrites, au dessus on a 100 m de micrites en petits bancs datés du Portlandien. On y trouve comme faune des *Saccocoma*, des *Radiolaires* et *Ostracodes*.

2-7-15 Jurassique Moyen : Dogger Pélagique, calcaire Jurassique Moyen : Dogger Pélagique, calcaire.

Ce sont d'abord une centaine de mètres de calcaire argileux, puis 40 m de couches marneuses, puis 50 m de dolomies, la série se termine par 40 m de formations marneuses avec des intercalations de calcaires à *Bélemnites* et *Cancellophycus*(Dogger).

2-7 -16 Lias supérieur (Toarcien) : Marnes et calcaires marneux à Ammonites.

Ce sont des marnes blanchâtres avec des plaquettes calcaires et des marno-calcaires en petits bancs de 2m. L'ensemble ne dépasse pas une vingtaine de mètres. Comme faune on rencontre des Lytocéras et des bélemnites associés à des foraminifères (Nodosaria sp).

2-7-17 Lias Carbonaté massif .

C'est une masse essentiellement dolomitique avec au sommet quelques niveaux de calcaires à silex et de dolomies à nodules siliceux. Cette série affleure sur une centaine de mètres d'épaisseur ; Il s'agit du Lias moyen à inférieur au Toarcien (Dérocra sp et Platyleuraceras).

2-8 Trias.

Il affleure en masse chaotique, sans aucune stratification. Dans ces masses, divers éléments sont reconnaissables, calcaire dolomitique sombre dolomies noirâtres, cargneules jaunâtres, argiles bariolées, gypses roses ou blancs, des grès verdâtres à ciment argileux et des roches vertes altérées à tendance ophitique.

3- Tectonique.

La région d'El Eulma est caractérisée par la présence des formations telliennes. Au Nord elle est représentée par la nappe de Djemila, au Sud par l'ensemble allochtone Sud Sétifien et le Mio – Plio – Quaternaire au centre **Fig. N°(4)**

3-1 La nappe de Djemila.

Elle est caractérisée par la présence des plis de grand rayon de courbure qui déterminent les vastes anticlinaux de Djemila, Djebel Medjounes, Ouled Saber, Djebel Tavoudèche, se sont des structures post nappe qui représentent une tectonique de disharmonie .

3-2 L'ensemble Allochtone Sud Sétifien.

Cet ensemble dans la région de Sétif, il comporte trois ensembles qui sont du Nord au Sud et du haut en bas :

Le système septentrional (Djebel Anini au Nord de Sétif), le domaine médian (Djebel Zdim, Youcef, Braou et Tnoutit, l'ensemble méridional (Djel Sekrine, Kalaoun, Koudiat Tella Djebel Tafourer).

3-2-1 Le domaine médian des Djebels Zdim, Youcef, Braou, Tnoutit.

Le domaine possède une série carbonatée allant du Lias au Cénomanién. Cet ensemble est représenté par un anticlinal cisailé au Djebel Youcef. Le contact de base des dolomies jurassique du Djebel Youcef est faiblement incliné vers le Nord. On note l'absence d'affleurements du Sémonien et de l'Eocène.

3-2-2 l'Ensemble méridional des Djebels Sekrine, Kalaoun, Tafourer et Koudiat Tella.

On observe le même dispositif structural, une masse de dolomie jurassique qui repose tectoniquement sur une série où le Miocène marin fossilise les structures cisailées par le contact de base. On note aussi que cette série possède une mince couverture sénonienne et Eocène où l'abondance des biosparites (La présence de galets attestant un milieu agité) indique un milieu peut profond.

3-2-3 Série Inférieure du Djebel Kalaoun.

Elle constitue une zone de transition entre les deux domaines.

3-3 Le Quaternaire

On distingue trois types de dépôts, différents les uns des autres et étagés dans le paysage de la manière suivante.

- Les parties hautes caractérisent les glacis à surface tabulaire fossilisés par une croûte calcaire qui peuvent avoir subi des mouvements tectoniques datés du Quaternaire ancien. Au dessous de ce niveau, on a des limons rouges profonds à taches calcaires datés de l'Amérien.
- A la base les limons rouges, On a un glacis à croûte calcaire daté du Tensiftien
- Dans les parties les plus basses apparaissent les sédiments alluviaux localement hydromorphes ou même salés qui représentent les derniers dépôts du Quaternaire.

En bordure des Sebkhats dépourvus de toutes végétations, on note une ceinture d'Halophytes

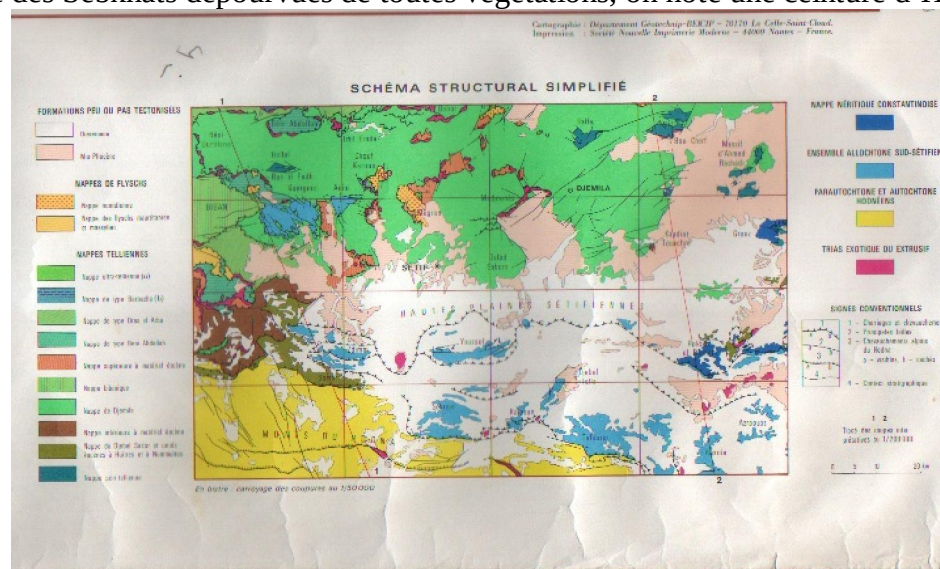


Fig 4 Carte géologique structurale simplifiée de la région de Sétif 1/200000 Villa 1977

3-4 Quantification des mouvements du bassin d'El Eulma .

Le mode de cisaillement a été étudié par Kazi Tanie (1992) .Les blocs compris entre deux accidents sécantes sont expulsées sous l'effet de traction qui s'exerce à l'intérieur du dièdre ou d'une pression qui se réalise orthogonalement. Donc il résulte un déficit ou un excès de matière de volume de matière externe donnée par la formule suivante Fig. N ° 5

$$V = 1/2 [L \cdot h \cdot B] \quad (1)$$

B= La hauteur du prisme déplacé en m

L = L'amplitude du déplacement en m

h = l'élongation ou raccourcissement qui en résulte en m donnée par la formule :

$$h / L = \tan \alpha \quad (2)$$

α est l'angle entre les deux accidents bordiers
Le volume en excès ou en déficit recalculé

$$V' = 1/2BL^2tg\alpha \quad (3)$$

Il est distribué sur toute la surface du compartiment déplacé. Il en résulte alors une hauteur en excès ou en déficit .

$$H = BL^2tg\alpha / 2S \quad (4)$$

3-5 Application

Le bassin d'El Eulma a une superficie de 500 Km², il est localisé entre l'accident de l'Azreg NW, Branche de la transversale de Béjaia –Negrine et un autre accident dans le prolongement de la faille de Gafsa .Pour Kazi Tani l'écart angulaire entre eux est de l'ordre de 5°, le décalage est de 20 Km. La hauteur du compartiment est estimée à 12.8 Km compte tenu du gradient géothermique local de 3.5°C soit une température de 450°C à sa base qui permet un comportement quasi plastique ductile. Ceci nous a permis d'estimer le volume des sédiments à 750 m, cette valeur représente la subsidence à l'air libre du bassin d'El Eulma .

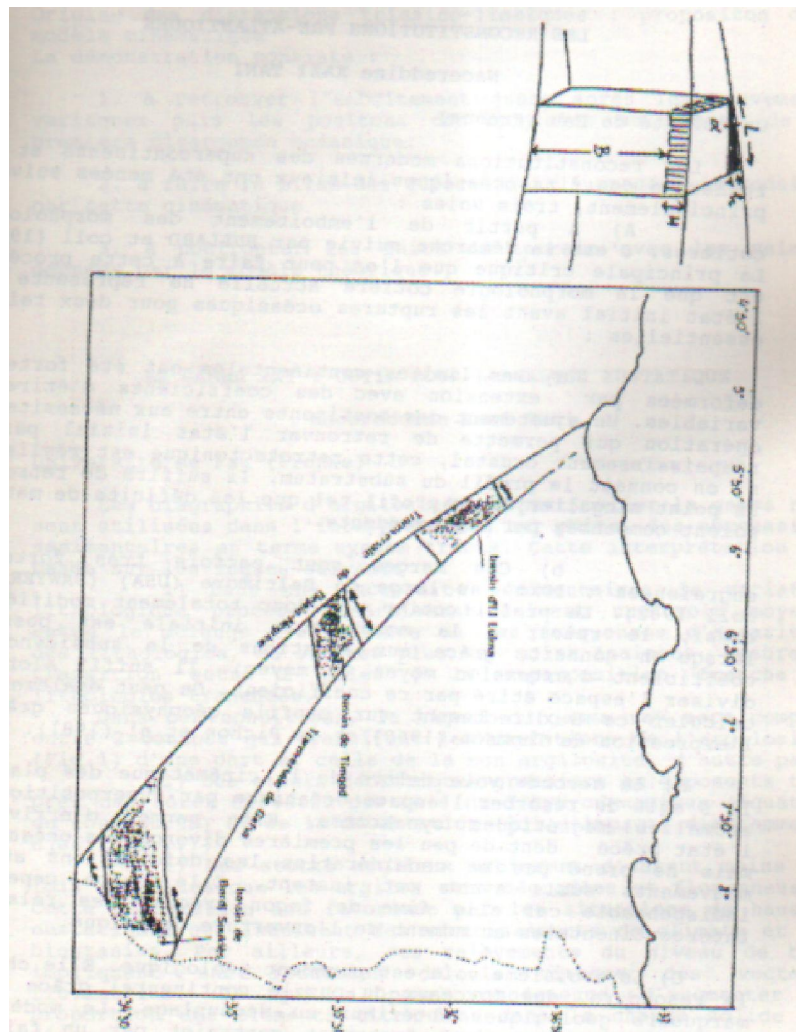


Fig N ° 5 Présentation du modèle de Kazi Tani

3-6 Rôle de la tectonique dans la mise en place du système aquifère dans la région d'El Eulma.

La tectonique globale est responsable de la mise en place des différentes formations géologiques caractérisées par leurs dépôts et distingués par leur lithologie et leur dynamisme. Les différentes aquifères sont les résultats de la mise en place des phénomènes tectoniques, de la vitesse de subsidence et de l'Eustatisme dans une région continentale donnant la structure actuelle qui est responsable de la circulation des ressources en eaux souterraines soit à échelle locale, soit à l'échelle intermédiaire ou régionale. Fig N°6

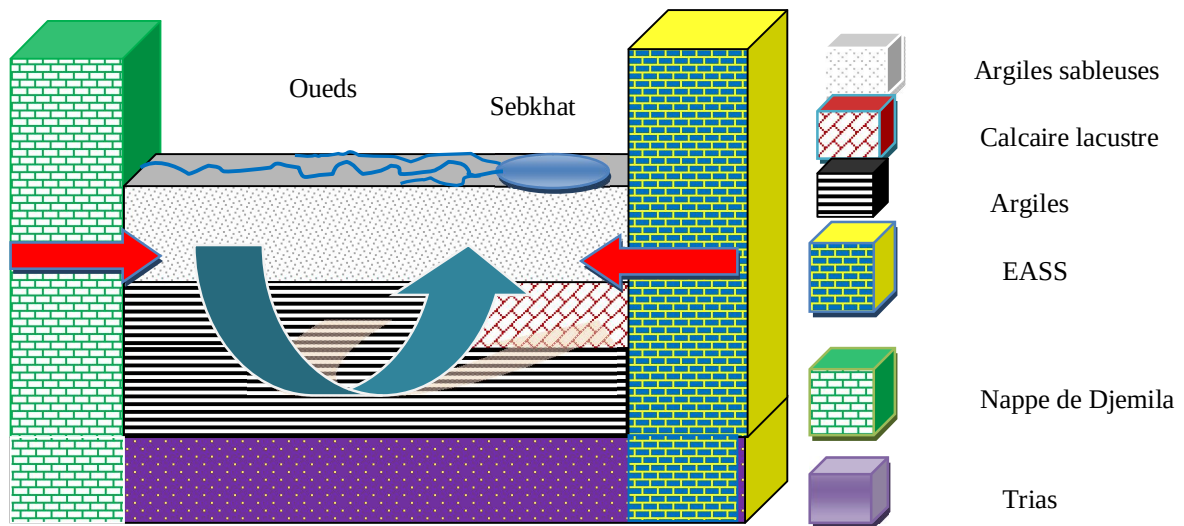


Fig N° 6 Bloc diagramme structural des différentes formations géologiques de la région d'El Eulma

4 Géochimie des différentes formations géologiques.

Nous avons jugé utile de faire une analyse géochimique des formations lithologiques de la région afin de voir leur influence sur la qualité chimique des eaux souterraines ;cette analyse a concerné la majorité des formations .Ainsi ,nous avons procédé à l'analyse de 9 échantillons et confirmées par 9 lames minces .

4-1 Géochimie de l'ensemble allochtone Sud Sétifien

L'analyse géochimique des formations géologiques de l'ensemble allochtone sud sétifien ont permis de constater que les formations carbonatés sont très riches en calcite et pauvre en magnésium ,aluminium et phosphates .Fig N° 7

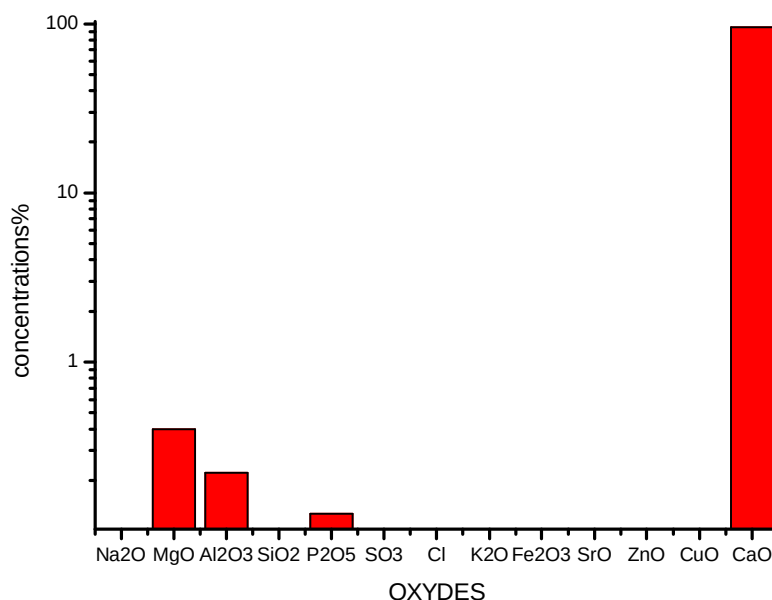


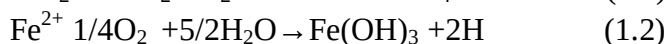
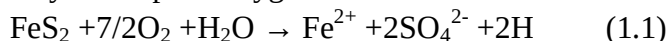
Fig N° 7 Histogramme de la composition géochimique des calcaires de Dj Braou

4-2Géochimie des formations carbonatées de la nappe de Djemila .

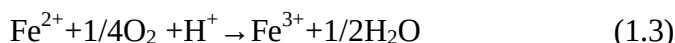
Les analyses géochimiques des formations carbonatées de la nappe de Djemila nous ont permis de constater la présence de la calcite , le fer , le silicium et la présence d'un faible pourcentage de minéralisation des métaux lourds telle que le Pb ,Zn ,Cu **Fig N° 9**

La présence du Fer est régie par un ensemble de réactions qui se déroulent en trois phases

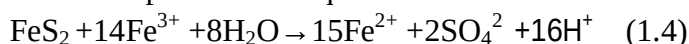
1) Oxydation par l'oxygène :



2) Oxidation de ion ferreux

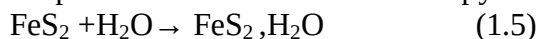


3) Oxidation par l'ion ferrique



La première étape, l'oxydation par l'oxygène est une étape d'initiation. Elle se produit en présence ou en l'absence des bactéries .Le pH > à 4.5 et s'acidifie progressivement. La réaction (1.1) est relativement lente et la cinétique de la réaction (1.2) diminue au fur et à mesure que le pH s'abaisse. Elles sont toutes deux essentiellement contrôlées par la disponibilité de l'oxygène. Si l'eau ne semble pas être un réactant ; elle participe tout de même à la réaction, dans une phase précoce de l'oxydation de la pyrite.

Absorption de l'eau à la surface de la pyrite



Réaction du site actif ainsi formé avec l'oxygène
 $\text{FeS}_2, \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{FeS}, \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$ (1.6)

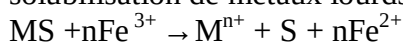
Diffusion de l'oxygène à la surface de la pyrite
 $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$ (1.7)

Les produits finaux sont ensuite formés
 $\text{SO}_3 + \text{FeS}, \text{H}_2\text{O} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ (1.8)

La Deuxième étape, l'oxydation de ion ferrique (réaction (1.3), est déterminante .Elle devient prépondérante sur la réaction (1 .2) avec acidification progressive du milieu : le pH devient inférieur à 4.5 Ce qui permet au fer ferrique de rester en solution. L'importance de cette réaction réside dans le fait qu'elle produit du fer ferrique qui sera capable à son tour de réagir en chaîne sur la pyrite selon l'équation (1.4).

4-2-1 Les réactions secondaires.

L'oxydation des sulfures crée des conditions physico-chimiques qui peuvent permettre la solubilisation de métaux lourds par action du Fe^{3+} . Ces réactions sont du types



Avec M: Métal lourd

La libération de métaux lourds présents dans les minéraux sulfurés lors de leur oxydation peut également expliquer la présence d'éléments métalliques .Ainsi, la dissolution de la Sphalérite libère du Zinc, La galène du Plomb la chalcopryrite du Cuivre et du fer. Fig N ° 8

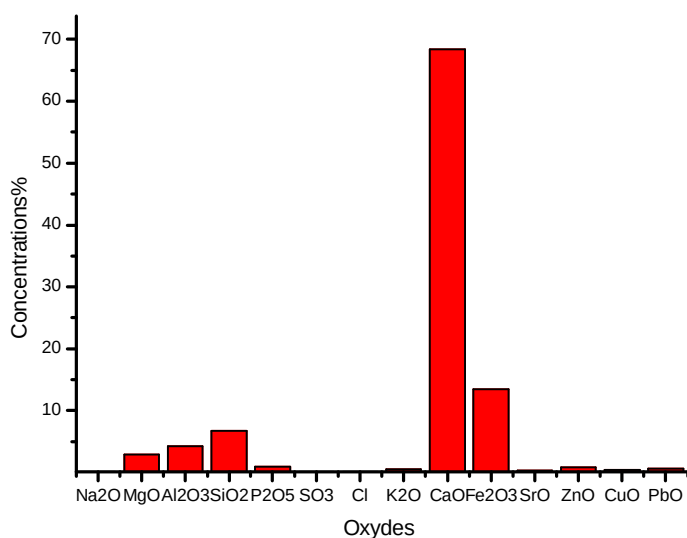


Fig N° 8 Histogramme de la composition géochimique des formations carbonatées de la nappe de Djemila

4-2-2 Les catalyseurs

Les réactions citées plus haut relative à l'oxydation de la pyrite nécessitent des catalyseurs pour le déroulement des réactions géochimiques. Ces catalyses sont des microorganismes tirent l'énergie qui leur est nécessaire à leur fonctionnement à partir des réactions oxydo-réduction métalliques. La majorité de ces bactéries sont gram négatives, autotrophes, mésophiles, chimiolithotrophes. Pendant la réaction d'oxydation de pyrite, le fer ferreux et le soufre élémentaires sont deux substrats bio-disponibles en solution, tandis que les phases oxydées du fer et le soufre sont des substrats développés sur la surface du minéral par oxydation chimique ; Les bactéries du groupe *Ferrobacillus* – *Thiobacillus* utilisent ces phases superficielles comme substrat et catalysent les réactions chimiques qui se déroulent à la surface des minéraux et en solution ; Elle jouent un rôle important dans l'oxydation du Fe^{2+} en Fe^{3+} . Les réactions catalysées par les bactéries consomment de l'oxygène, elles seront fortement ralenties par une couche d'eau limitant la diffusion de l'oxygène jusqu'aux sites réactifs.

4-2-3 Particularité du monde Bactérien .

Les bactéries responsables de cette catalyse sont des organismes unicellulaires de structure relativement simple comparativement aux cellules eucaryotes des animaux et des plantes. Un brin unique d'ADN, circulaire noyé dans un cytoplasme ceint par une membrane plus au moins épaisse. Suivant les espèces constitue la base de leur structure Fig.N°9.

Contrairement au règne animal et végétal, les bactéries ne présentent pas de forte variabilité physique, il n'est pas possible de distinguer les espèces par leur morphologie. Les bactéries sont plutôt généralement classées selon leur métabolisme c'est-à-dire la source d'énergie qu'elles utilisent

- Les hétérotrophes : qui utilisent le Carbone organique
- Les autotrophes : qui ne nécessitent pas la source de carbone organique
- On y distingue
- Les phototrophes qui utilisent l'énergie lumineuse pour fixer le CO_2
- Les lithotrophes ou chimiotrophes qui utilisent les autres minéraux.

Il existe aussi des bactéries dites mixotrophes qui peuvent alterner entre l'hétérotrophie et l'autotrophie suivant les conditions environnementales.

Dans les aquifères les bactéries vivent principalement à proximité des minéraux créant des biofilms bactériens.

La présence de ce biofilm peut modifier les conditions chimiques et oxydo-réductrices de la surface du minéral et maintenir des conditions complètement différents de la zone environnantes en ce qui concerne le pH et l'Oxygène dissout. (Virginie –Arnaud 2005)

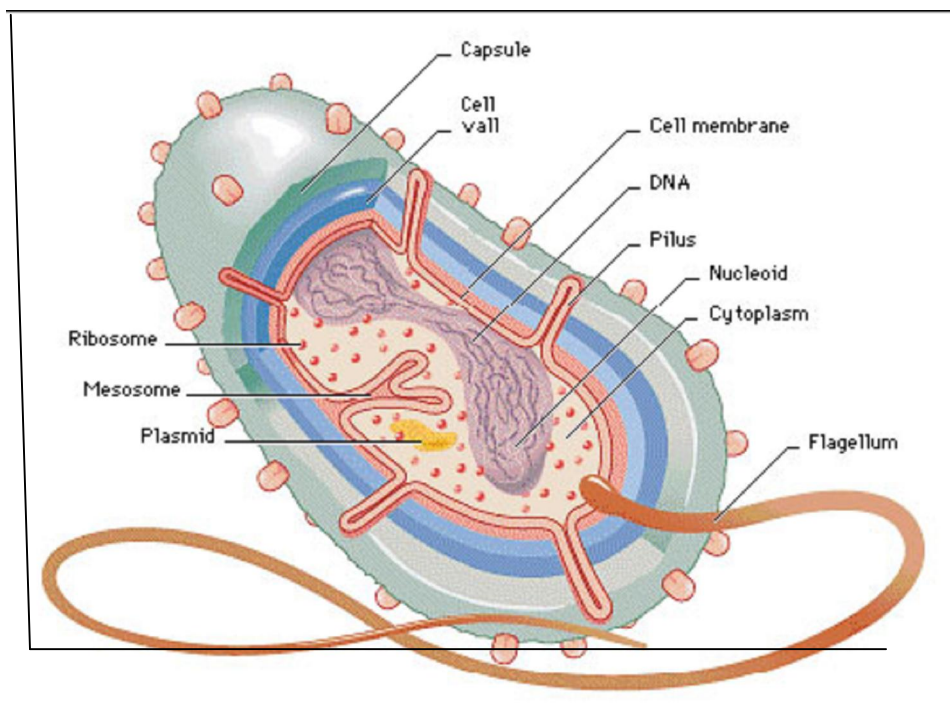


Fig N°9 Schéma d'une bactérie

4-3 Géochimie des formations du Mio –Plio-Quaternaire

Les argiles des formations du Mio –Plio –Quaternaire sont caractérisées par la présence du calcium, Fer, Aluminium, Chlore, sodium, silicium, phosphates. cette variations est due probablement a la roche mère ou au phénomène de lessivage des minéraux .Fig N° 10

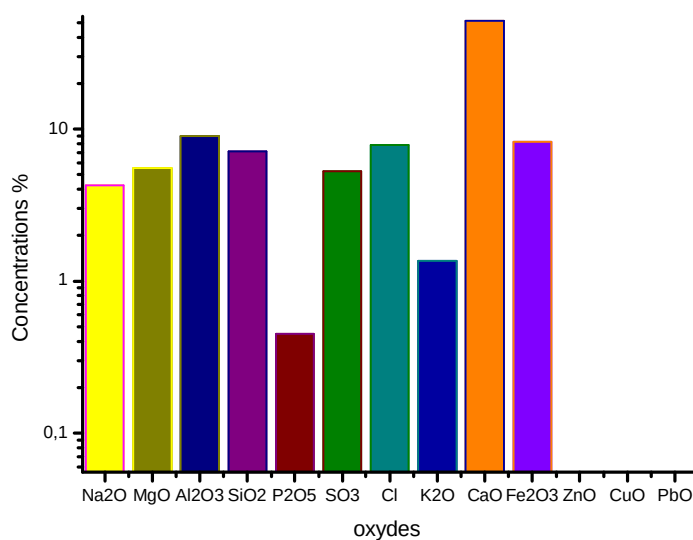


Fig N° 10 histogramme de la composition géochimique des argiles du Mio-Plio-Quaternaire

4-4 Etude des lames minces .

Dans le cadre de cette étude ,et pour avoir plus de précision sur la pétrographie des roches de la région qui aura sans aucun doute une influence sur la qualité chimique des eaux ,nous avons procédé au perfectionnement de 4 lames minces

La première lame des calcaires gréseux de la nappe de Djemila contient de la cuprite, de l'oxyde de Fer et de la calcite. Fig. N°11

La deuxième lame des marno calcaire du maestrichien contient de la calcite , de l'oxyde de Fer , les foraminifères (Miliolidés) et les lammélibranches . Fig. N°12

La troisième lame du calcaire à silex de Yprésien Fig N°13

La quatrième lame du calcaire jurassique de Djebel Braou Fig N° 14

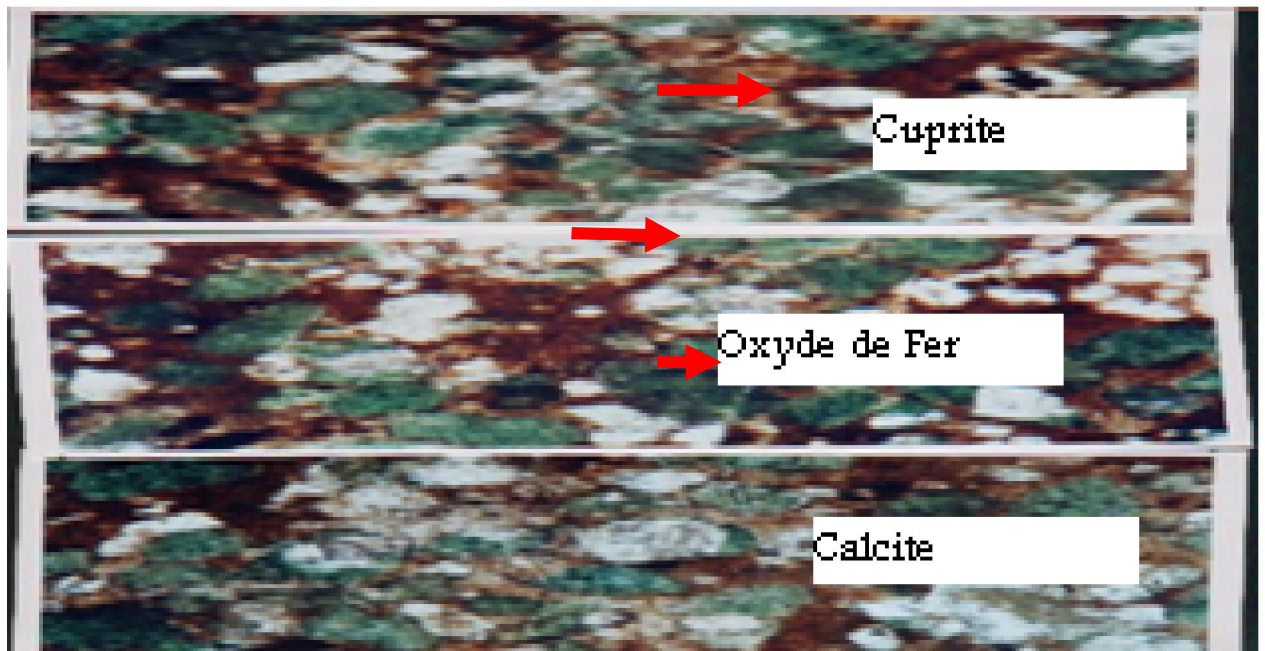


Fig N° 11 Lames minces des calcaires gréseux de la nappe de Djemila (khemmoudj k 2007)

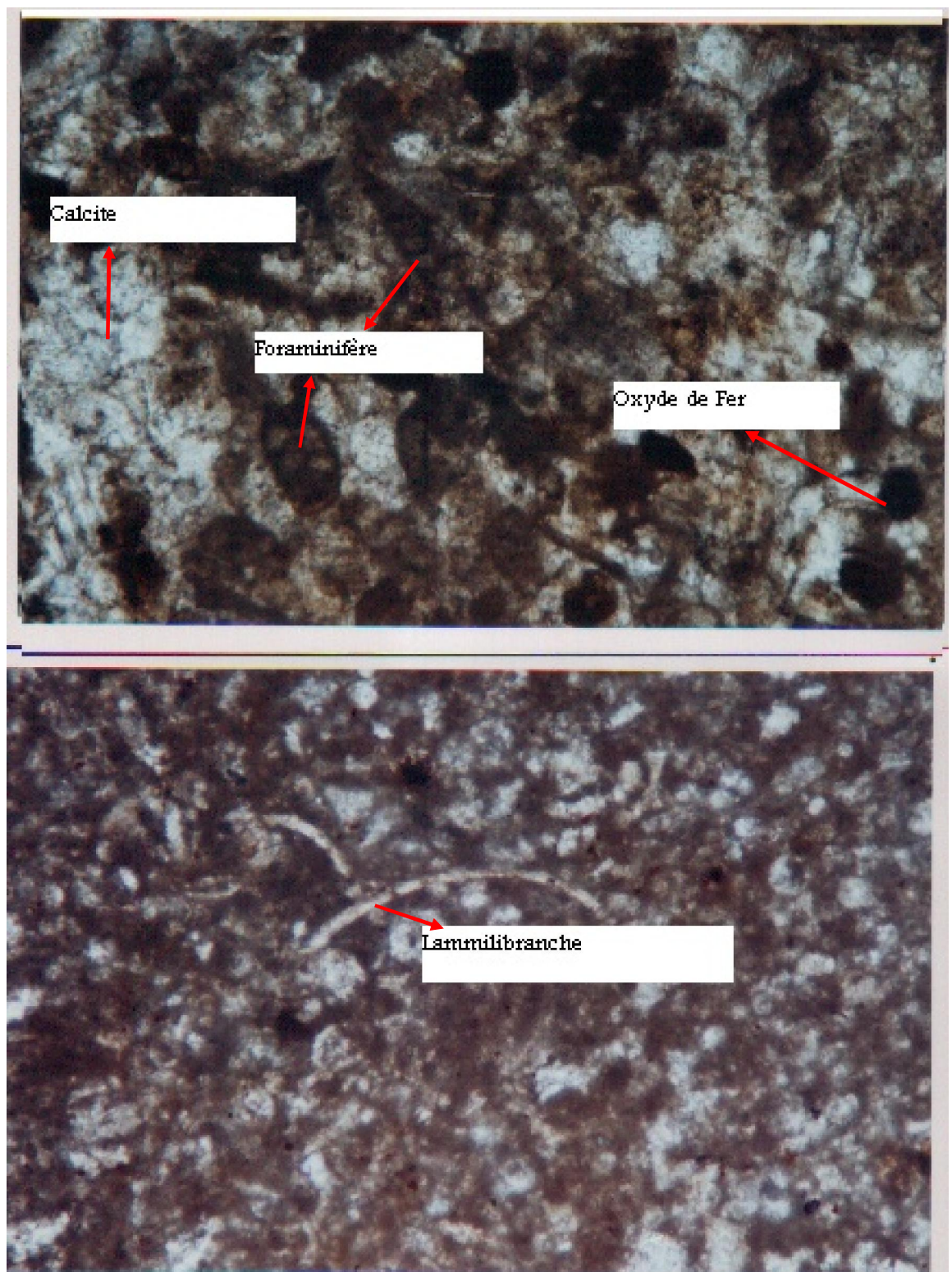


Fig N° 12 lame mince des marno- calcaires du Maestrichtien de la nappe de Djemila
(khemmoudj.k 2007)

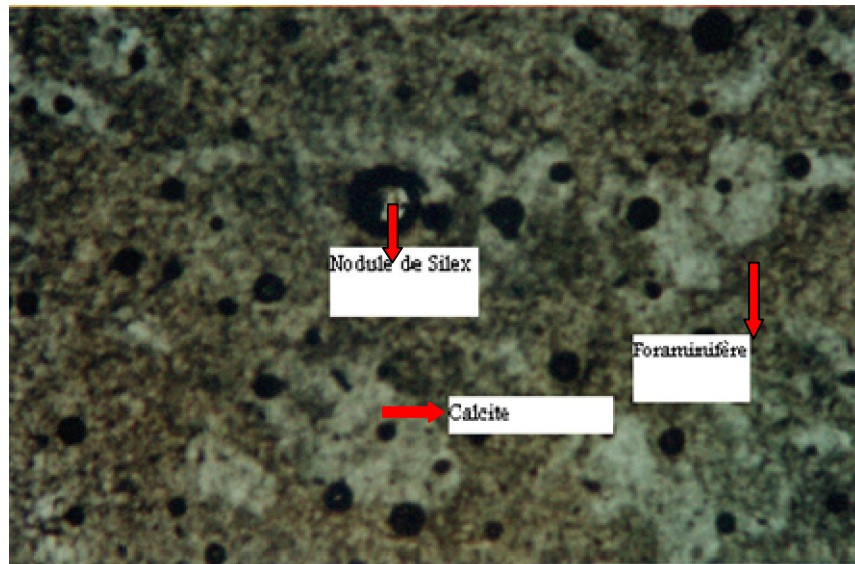


Fig N° 13 Lame mince du Calcaire à Silex (khemmoudj.k 2007)

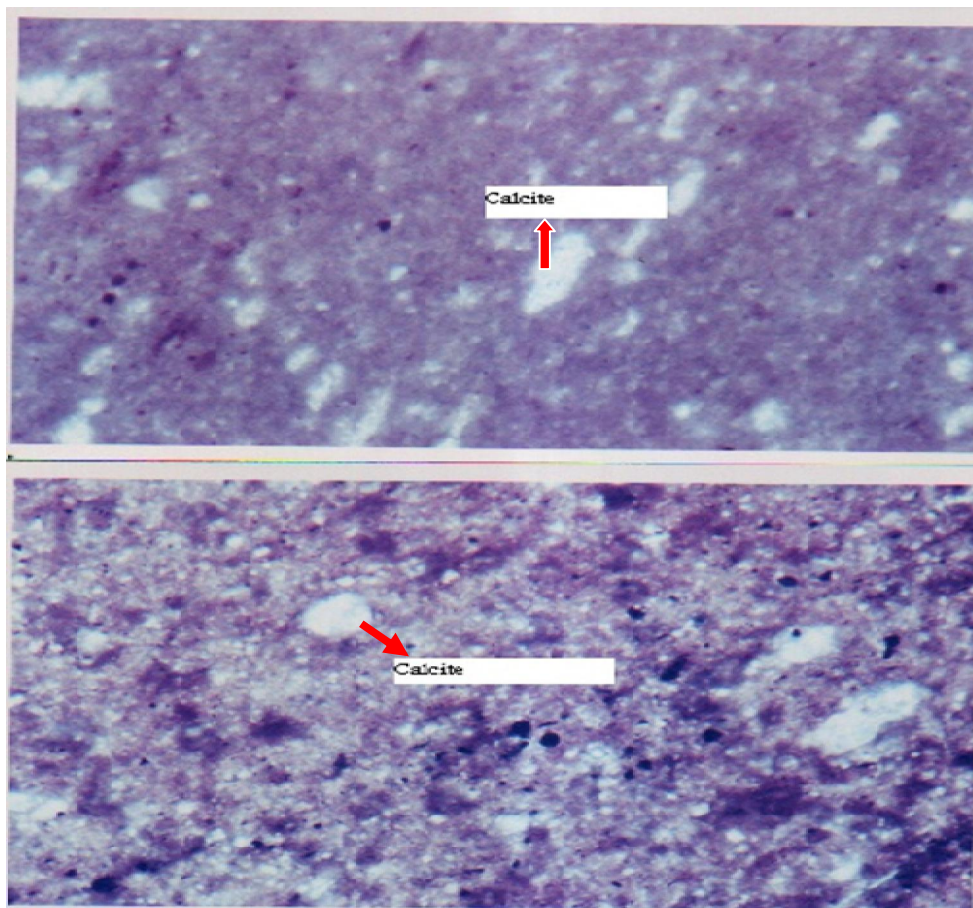


Fig N° 14 Lame mince du calcaire Jurassique massif Djebel Braou (khemmoudj.k 2007)

5-Conclusion.

L'Analyse et l'interprétation géochimique montre la présence des métaux dans les formations carbonatées, de la nappe de Djemila qui a un impact direct sur la nature hydrogéochimiques des eaux souterraines de la région. La présence des phénomènes de drainage minier acide (DMA) peut constituer un danger sur l'environnement. Les argiles du Mio-Plio-Quaternaire sont riches en calcium, Fer, Aluminium, Chlore et le sodium ce qui explique la présence du gypse, de la calcite, l'illite, la chlorite, et la Montmorillonite dans les argiles. Les roches de l'ensemble allochtone Sud Sétifien sont purement carbonatées. Il faut signaler que l'érosion externe par le biais de la géodynamique externe (pluie, vent, gel et la température) aboutit à la formation du sol.

Pédologie

1) Introduction :

Parmi les systèmes qui évolue dans l'espace et dans le temps, le sol c'est une interface entre la roche mère et l'atmosphère, d'où les échanges qui se font entre le sol et l'eau avant d'arriver dans les aquifères. Lors des écoulements superficiels s'accroissent les échanges entre l'eau et les constituants du sol. Le sol résulte de l'interaction de couches superficielles de la lithosphère, l'atmosphère et la biosphère. La pédogenèse des sols à partir de la roche mère fait intervenir deux processus de nature différente qui sont l'altération des roches mères et l'apport de la matière organique.

- L'altération de la roche mère se fait sous l'effet de l'eau, de la température et des organismes vivants. Sa désagrégation et sa décomposition aboutissent à une fragmentation et à la transformation de ses composants initiaux et minéraux plus simple facilement soluble dans l'eau.
- La végétation colonise peut à la fois la roche mère, au cours de sa désagrégation produit une matière organique. Elle facilite l'altération de la roche mère par libération de l'acide humique qui aboutira à un sol formé par trois phases solide, liquide et gazeuse.

2 La phase gazeuse

Les gaz d'un sol sont différents des gaz atmosphériques. L'augmentation du dioxyde de carbone (CO_2) qui se base sur les échanges entre le sol et l'atmosphère est basée principalement sur la dégradation de la matière organique par les microorganismes et la respiration des racines. La concentration en dioxyde de carbone du sol une partie s'évapore dans l'atmosphère par échanges gazeux, ce qui reste se dissout dans l'humidité du sol en formant l'acide carbonique (H_2CO_3) qui se décompose en HCO_3^- conduisant à l'acidification du sol.

2-2 La Phase liquide.

C'est la partie la plus active où les plantes aspirent directement la matière nutritionnelle. Elle est composée de la matière organique et minérale et des composants organique et minéraux et les gaz dissout ($\text{CO}_2, \text{NH}_3, \text{O}_2$) des anions ($\text{SO}_4^{2-}, \text{H}_2\text{PO}_4^-, \text{HCO}_3^-, \text{Cl}^-, \text{NO}_3^-$) des cations ($\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+, \text{NH}_4^+, \text{K}^+$) La composition et la concentration en sels minéraux dans la phase liquide dépend de l'humidité du sol de la minéralisation de la matière organique et minérale.

2-3 La phase solide.

Elle est composée de deux parties, minérale et organique. La moitié de la phase solide est composée d'oxygène (30%), du silicium (10%) et de l'aluminium et de fer (10%). La composition chimique des minéraux se subdivisent en complexes silicatés SiO_4 et Al_2O_3 on y rencontre également des minéraux aluminosilicatés, les feldspaths potassiques et sodocalciques (Orthoclases et plagioclases) et des mica potassiques et ferriques (muscovite et la biotite). Les minéraux argileux et secondaires se forment lors de l'altération et la formation du sol composées par des feldspaths et les micas et plus particulièrement par les aluminosilicates hydratés composés de Si, Mg, K, Fe on peut grouper ces minéraux en trois groupes.

la kaolinite , la montmorillonite et les mica hydratés Les sols comportent également des sels acide phosphorique $PO(Ca, Mg, Fe, Al)$.

La matière organique forme une petite partie de la phase solide du sol, elle est formée par l'humus, des complexes azotés, et des restes de la nature végétale, microbienne et animale . On peut définir Le terme de sol comme un ensemble hétérogène des matériaux issus de l'évolution d'un substrat minéral sous l'action combinée de facteurs climatiques (température, précipitation) et de l'activité biologique (racines de végétaux, animaux fouisseurs, accumulation de matière organique en décomposition, micro-organismes) .Le sol constitue la principale réserve en eau dans laquelle puisent les végétaux grâce à leurs systèmes racinaires. Les sols sont extrêmement variés par leur composition chimique, minéralogique,leur épaisseur et leurs propriétés mécaniques.

La texture désigne la proportion du sol est un milieu poreux. La porosité des sols (le pourcentage du volume total d'un bloc de sol occupé par les pores) se situe généralement entre 40 et 60%. Sous l'effet des Pluies et des circulations souterraines, les pores du sol peuvent se remplir d'eau. Une partie de cette eau est libre de s'écouler par gravité : on parle d'eau gravitaire. Elle ne séjourne donc que transitoirement dans le sol. Une autre partie de l'eau est retenue dans les sols par la capillarité, les forces électrochimiques et les liaisons moléculaires. Elle ne peut-être extraite que par l'application d'une force de succion supérieure à la force d'adhésion entre l'eau et le sol. La succion du sol est le plus souvent exprimée en unités de pression. Le taux d'humidité correspondant au volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir après ressuyage (écoulement de l'eau gravitaire) est appelé par les agronomes capacité au champ. Au delà d'une certaine succion les racines des plantes ne sont plus en mesure d'extraire l'eau du sol. La plante se fane ; on parle alors de point de flétrissement permanent. La quantité d'eau qui peut être libérée entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent est la réserve utile du sol exprimée en mm/m de sol. La profondeur explorée par les racines d'un végétal détermine la réserve utile globale en mm. La relation entre l'humidité et la succion dépend du sol et en particulier de sa texture et de sa teneur en acides humiques issus de la décomposition de la matière organique relative d'éléments grossiers (sables : diamètre 50μ), d'éléments intermédiaires (limons : diamètres compris entre 2 et 50μ) et d'éléments moyens (argiles : diamètres inférieurs à 2μ) dans la composition du sol. Fig N°15.

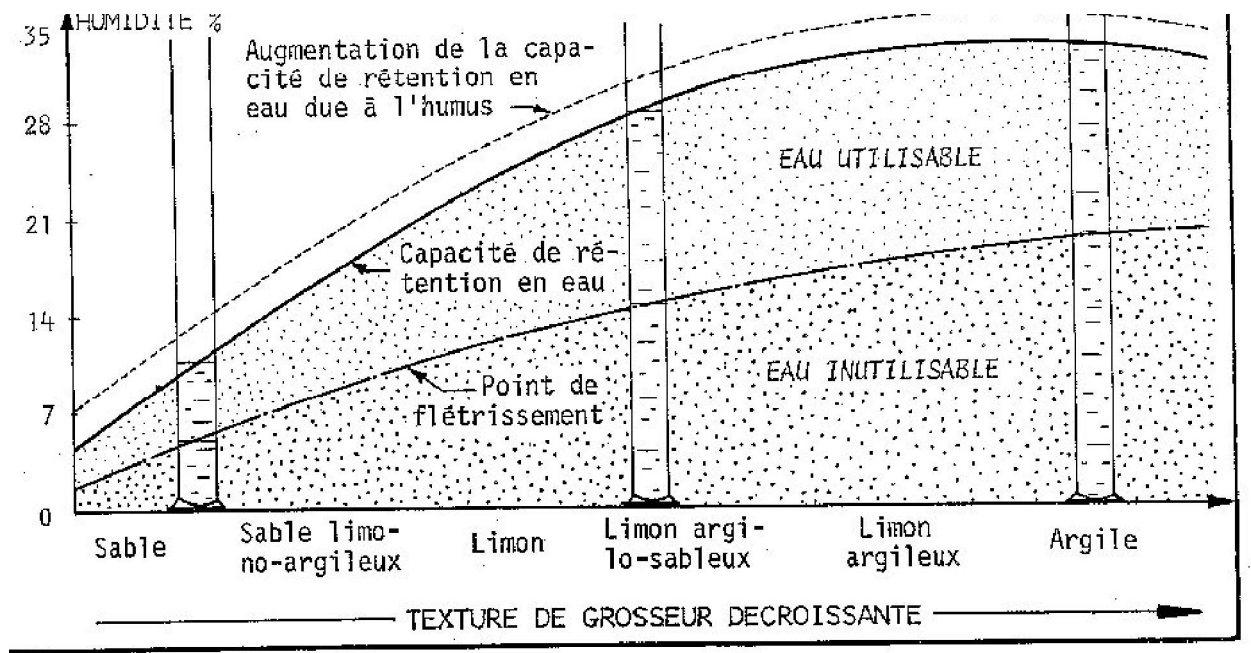


Fig N° 15 Texture des sols

3- Les sols de la région d'El Eulma.

Suite à l'enquête que nous avons entreprise dans le bassin versant nous avons remarqué la présence de sept types de sols (Lamar et al), Fig N° 16.

- 1) Sols sans différenciation pédologique particulière.
- 2) Sols à caractères vertiques dominants.
- 3) Sols à profil marqué par la matière organique.
- 4) Sols à profil marqué par les carbonates et les sulfates de calcium.
- 5) Sols à caractères marqués par les sels solubles.
- 6) Sols à caractères hydromorphes dominants.
- 7) Sols rubéfiés.

3-1 Sols sans différenciation pédologique Particulière .

Se sont des sols où l'altération est très faible, ceci provient des apports récents formant deux groupes

- a) Le groupe d'érosion : se sont des sols carbonatés
- b) Le groupe d'apport : la mise en place est due à l'apport alluvial et à la gravité, ils sont riches en silicium

3-2 Les sols à caractères vertiques dominants :

Se sont des sols riches en argile gonflante développée sur des marnes gypseuses-salifères ayant une faible teneur en matière organique, la teneur en CaCO_3 varie entre 0 et 30%.

3-3 Sols à profils marqués par la matière organique :

Cette catégorie regroupe un ensemble de sols moyennement différenciés ou différenciés et peu calcaires. Ils sont caractérisés par la présence de la matière organique au sommet et ils appartiennent aux groupes haploxyrilles et calcixyrilles (OTI 1973).

a) **Les haploxirols** : sont des sols pourvus de matière organique 3 et 4% ,avec une teneur en carbonates qui varie entre 10 et 50 % ,localisés dans la plaine de Bazer - El Eulma et EL Eulma -Bir El Arch. Les haploxirols salés sont situés autour des chottes et Sebkhah (Bazer ,El Hemiet et El Fraïn) .

b) **Les calcixirols** : sont des sols argileux qui contiennent une teneur en matière organique de 0% décroît en profondeur ; ils sont très carbonatés.

3-4 les sols marqués par les carbonates et les sulfates de calcium

Dans cette catégorie sont regroupés les sols dont l'évolution est marquée par la présence en excès d'ion alcalin terreux, d'épaisseur variable et peut organiques mais souvent carbonatés. Ils se développent dans le Nord -Est de la région et dans le Nord -Ouest c'est la nappe de Djemila avec des calcaires Cénomaniens et les marnes - Calcaires du Maastrichtien. Dans ces formations on constate la présence de la pyrite avec une concentration du fer élevée.

3-5) Les Sols à caractères marqués par les sels solubles .

Dans cette catégorie, on regroupe les sols salins, très développés auprès des chottes et des Sebkhahs. Ils présentent un encroûtement calcaire et gypseux, cette salinité est conjuguée avec la salinité des eaux souterraines et de surface .

3-6 les sols à caractères hydro morphes dominants

Ils ont une extension très limitée dans la région et ils évoluent à proximité des sols salés. Se sont des sols très riches en matière organique, de texture fine, carbonatés en surface et ils comportent des traces de gypses sous forme d'évaporites.

3-7 Les sols rubéfiés :

Ce type de sol est organique et calcaire en surface avec un taux de 50% ,mais souvent argileux, se sont fortement décarbonatés dans l'horizon rouge et argileux localisée dans le Sud -Est de la ville d'El Eulma

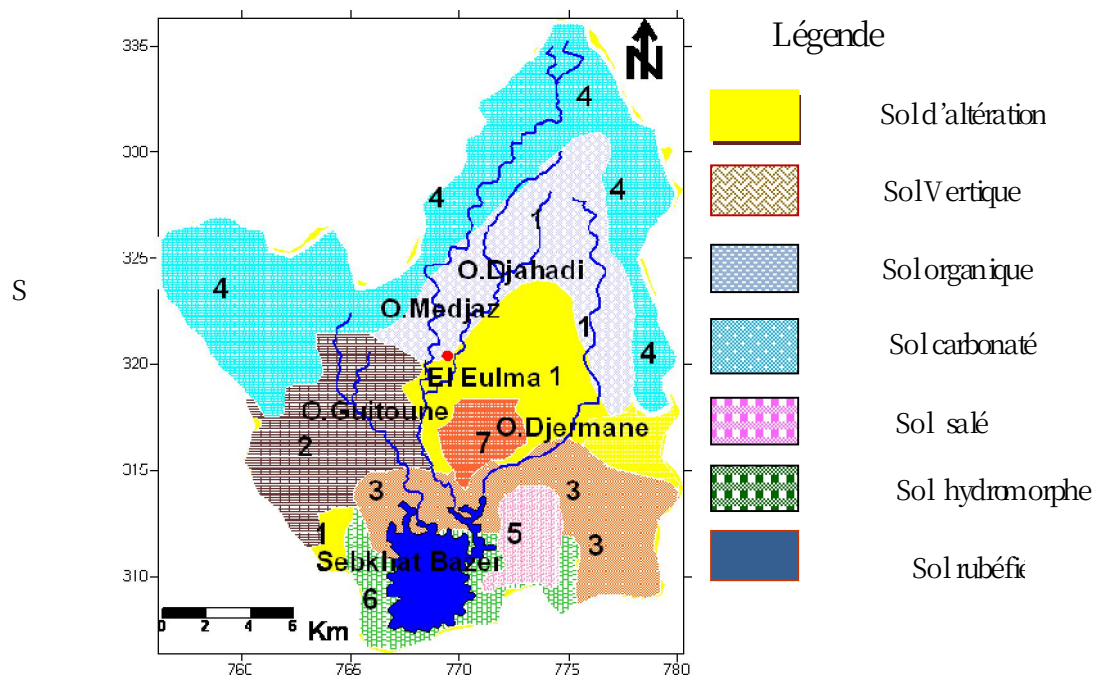


Fig N° 16 Carte pédologique de la région d'El Eulma.

4 - Pédogéochimie des sols de la région d'El Eulma :

La répartition des éléments chimiques dans la région d'El Eulma est caractérisée par la présence en pourcentage élevée du silicium ou de la calcite ce qui explique que la quasi-totalité des sols dans la région sont de type argileux ou carbonates. On note la présence d'alcalins terreux, leur présence est expliquée par la composition minéralogique variable. Les éléments présents oxygène, silicium, Aluminium, fer.

La présence des métaux lourds est probablement expliquée soit par la composition minéralogique de la roche mère avec une concentration élevée du Zn, Cu, Fe, Zr dans le nord de la région, tandis que Pb, Mn, Ni, Cr sont retrouvés au sud, probablement liés à la pollution.

4-1 Composition chimique moyenne de la matrice solide d'un sol

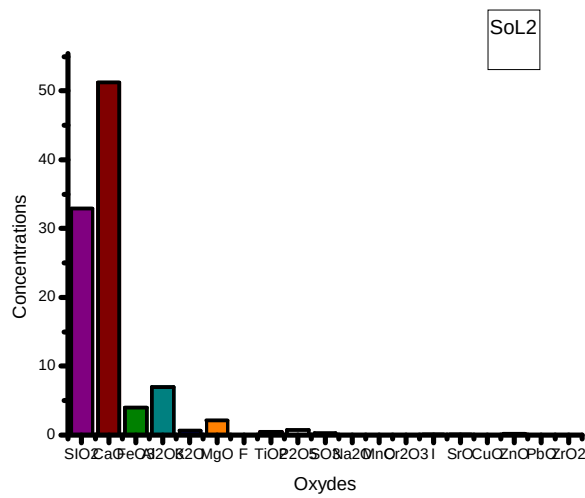
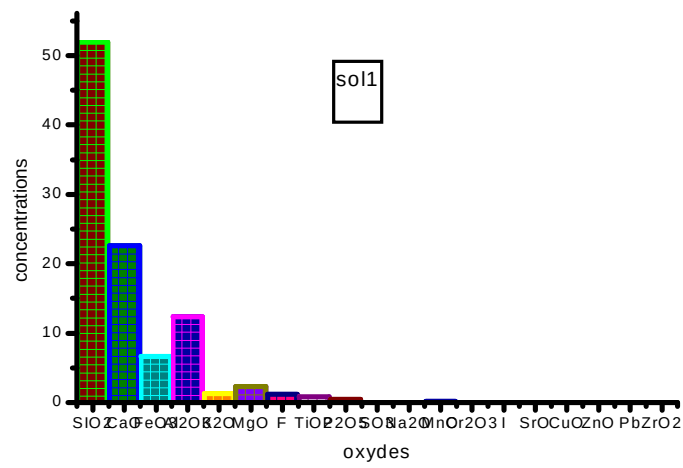
La composition géochimique moyenne de la matrice solide explique la répartition des éléments chimiques et leur distribution dans le sol. Les éléments chimiques les plus abondants sont l'oxygène avec 49%, le silicium 33%, l'aluminium 7.1% et le fer 3.7%. Le carbone, le calcium et le potassium la concentration varie entre 2 à 1.3%. Les métaux lourds avec une concentration qui varie entre 0.001 à 0.005%. cf Tableau 01

Tableau 01 Composition chimique de la matrice solide d'un sol

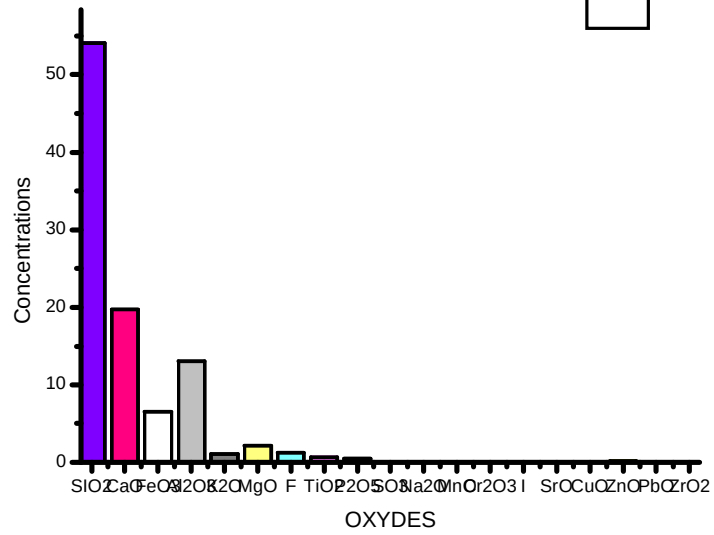
Eléments chimiques	%	Eléments chimiques	%	Eléments chimiques	%	Eléments chimiques	%
O	49	Na	0,6	Mn	0,08	Zn	0,005
Si	33	Mg	0,6	Ba	0,05	Ni	0,004
Al	7,1	H	0,5	Sr	0,03	Li	0,003
Fe	3,7	Ti	0,46	Zr	0,03	Cu	0,002
C	2	N	0,1	F	0,02	Br	0,001
Ca	1,3	P	0,08	Cr	0,02	Pb	0,001
K	1,3	S	0,08	Cl	0,01	I	0,0005

4-2 Géochimie des sols de la région d'El Eulma

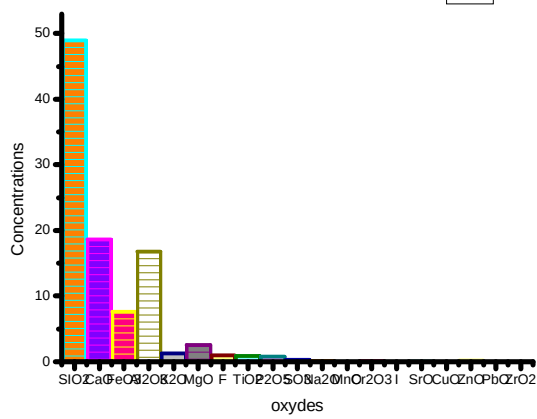
L'étude radiographique des sédiments du Mio-Plio-Quaternaire (Boudoukha 1998) a donné une composition minéralogique très variable dont les minéraux les plus importants sont : la calcite (CaCO_3), Quartz (SiO_2), sidérite (FeCO_3), Chabrite ($\text{Mg,Fe,Al}_3[(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2](\text{OH})_6$), Muscovite ($\text{KAl}_3[\text{Si}_3\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2]$), Kaolinite ($\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$), Ankerite ($(\text{Ca,Fe})(\text{CO}_3)_2$), Illite ($\text{K}_2\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{Al}_2\text{O}_{20}](\text{OH})_2$), Dolomite ($(\text{Ca,Mg})(\text{CO}_3)_2$), Momorillonite ($\text{Mg}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). Les analyses pédogéochimiques des sols de la région d'El Eulma ont donné les résultats présents sous formes histogrammes, les sols (1, 3, 4, 5, 7) la teneur en silicium est élevée ce qui traduit une composition minéralogique riche en silicates et les sols (2 et 6) sont riches en calcium donc les minéraux essentiels sont des carbonates. Fig N° 17



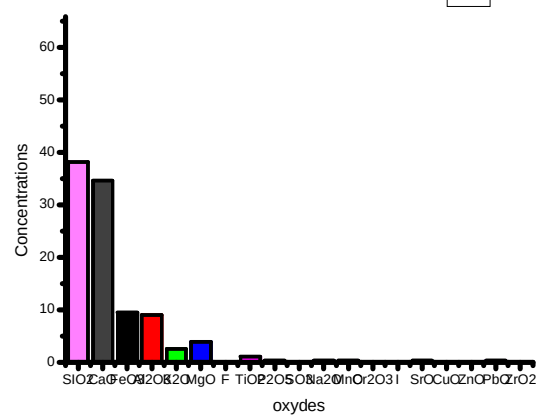
Sol 3



Sol 4



sol 5



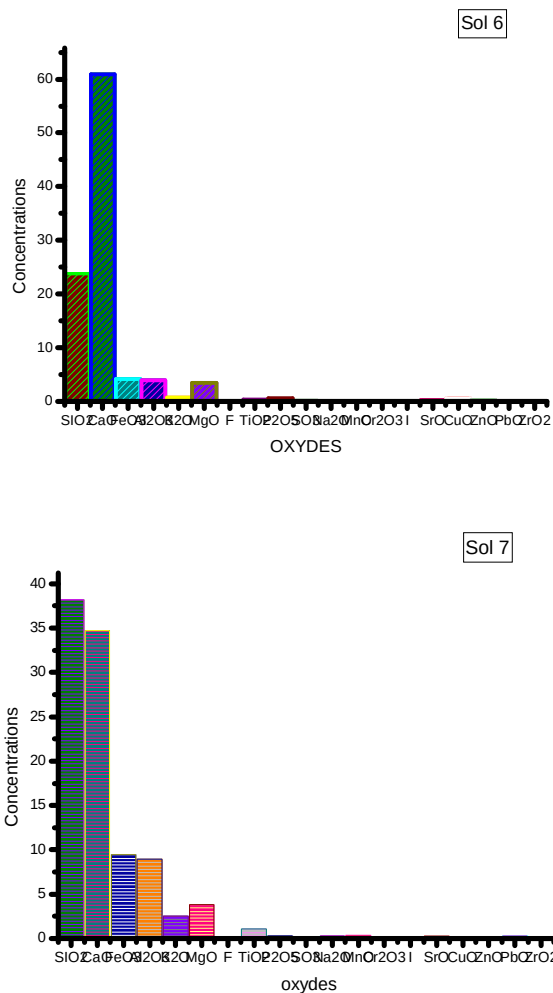


Fig.N ° 17 Histogrammes de la composition pédogéochimique de la région d'El Eulma

5-Conclusion.

Les analyses pédogéochimiques des différents types de sols de la région d'El Eulma ont montré la répartition des éléments chimiques dans le sol et leur influence sur les eaux de surface et souterraines. Les sols sont riches en silicium et en carbonates avec la présence des éléments traces métalliques tel que le Pb, Zn, Cu et Fe.

La flore

1 Introduction

Le système végétatif constitue une importance primordiale dans la vie, pour les animaux et les êtres humains. Le développement des végétaux dépend du climat, du sol et de la quantité d'eau disponible dans une région. Biologiquement une plante est constituée par deux parties essentielles L'eau et la matière sèche. Cette dernière est constituée par de la matière organique et les minéraux qui varient d'une plante à une autre.

2-Rôle des éléments chimiques dans les plantes.

Les éléments chimiques sont indispensables au développement et à l'évolution des plantes. Ainsi ils ont un rôle très important dans la quantification de la production. La variation des éléments chimiques provoquent l'apparition des maladies avec des conséquences directes sur la santé animale et des êtres humains. Tableau 02

Tableau N° 02 les éléments chimiques dans les plantes

N	Protéines, enzymes, acides nucléiques, chlorophylle, vitamines
P	Protéines complexes, rôle d'échanges d'énergie
K	Rôle dans le transport des hydrocarbonates
Ca	Photosynthèse, hydrocarbonates, membranes cellulaires
Mg	Chlorophylle, transport du phosphore
S	Protéines, acides aminés, enzymes, vitamines
Fe	Enzymes, oxydo rédox, chlorophylle, échanges gazeux
B	Echanges protéiniques, acides aminés
Mo	Fixation d'azote, réduction des nitrates
Mn	Enzymes, oxydo rédox, échanges gazeux, assimilation des nitrates
Cu	Enzymes, chlorophylle, protéines, hydrocarbonates
Zn	Echanges énergétique, enzymes
Co	Fixation d'azote, vitamine B12

3) Pourcentage de la concentration moyenne des éléments chimiques dans quelques plantes.

Les principales composantes du blé, l'orge, la farine, pois chiche, lentilles et les pommes de terre sont le phosphore, le potassium, le calcium et le magnésium. Vu le rôle que jouent ces éléments dans les plantes, leur concentration est élevée dans les plantes évoquées. Ce qui explique la production dépend de la géochimie du sol de la quantité d'eau disponible. Tableau 3

Tableau N° 03 Pourcentage des éléments chimiques dans quelques plantes.

Plante	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	SiO ₂
Blé	40	30	3	12	5	2	2
Orge	41	23	23	5	6	3	2
Farine	38	31	12	3	5	2	2
Pomme de Terre	26	30	3	5	15	5	3
Aille	10	6	45	14	34	12	4
Oignon	13	32	5	2	42	3	2
Tomate	24	10	7	5	23	5	3
Pois chiche	30	40	5	6	10	1	5
Lentilles	34	36	3	5	2	1	5

4) Le couvert végétal de la région d'El Eulma.

4-1) Les grandes cultures

Sont localisées dans le Nord et le Sud. Le croissant fertile de Bazer Sakra est caractérisé par la présence du blé, l'orge, la farine, l'avoine, les lentilles, choux, pois chiche, pomme de terre. Fig. 18

4-2) La culture maraîchère.

Elles sont localisées dans le centre et tout le long des oueds. Elles se sont développées suite à l'irrigation à l'aide de puits et de forage. Elles sont développées dans la région de Bazer Sakra et Smara Fig. N°18.

4-3 Les plantes endémiques de la région d'El Eulma.

Le couvert végétal dans la région d'El Eulma est caractérisée par la présence des plantes endémiques, suite à une enquête de terrain plusieurs variétés de plante se développent après les précipitations au environs de Sebkhata Bazer qui constitue une zone humide de la région. La végétation est composée de plantes halophiles (Khrech, Hamel, Quababouche, Sorgot) qui sont utilisées comme parcours pour les moutons et les vaches. Tableau 04 Fig. N° 18

Tableau N° 04 Plantes endémiques de la région d'ElEulma .

Nomenclature locale	Nomenclature Scientifique	Utilité
Harmal	<i>Legmanun Harmala</i>	Médicinale
Mériouet		Médicinale
Chih	<i>Artemisia-herba-alba</i>	Médicinale
Zaatar		Médicinale
Driess	<i>Casque de Jupiter</i>	Médicinale
Taoura	<i>Chardon Marie</i>	Vaches
Baatouche		Homme
Talgouda		Homme
Guernina	<i>Scolymus Hispanica</i>	Homme, Vaches
Harfile violet	<i>Malva sylverslus</i>	Mouton
Harfile bleu	<i>Anacyclus Clavatus</i>	Mouton
Ramrame		Mouton
Nfel	<i>Trifolié</i>	Mouton
Quababouche	<i>Papaver Rhoeas</i>	Mouton
Metaou		Mouton
Ragma		Mouton
Tilfef	<i>Laitron</i>	Homme ,
Zitoute		Vaches
Boumelal	<i>Anacyclis</i>	Homme,
Guerfala	Hers	Vaches
Telma		Homme
Sorgo		Vaches
Khoubaiz		Mouton
Epille des rats	<i>Hordénun Murinum</i>	Vaches, Mouton
Moutarde des Champs	<i>Sinapsis Arvensis</i>	Mouton
Smarre		Vaches
Tilbaou		Homme
Taljoumine		médicinale
Tassalgha		médicinale
Champignons	<i>Champignon</i>	Homme

4-4 La forêt d'Ouled Amrane

Elle s'étend sur une superficie de 400 hectares, caractérisée par la présence deux types d'arbres, le cyprès et le Sapin. C'est un écosystème naturel à préserver et à développer.

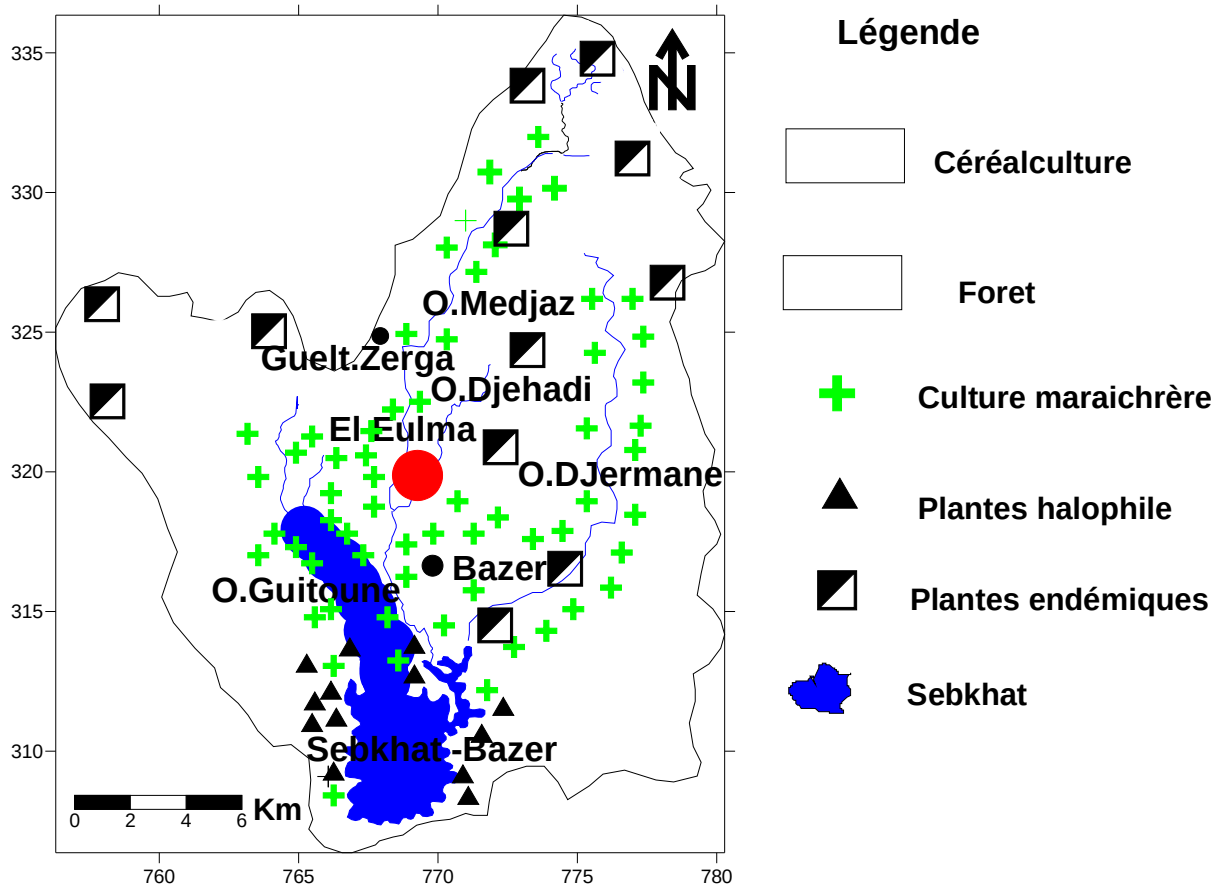


Fig N° 18 Carte de végétation de la région d'El Eulma.

5 Conclusion :

Le couvert végétal est la source du développement et de la continuité des espèces animales et humaine. Son développement et sa valorisation constituent pour la région un apport économique qui dépend de la ressource en eau et des techniques d'irrigation.

La faune

1 Introduction :

La région d'El Eulma est caractérisée par un sol riche ce qui lui a permis de développer une agriculture diversifiée et avoir un peuplement d'animaux domestique et sauvage fort important .

2 Elevage de la région d El Eulma .

Dans cette région :

- Les ovins sont utilisées pour la production de la viande rouge, la laine, la peau pour l'industrie du cuir.
- Les bovins pour production du lait, la viande rouge.
- La volaille production de la viande Blanche, et l'œuf.
- Caprins élevage peut présents

Suite à une enquête de terrains par les services de la direction d'agriculture 2006, les animaux domestiques de la région d'El Eulma sont répartis comme suit dans le Tableau N° 05

Tableau N° 05 Élevage de la région d'El Eulma.

Zones	Bovins	Ovins	Caprins	Volailles		
				Pondeuse	Viande	Dinde
Bazer Sakra	9110	18900	1100	55000	64000	
Guel Zerga	5560	12100	1550	33150	477000	7200
El EULMA	4400	13600	720	131550	273600	
Totale	19070	44600	3380	219700	1390600	7200

3 Les animaux de l'écosystème de la forêt d'Ouled Amrane et les oiseaux migrateurs de la zone humide de Sebkhaz Bazer.

3-1 Les animaux de l'écosystème de la forêt d'Ouled Amrane

L'inventaire des animaux existant dans la forêt de Ouled Amrane mené par nous même nous a donné la présence des animaux sauvage, des oiseaux, des insectes et des terriers Tableau N°06 et Fig. N° 19.

Tableau N° 06 Animaux de la forêt de Ouled Amrane

Animaux sauvages	Oiseaux	Insectes	Terriers
Sanglier	Aigle Royale	Coccinelle	Gerboise
Chacal	corbeau	Abeilles	Rat
renard	Cigogne	Mouches	Serpents
hérisson	Perdrix	Moustiques	Lézards
Lapin	Hirondelle	Hanneton	Tortue
	Rouge Gorge	Criquet locale	Grenouille
	Hibou	Sauterelle verte	
	Flamant Rose	Cigale	
		Libellule	
		Papillons	



Fig N ° 19 Foret d'Ouled Amrane

3-2 Oiseaux migrateurs de la zone Humide de la région D'El Eulma

Les oiseaux migrateurs constituent un peuplement très important pour les zones humides des dépressions fermées d'El Eulma chotte El Beida ,sebkhat Bazer ,chotte El Frain et sebkhat El Hamiet .Les oiseaux migrent des pays Scandinaves , du sud de Europe et la Russie . Un suivit d'enquête mené par les services de la direction des forêts de la wilaya de Sétif est modifié par nous même , nous a donné le nombre des oiseaux qui colonisent la région .Tableau N°07

Tableau N° 07 les oiseaux migrateurs des zones humide de la région d'El Eulma

Sites Espèces	Chottes El Beida	SebkhetBazer	Sebkhet El Hamiet	Sebkhet Frain
<i>Tadorna Tadorna</i> 	460	1200	-	-
<i>Anas platyrhynchos</i> 	-	16		—
 <i>Anas penelope</i>	-	-		-
<i>Anas Clypeata</i> 	350			-

<i>Anas acuta</i> 	-	450		-
<i>Anas Sp</i> 	-	150		-
<i>Aythya ferina</i> 	-	-		-
<i>Anser anser</i> 	-	5		-
<i>Fulica atra</i> 	-	-		-
<i>Phoenicopterus ruber</i> 	18	15		-
<i>Larus ridibundus</i> 	-	-		-
<i>Podiceps cristatus</i>	-	-		-
<i>Podiceps nigrocollis</i> 	-	-		-
<i>Tachybaptus ruficollis</i> 	-	-		-
<i>Charadrius dubius</i> 	80	70		-

<i>Phalacrocorax</i>  <i>carbo</i>	-	-		-
 <i>Plegadis</i> <i>falcinellus</i>	5	-		-
 <i>Bubulcus ibis</i>	2	-		-
<i>Egretta</i>  <i>garzetta</i>	-	-		-
 <i>Ardea cinerea</i>	-	-		-
 <i>Ciconia ciconia</i>	9	-		-
<i>Circus</i>  <i>aeruginosus</i>		9		-
<i>Falco</i>  <i>colobarius</i>	2			-
Total	926	1915	1210	00

Légende :

Espèce Site	Chotte El Beida
 <i>Ciconia</i>	(09) Nombre

4 Conclusion :

Les animaux constituent un système dynamique qui évolue dans l'espace et dans le temps qui ont besoin de la ressource en eau pour vivre, Or Sebkhat Bazer reçoit les eaux usées de la ville d'El Eulma à qui constitue un danger pour l'équilibre écologique de la région.

La population

1 Introduction :

Caractérisée par une répartition spatio-temporelle entre le milieu rural et milieu urbain, les habitants de la région ont une répartition qui dépend des conditions socio économiques. La ville d'El Eulma est en pleine expansion et en pleine développement à un milieu rural caractérisé par une richesse et une diversité écologique.

2 Histoire de la population de la région d'El Eulma.

Colonisée par l'homme préhistorique de Ain Henache, (1800000 années) la région d'El Eulma a connue différentes étapes d'évolution de la population dans son milieu rural et urbain. Les vestiges et les restes archéologiques : Construction, canalisation des ressources en eaux, les cimetières et les Kherbas témoignent de la présence d'une civilisation romaine dans différents points de la région à quelques Km des sites de Mons et de Djemila. Le débarquement des Français dès en 1862 dans la région ont implanté la ville de Saint Arnaud au centre des tributs, Béni Me rouannes au nord, Ouled Abdenour à l'est, Ouled Abdesslam au sud et au nord, Amer Guebala et Amer Dahra à l'ouest et EL Eulma au centre. De cette dernière tribut que la région a tiré le nom d'El Eulma. Fig. N°20



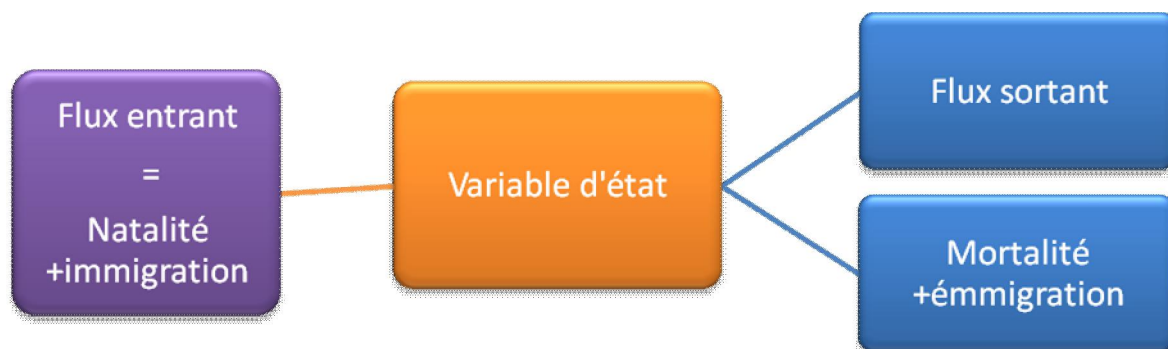
Fig N° 20 Vestige archéologique époque romaine de la région El Eulma

3 Dynamique de la population.

Les forces qui déterminent les variations d'abondance des populations et des sous populations [Classe, Age, Cohorte (ensemble d'individus nés en même temps)], et qui donnent lieu à une dynamique, sont toutes les causes possibles des variations démographiques. Multiplication des individus par reproduction, mortalité, croissance faisant passer génération et cohortes d'une classe de taille à la suivante, immigrations et émigrations par rapport au territoire sur laquelle on a définie la population.

Pour expliquer les variations d'abondance par une dynamique, revient essentiellement à modéliser cette dynamique de telle sorte qu'elle prévoie les variations constatées. Fig 21

$$\text{Variable d'état} \left\{ \begin{array}{l} \text{Flux entrant (recrutement)} = \text{natalité} + \text{immigration} \\ \text{Flux sortant} = \text{Mortalité} + \text{émigration} \end{array} \right.$$



FigN°21Modèle dynamique de la population

La cinétique de la variable d'état représente les variations de la biomasse dans le temps. La variation et l'évolution de la population de la région d'El Eulma évolue d'une manière exponentielle aux environs de 2010 la Population atteint les 200 000 Habitants répartie dans les agglomérations urbaines d'El Eulma ,Guelt Zerga et Bazer Sakra et le milieu rural .Fig. N°22 et N°23

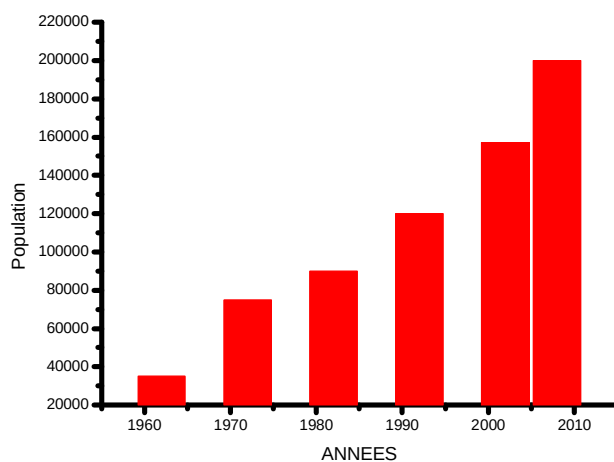
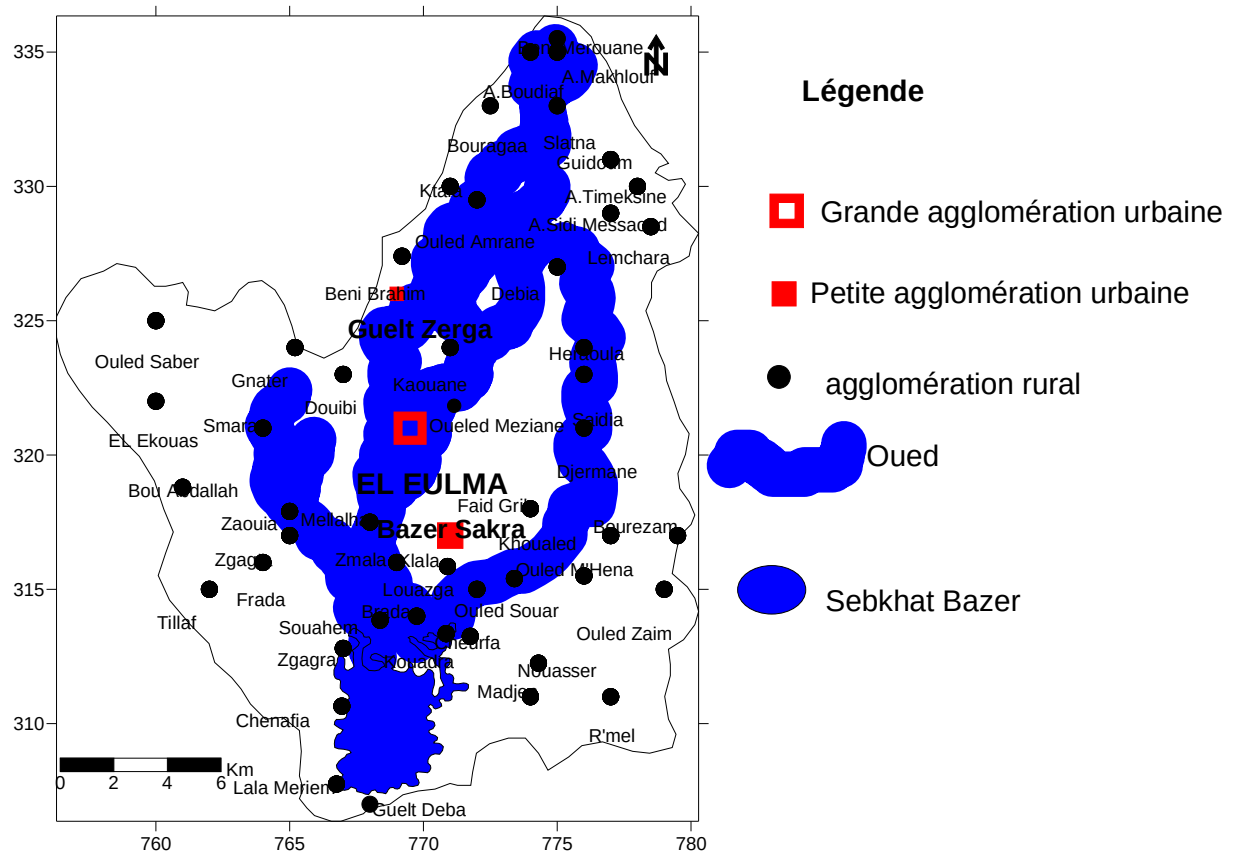


Fig. N°22 Histogramme de l'évolution de la population de la région d'El Eulma



4 Conclusion

La population de la région d'El Eulma est répartie entre le monde urbain et le monde rural. En 2035 le bassin d'El Eulma peut abriter plus de 400 000 habitants ce qui nécessite de rechercher d'autres potentialités hydriques afin de subvenir aux besoins de cette population de plus en plus croissante et exigeante.

L'air

1 Introduction.

Sous le terme atmosphère, on entend la couche d'air constituée de gaz occupant une portion du ciel. On parle en particulier de l'atmosphère de la terre. L'homme peut vivre au plus deux semaines sans nourriture et deux jours sans eau, mais pas plus de cinq minutes sans air. Environ 0.5 l d'air est emmagasiné à chaque inspiration. A raison de 16 inspirations par minute (dans le cas de respiration au repos) c'est un volume d'air de 11.5 m³ soit environ 13.5kg, qu'un homme respire quotidiennement : Cette quantité dépasse de loin celle de l'eau ou de la nourriture absorbée. Les variations survenant dans l'atmosphère sont d'une plus grande importance, pour l'environnement, que dans les domaines de l'eau ou celui du sol.

2 Composition de l'air.

Les principaux constituants de l'air sont l'Azote (N), Oxygène (O₂), Argon(Ar). Ces trois éléments constituent ensemble une concentration volumique de 99.964% ; les autres éléments avec une teneur volumique inférieure à 0.04% (Tableau N°08). La composition de l'atmosphère n'est pas la même en tous les points ni au cours du temps : elle dépend de nombreux facteurs.

- de l'altitude ;
- de la latitude ;
- de la période prise en compte au cours d'une journée ;
- du domaine (zone) concerné(e).

Tableau N °08 Composition de l'air

Eléments chimique	Concentrations %
N	78.084
O ₂	20.946
Ar	0.934
Autres	0.04

3 Qualité de l'air.

On détermine les zones d'après la qualité de l'air qu'elles contiennent, on utilise différents concepts, mais la plupart du temps ils ne sont pas très homogènes ni nettement délimités les uns par rapport autres. On les divise en trois zones .Fig. N° 24.

Zones polluées, elles sont caractérisées par la présence des sources de pollutions urbaines et industrielles.

Zones non polluées, englobent les zones rurales éloignées des sources de pollutions.

Zones à air pur, les régions qui se trouvent très éloignées des sources d'émissions.

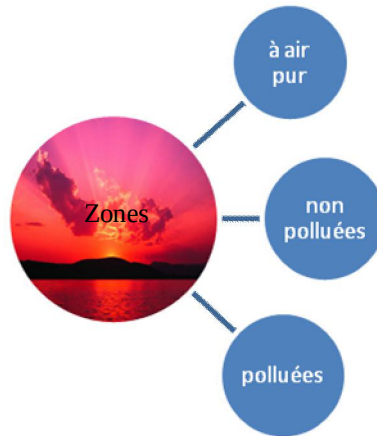


Fig N° 24 Zones de qualité de l'air.

4 Relations avec les autres systèmes.

L'importance d'une substance pour l'environnement dépend de sa qualité et de la voie par laquelle elle parvient dans les différents compartiments ainsi que les interactions qui ont lieu entre l'air est les êtres vivant homme ,plante et animaux d'un coté et le sol de l'autre coté Fig N° 25

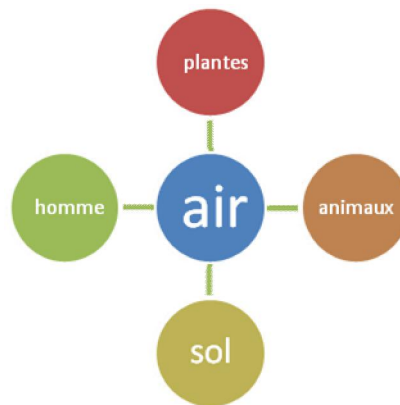


Fig N ° 25 interaction air, sol, plante, animaux et homme

5 Conclusion.

Dans la région d'El EULMA un smog s'est développé suite aux gaz d'échappements des moteurs de voitures ,la fumée du tabac , l'incinération des déchets dans le milieu urbain , la décharge publique , la fumée de la fonderie et l'unité Tréfisoud.

L'eau source vitale pour la vie, rentre en interaction avec les systèmes géologiques, pédologique, végétal, animal, humain et l'air qui évoluent dans l'espace et dans le temps .Fig N° 26

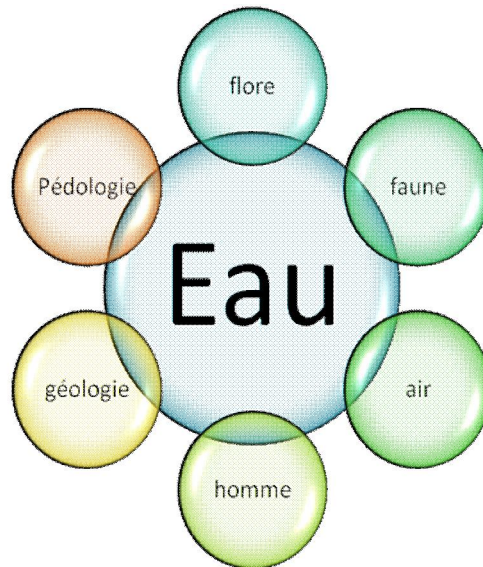


Fig N ° 26 Interaction de l'eau avec la géologie, la pédologie, la flore, la faune , l'air et l'homme

Parmi les techniques d'étude de la dynamique des systèmes et leurs interactions :La dynamique chaotique permet de dire que :

- Cette dynamique est extrêmement compliquée peut être définie à l'aide d'un petit nombre d'équations simples et déterministes
- L'image obtenue diffère du comportement des modèles simples
- La dynamique obtenue dans ces conditions a des caractères communs avec un processus aléatoire.

2^{ème} Partie

La ressource en eau

Géomorphologie

1 Introduction :

Quelles que soit les conditions climatiques, auxquelles il se trouve soumis, le bassin versant a une fonction de collecteur : Il reçoit les précipitations et les transforme en écoulement qui rejoignent la mer ou les dépressions .Cette transformation ne va pas sans perte d'une partie des eaux précipitées. Ces pertes dépendent tout autant des conditions climatologiques qui règnent dans le bassin versant que les caractéristiques physiques de ce dernier , la nature du sol ,la couverture végétale interviennent en dernier lieu.

2 Délimitation et planimétrie du bassin versant de la région d'El Eulma .

Le sous bassin des dépressions fermées d'El Eulma ou (bassin de chott El Beida), appartient au grand bassin versant des hauts plateaux constantinois qui est constituées de (07) sous grands bassins versants Tableau 09 et 10 ,Fig. 27 et 28

Tableau N° 09 Nomenclature de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH) des bassins et sous bassins en Algérie

Bassin	Sous Bassins	Dénomination		07011	Sous Bassin Bazer
Bassin hauts plateaux constantinois 07	0701	Chott Beida	Chott El Beida 0701	07012	Sous Bassin El Guinguet
	0702	Merdja Zana		07013	Sous Bassin El Hamiet
	0703	Sebkhat Zemmoul		07014	Sous Bassin ElFrain
	0704	Oued Chemoura		07015	Sous Bassin Chott El Beida

Tableau N° 10 Nomenclature des sous bassins versants

Région d'El Eulma Sebkhat Bazer 07011	070111	Oued Medjaz
	070112	Oued Djermane
	070113	Oued Guitoune

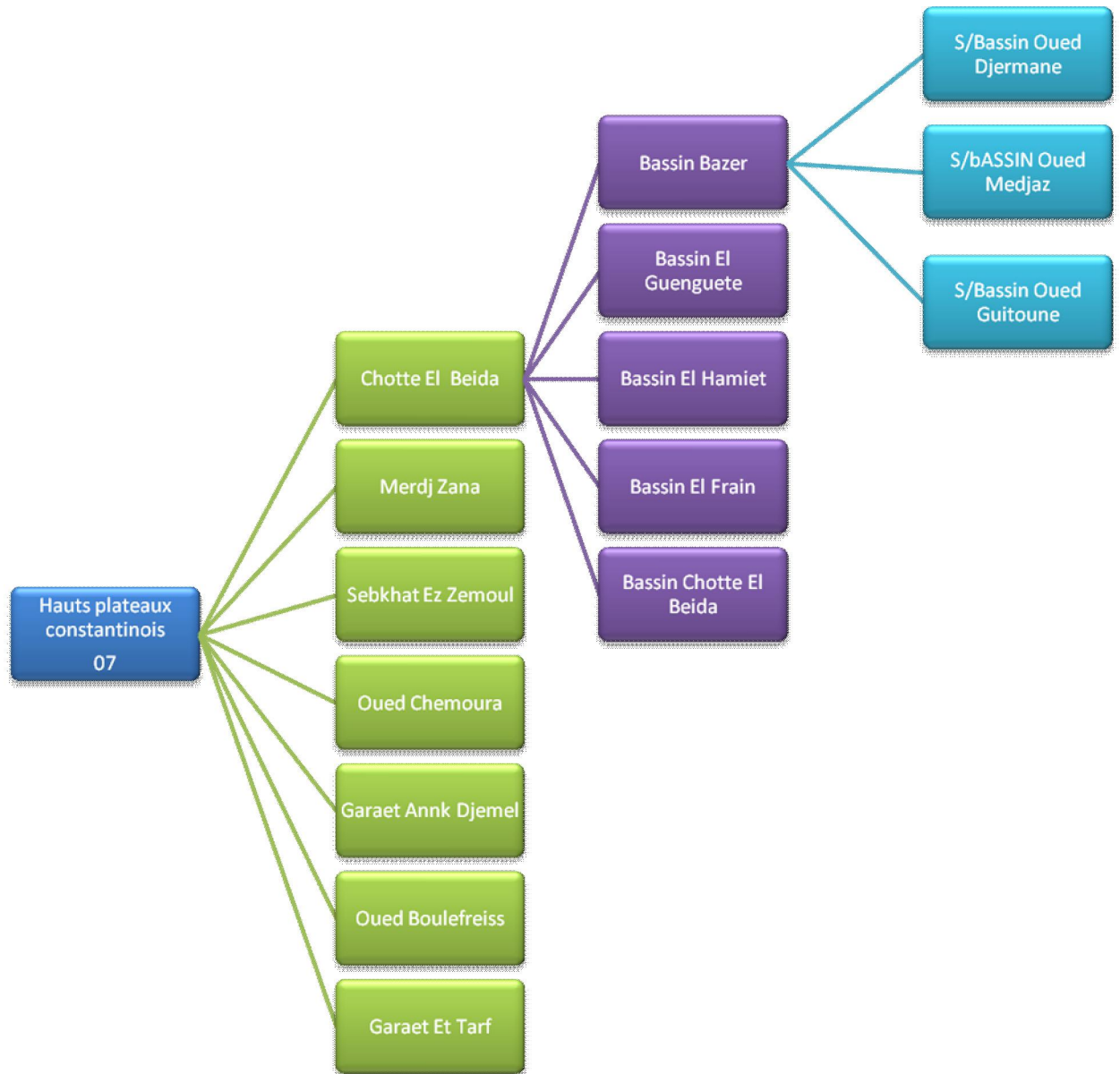
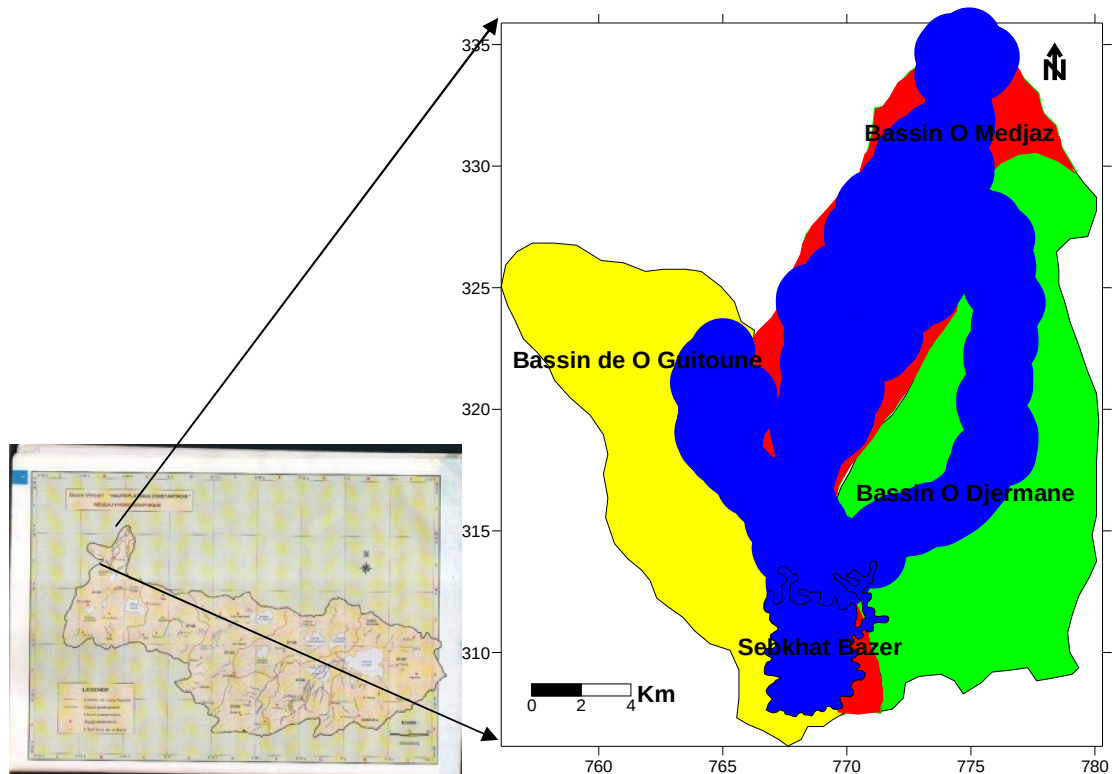


Fig N° 27 Les différents bassins et leurs sous bassins de la région d'El Eulma



Légende :

Sous bassin O. Djermane.
 Sous bassin O. Medjaz .
 Sous bassin O.Guitoune

Fig. N° 28 Carte du bassin de la région d'El Eulma.

4-4 Les caractéristiques morphométrique des sous bassins versants d'El Eulma .

A l'aide d'un curvimètre on a mesuré les dimensions de la surface, le périmètre et la longueur des oueds des trois sous bassins versants de oued Djermane, le sous bassin de oued Medjaz et le sous bassin de oued Guitoune, les résultats sont donnés dans le tableau 11

Tableau N° 11 Caractéristiques morphométriques des sous bassins versants

Caractéristiques morphométriques des sous bassins versant	
Oued Medjaz Kebir Melah	35.65 km
O ued Djehadi Goutali	21.15 Km
Oued Djermane	18.82Km
Oued Guitoune	15.35Km
Périmètre Sebkhath Bazer	39.25Km
Surface Sebkhath Bazer	16.78 Km ²
Périmètre du bassin versant	103.3Km
Surface du Bassin Versant	402 km ²
Surface sous Bassin Oued Medjaz Djehadi	105 Km ²
Périmètre Medjaz –Djehadi	85 Km
Surface Sous Bassin Oued Djermane	167 Km ²
Périmètre S /B Oued Djermane	65 Km
Surface Sous Bassin Oued Guitoune	130Km ²
Périmètre S/Bassin O.Guitoune	60Km

4-5 Les caractéristiques de forme des sous bassins versants

.Les caractéristiques physiques jouent un rôle essentiel dans l'étude morphométriques des bassins versants

4-1 Les caractéristiques de forme.

Se sont des caractéristiques purement géométriques des bassins que l'on peut obtenir par l'analyse des cartes topographiques. La précision des calculs sera bien évidemment liée à celle des cartes topographiques utilisées. La forme des bassins est importante à étudier car elle conditionne le temps de réponse du bassin aux précipitations c'est-à-dire la durée du ruissellement de surface et du temps de parcours à travers le réseau de drainage. Dans cette étude des caractéristiques de forme, plusieurs modèles ont été proposés tel que celui de par Gravelius, Schumm, Caquot ..

4-2 Indice de Compacité ou coefficient de Gravelius :

L'indice de compacité est un paramètre qui renseigne sur la forme du bassin versant, cette dernière influe le temps de concentration. Les valeurs de l'indice de compacité (tableau 12) montre que les sous bassins de Oued Guitoune et sous bassin de Oued Djermane sont plus compacts alors celui de Medjaz et plus allongés. Or l'ensemble du bassin de la région d'El Eulma est compacte Fig 21

Tableau N°12 Indice de compacité

Sous bassin	Superficie	périmètre	$K_c = \frac{0.28P}{\sqrt{A}}$
Bassin versant d'El Eulma	402 km ²	103.3Km	1.44
S/Bassin O.Djermane	167 Km ²	65 Km	1.49
S /Bassin O.Guitoune	130Km ²	60 km	1.47
S/Bassin O.Medjaz	105 Km ²	85 Km	2.28

4-6 Densité du drainage du bassin versant et des sous bassins versants.

La densité du drainage est donnée par la formule suivante :

$$D_d = \sum_i \frac{L_i}{A}$$

Avec :

Dd : densité de drainage en Km/km²

L : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin versant

A : aire du bassin versant en km²

Les valeurs de densité de drainage obtenue sont comprises entre 1.26 et 2.42 Km/Km². (Tableau 13).

Les plus petites valeurs correspondent aux plus grands sous bassins. Ces résultats indiquent que les sous bassins versants sont en générale bien drainés. L'importance du drainage est due principalement à la nature des formations qui forment le bassin ainsi qu'aux pentes assez forte des bassins versants d'une part et d'autre part au régime climatique, caractérisé par ses pluies

irrégulières et violentes. Généralement les valeurs de la densité de drainage sont faible dans la région des plaines : en raison des pentes faibles, les précipitations moins importantes, une évapotranspiration élevée ainsi que la perméabilité des formations lithologiques.

Tableau N° 13 densité de drainage.

Bassin	Dd (Km /Km ²)
Bassin d'el eulma	1.75
S/Bassin de O Djermane	1.26
S /Basin de O Medjaz	2.42
S/Bassin de O Guitoune	1.84

4-4 Relief et Indice de Pente.

Le relief à une influence sur l' hydrogramme de crue. Ainsi une pente plus forte provoque un écoulement plus rapide donc un temps de concentration plus court et inversement.

4-4-1 Etude et représentation des altitudes

La région se présente comme une grande plaine ,parsemée par quelques montagnes dont les plus importants sont :Djebel Beni Merouane 1304m ,Draa Chouaffa 1265 m ,Djebel Tavoudèche 1232 m ,Draa Diss 1235 m, Djebel Tnoutite 1170 m ,Djebel Braou 1200 m .dont les surfaces partielles et cumulées sont données dans le tableau 14

Tableau N°14 Tranches d'altitudes partiel et cumulée .

Tranche d'altitude (m)	Dénivelée (m)	Surface partielles (Km ²)	Surface cumulés (Km	Surface partielles %	Surface cumulées %
1300-1200	100	15.72	15.72	4	4
1200-1100	100	21.28	37	5	9
1100-1000	100	14 .15	51.15	3	12
1000 -900	100	350.85	402	88	100

4-4-2 Altitude moyenne et relief moyen :

La plupart des facteurs météorologiques (température, pluie, vent) et hydrologiques (débit spécifique en particulier) ,sont étroitement liés à l'altitude . L'altitude moyenne du bassin versant est fonction de la dispersion des différentes tranches d'altitudes en fonction de la superficie.

$$H_{pondérée} = \frac{S}{L}$$

H = Hauteur moyenne pondérée à partir du niveau de base adopté

S = Surface planimétrie de la courbe enveloppe représentant la valeur du bassin versant.

L = Longueur abscisse de la courbe représentant, par définition la surface du bassin versant en projection sur un plan sur un plan horizontal qui est celui de la carte , l'altitude moyenne du bassin versant est de 1105 m .Tableau 15.

Tableau N°15 altitude pondérée

Altitude	Bassin Versant
H _{pondérée}	1105 m
H _{50%} altitude médiane	996 m

4-4-3 Discussion de la courbe Hypsométrique :

La courbe hypsométrique est le reflet de l'état d'équilibre potentiel du bassin versant (Strahler 1946) . La courbe tracée est caractéristique d'un système pénéplaine pour le bassin de la région d'El Eulma, il s'agit de faible pente conduisant à des inondations .Fig 29

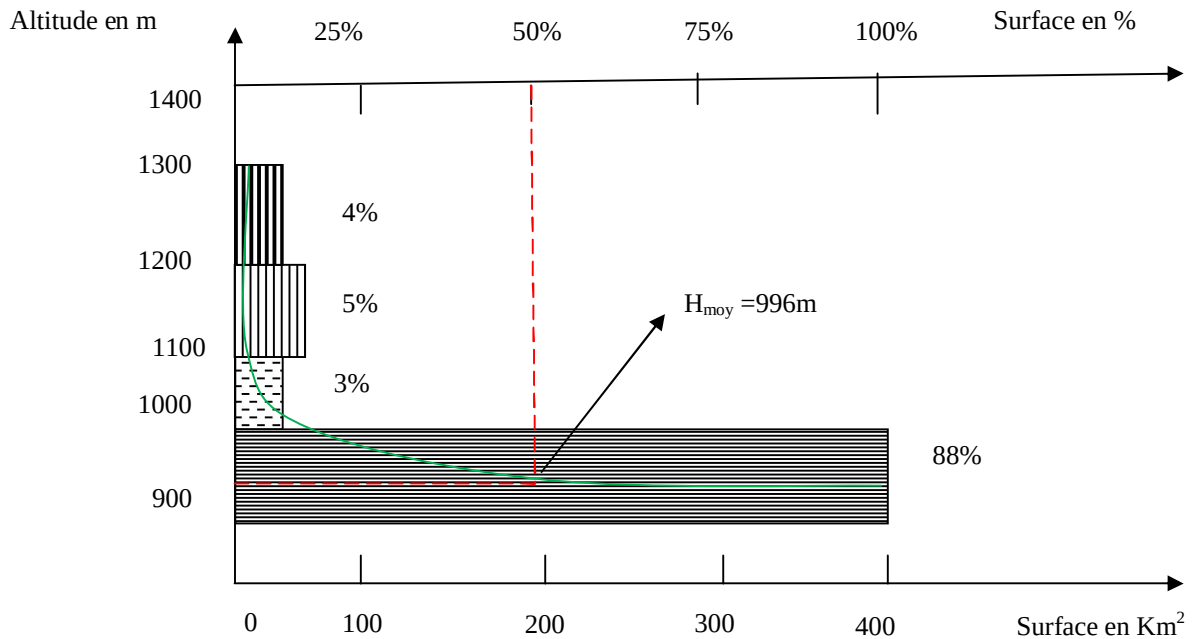


Fig N° 29 Courbe Hypsométrique du Bassin de la région d'El Eulma

4-5 Rectangle équivalent :

Pour une simple transformation géométrique, le contour devient un rectangle de même périmètre. Les courbes de niveau des droites parallèles au petit coté du rectangle, l'exutoire et l'un des petits cotés du rectangle appelé rectangle équivalent .

Si les cotés du rectangle sont respectivement L et l

K_C : Indice de Compacité ou de Gravellius

A : Surface du bassin

P : Périmètre du bassin permettant de calculer les dimensions de ce rectangle.

L et l , sont alors les racines d'une équation de 2^{ème} degré et donc on aura :

$$L = \sqrt{A} \frac{K_C}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right]$$

$$l = \sqrt{A} \frac{K_C}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right]$$

Les dimensions du rectangles équivalents sont données dans le tableau 16.

Tableau N°16 dimensions du rectangle équivalent.

Bassin Versant	K_C	A (Km ²)	$\sqrt{A}$ (Km ²)	L (Km)	l(Km)
Bassin Versant El Eulma	1.44	402	20.04	42.06	9.23
S /BassinVersantO.Djermane	1.49	167	12.92	28.52	5.84
S/Bassin Versant O.Medjaz	2.28	105	10.24	38.87	2.70
S/Bassin VersantO.Guitoune	1.47	130	11.40	21.35	5.23

4-6 Indices de pente .

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement, son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente globale I_g donné par la relation suivante. Tableau 17

$$I_g = D/L$$

Ou

I_g = Indice global de Roche

D = dénivelée (m) .

Sur la courbe hypsométrique ,on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface totale .

H_5 et H_{95} sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin donc la dénivelée

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} = 370$$

Les résultats du tableau 18, montre d'après la classification de l'Orstom (Tableau 19) le relief du bassin versant d'El Eulma et cèle de du sous bassin de oued Medjaz et oued Djermane sont faible, tandis que le sous bassin de oued Guitoune est modéré.

Tableau N°17 indice de pente

Bassin	I_g (m/ Km)	Nature du relief
Bassin de la région d'El Eulma	0.006	faible
S/Bassin de O.Medjaz	0.007	faible
S / Bassin de O.Djermane	0.009	faible
S/Bassin de O.Guitoune	0.012	Modéré

Tableau N° 18 Classification du relief selon I_g par ORSTOM

Nature du relief	I_g (m/Km)
Relief très faible	$I_g < 0.002$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.5$
Relief Fort	$0.05 < I_g < 0.5$
Relief très fort	$I_g < 0.5$

5 Conclusion :

Les caractéristiques morpho métriques du bassin versant d'El Eulma montrent l'influence de la morphologie du terrain sur l'écoulement des eaux de surface et le temps de concentration (calculé dans la partie hydro climatologie) des eaux de précipitation qui arrive a l'exutoire , drainé par les trois cours d'eau .La conjonction des phénomènes topographiques , le climat semi aride, le sol et le couvert végétale ont donné naissance au phénomène d'endoréisme qui s'est traduit par l'installation des dépressions fermés (Chotts et Sebkhass).

Hydroclimatologie

1 .Introduction :

Le climat Algérien est caractérisé par la grande variabilité des précipitations et de température liée à l'irrégularité topographique et aux influences opposées de la méditerranéenne et du Sahara. Le régime climatique des hautes plaines sétifiennes est commandé par la morphologie de la région et sa position en latitude et en altitude. Les hautes plaines sétifiennes occupent une position élevée ce qui lui donne un climat montagnoux, chaud pendant la journée et frais pendant la nuit. La région d'El Eulma est caractérisée par une saison pluvieuse qui s'étend de Septembre à Juin .La période Sèche se limite aux mois de Juillet et Aout, avec des intervalles de crises de sécheresse qui varient d'une saison à une autre.

2 Stations d'observations

Nous avons choisi un réseau de station pluviométrique de manière à avoir une meilleure représentabilité du climat de la région : Il s'agit des stations d'El Eulma , ,Beni Fouda et Bir El Arch. Les stations sont réparties dans deux bassins versant des hauts plateaux constantinois pour la station d'El Eulma et le bassin du Kebir Rhumel pour les stations de Beni Fouda et Bir El Arch. Tableau 19

Tableau N°19 Stations d'observations

N°	Station	Code national	X	Y	Z (m)	Appareil	Mis en service
1	El Eulma	070103	759 ,40	320,60	960	Pluviomètre	1920
2	Bellaa	100302	783 ,75	327.25	1000		1970
3	Beni Fouda	100301	762.50	322.50	830		1970
4	Bir El Arch	100306	782, 30	319,04	1090		1970

3 Etude des précipitations

4

3-1 Précipitations annuelles

Les séries d'observations des trois stations les plus récentes, sont données par l'office national de Météorologie de la wilaya de Sétif (ONM).

Sur un cycle de 35 ans (1970/1971- 2005/2006), la variation des précipitations observées aux trois stations est donnée par le tableau 22 et fig. 30 et 31

L'étude de la variation des précipitations en fonction du temps des trois stations montre que l'année la plus arrosée est 1984-85 avec 585 , 579 et 588 mm/an pour les stations d'El Eulma ,Bir El Arch et Beni Fouda , par contre l'année la plus sèche est celle de 1996-97 avec respectivement 228 , 207 et 220 mm/an pour les stations d'El Eulma ,Bir El Arch et Beni Fouda .Tableau 20

Tableau N°20 séries observations

Stations	Périodes	
	1974	2006
El Eulma		
Bir El Arch		
Beni Fouda		

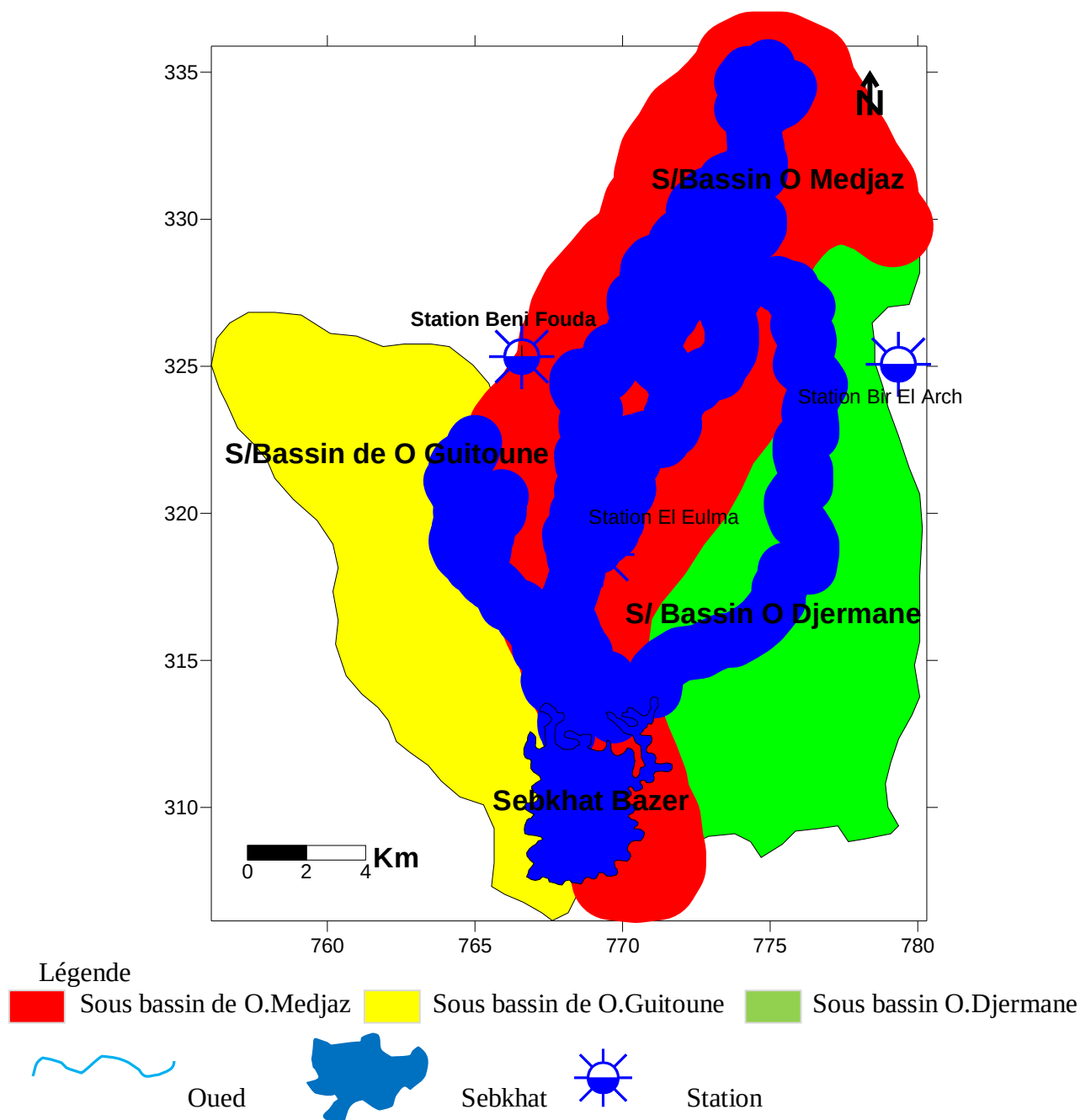


Fig N °30 Carte de position des stations

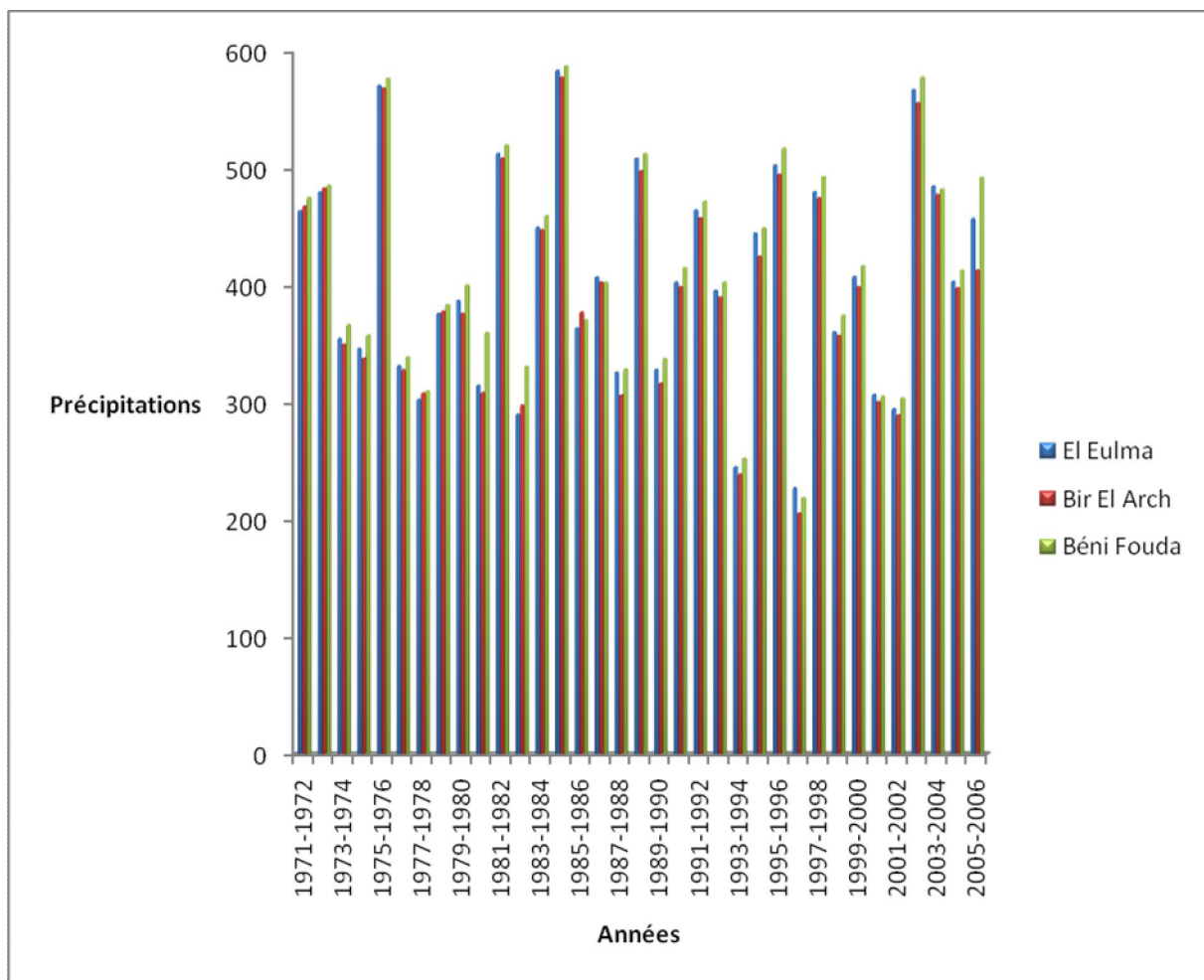


Fig N °31 Histogramme des précipitations annuelles.

Tableau N° 21 précipitations mensuelles, années humides et sèche

Stations Mois	El Eulma		Bir El Arch		Béni Fouda	
	1984-85	1996-97	1984 -85	1996 -97	1984 -85	1996 - 97
Septembre	41	18	40	17	41	16
Octobre	89	23	87	22	89	24
Novembre	40	26	40	24	42	23
Décembre	125	35	123	32	124	32
Janvier	112	7	110	7	110	8
Février	85	54	85	50	86	51
Mars	24	23	23	20	24	22
Avril	27	12	27	8	28	9
Mai	33	16	31	12	31	13
Juin	3	4	3	4	2	5
Juillet	6	5	6	5	6	7
Aout	5	5	6	5	6	9
Somme	585	228	579	207	588	220

3-2- Précipitations mensuels interannuelles 1971-2006 .

Les précipitations mensuelles interannuelles de la période de 35 ans 1971-2006 ont donné une moyenne de 405 ,395 et 443 mm/an pour les stations d'El Eulma ,Bir El Arch et Beni Fouda Tableau 24 et Fig 32.

Tableau N° 22 Précipitations mensuels interannuelles 1971-2006

Stations mois	El Eulma P(mm)	Bir El Arch P(mm)	Beni Fouda P (mm)
Septembre	49	41	42
Octobre	28	28	29
Novembre	30	31	47
Décembre	47	47	62
Janvier	50	30	67
Février	42	47	47
Mars	39	39	26
Avril	28	37	37
Mai	28	29	34
Juin	29	30	27
Juillet	25	27	15
Aout	10	9	10
Moy Annuelle	405	395	443

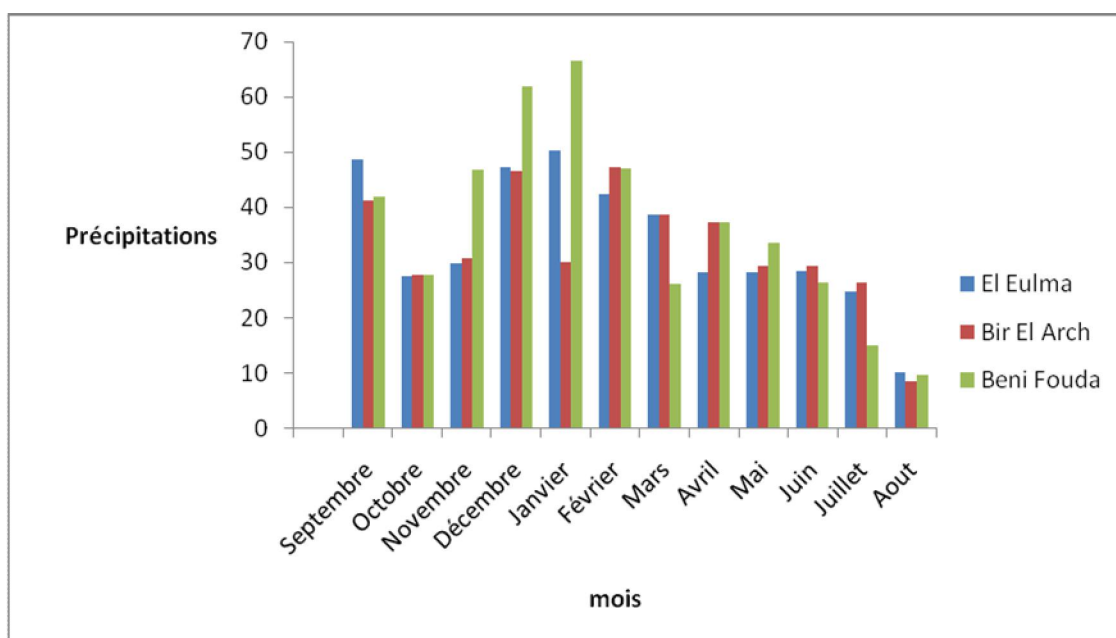


Fig. N°32 Histogramme précipitations mensuelles interannuelles.

3-3 Précipitations saisonnières.

Les précipitations saisonnières varient d'une saison à une autre pour les trois stations, humide en hivers et sec en été. Tableau 25, Fig. 33

Tableau N° 23 Précipitations saisonnières 1971-2006

Stations \ saisons	El Eulma	Bir El Arch.	Béni Fouda
Automne	106	100	118
hiver	140	124	176
Printemps	95	105	97
Été	64	66	52

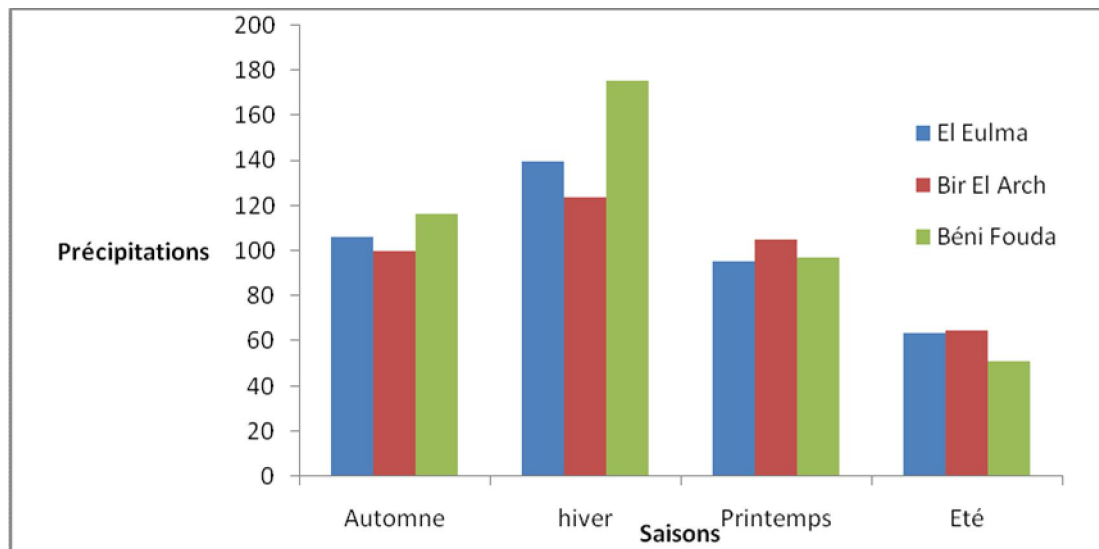


Fig. N ° 33 Histogramme des précipitations saisonnières .

3-4 Coefficient pluviométrique relative (H).

Le coefficient permet de déterminer pour une station donnée est excédentaire ou déficitaire, il est définie par le rapport de la pluviométrie P d'une année, a la pluviométrie moyenne, Pmoy pour une période de 10 ans

$$H = P / P_{moy} \text{ avec}$$

P ; Hauteur annuelle de pluie de l'année considérée, en mm

Pmoy : Pluviométrie moyenne en (mm)

H : Coefficient pluviométrique ou coefficient Hydraulicité.

L'année est excédentaire lorsque H est supérieur à 1 elle est déficitaire si H est inférieure à 1

Les stations d'El Eulma et Bir El Arch. ont enregistrée 17 années sèches et 18 années humides, celle de Beni Foua a enregistré 18 Années Sèches et 17 Humides. Tableau 26 et fig 34,35,36

Tableau N°24 Précipitations annuelles et coefficients pluviométriques 1971 -2006

Années	S/ El Eulma		S/Bir El Arch P(mm)		S/ Beni Foua	
	P(mm)	H	P (mm)	H	P (mm)	H
1971-1972	465	1.18	469	1.19	476	1.17
1972-1973	481	1.22	484	1.23	487	1.19
1973-1974	356	0.90	351	0.89	367	0.90
1974-1975	347	0.88	339	0.85	359	0.88
1975-1976	572	1.45	569	1.45	578	1.42
1996-1977	332	0.84	329	0.83	340	0.83
1977-1978	307	0.77	309	0.78	311	0.76
1978-1979	377	0.95	379	0.96	384	0.92
1979-1980	388	0.98	377	0.96	401	0.98
1980-1981	316	0.80	309	0.79	361	0.88
1981-1982	514	1.30	510	1.30	521	1.18
1982-1983	291	0.73	299	0.76	332	0.81
1983-1984	451	1.14	448	1.14	460	1.13
1984-1985	585	1.48	579	1.47	588	1.44
1985-1986	365	0.92	378	0.96	371	0.91
1986-1987	408	1.03	404	1.03	404	0.95
1987-1988	327	0.82	307	0.78	329	0.81
1988-1989	509	1.29	499	1.27	514	1.26
1989-1990	329	0.83	317	0.81	339	0.83
1990-1991	404	1.02	340	1.02	416	1.02
1991-1992	465	1.18	458	1.17	473	1.16
1992-1993	397	1.00	391	0.99	404	0.99
1993-1994	246	0.62	240	0.61	253	0.62
1994-1995	445	1.13	426	1.08	450	1.10
1995-1996	504	1.30	496	1.26	518	1.27
1996-1997	228	0.57	206	0.52	220	0.54
1997-1998	481	1.22	476	1.09	494	1.21
1998-1999	361	0.91	358	0.91	375	0.92
1999-2000	409	1.03	340	1.02	418	1.02
2000-2001	308	0.78	302	0.77	306	0.75
2001-2002	296	0.75	290	0.74	305	0.74
2002-2003	568	1.44	557	1.42	579	1.42
2003-2004	486	1.23	479	1.22	483	1.18
2004-2005	404	1.02	399	1.01	414	1.01
2005-2006	458	1.16	414	1.05	493	1.22
Moyenne	405		394		443	

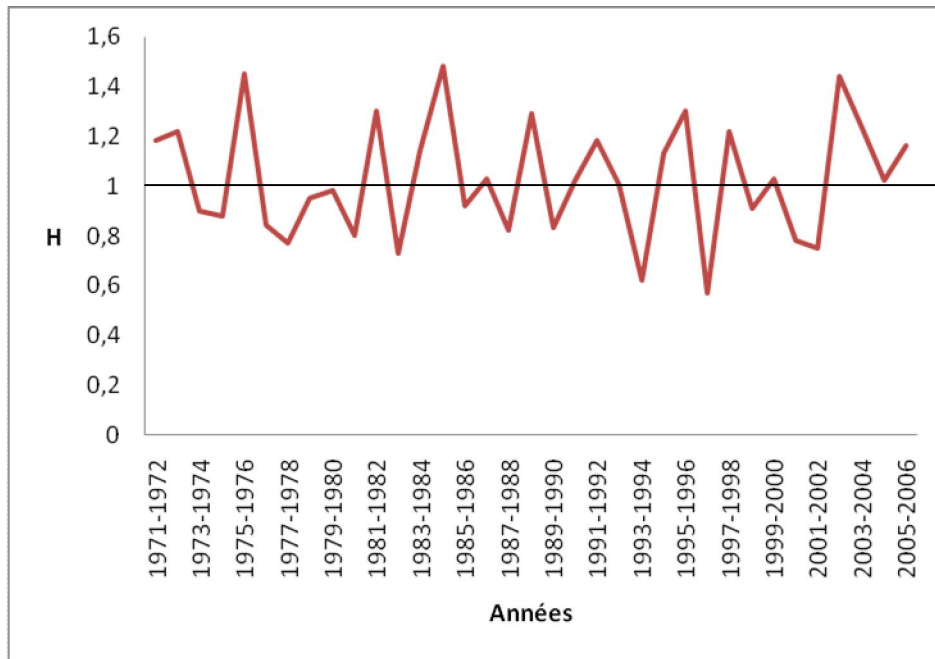


Fig N°34 Coefficient pluviométrique annuel station D'El Eulma .

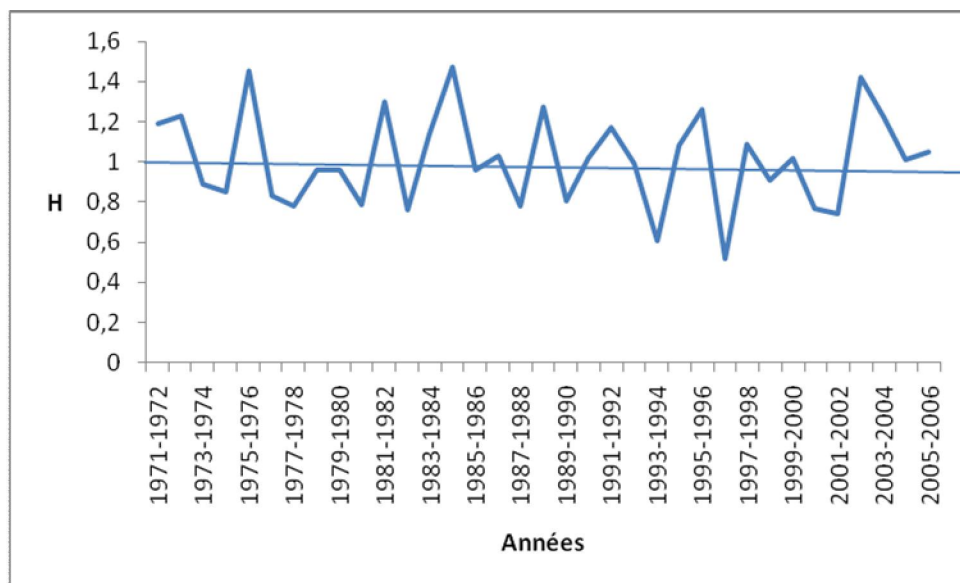


Fig N°35 Coefficient pluviométrique annuel station Bir El Arch .

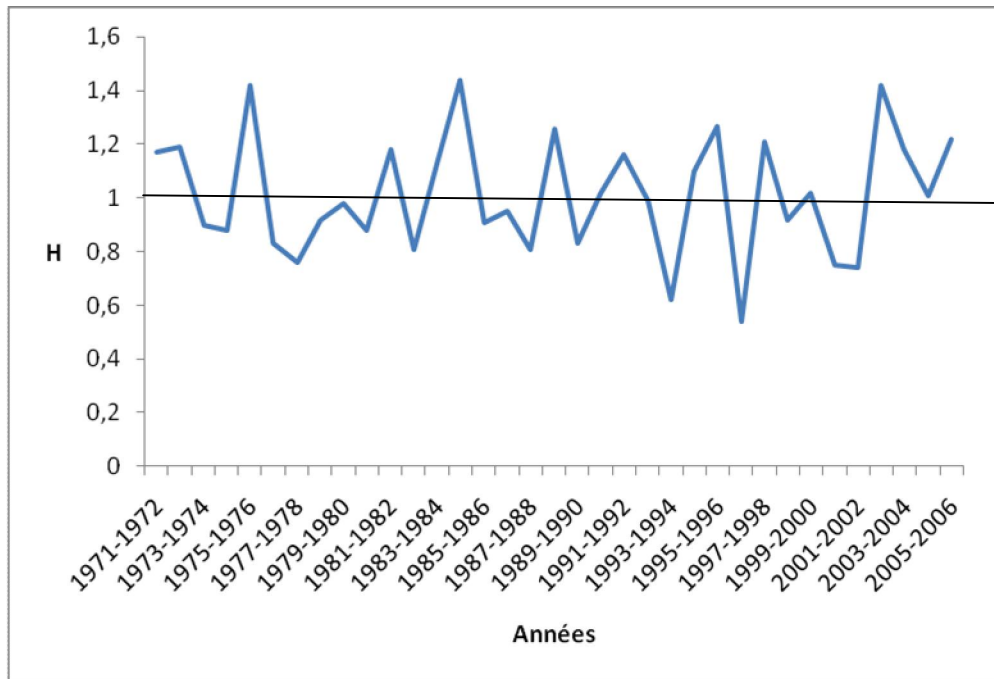


Fig N°36 Coefficient pluviométrique annuel station Beni Foua .

3-5 Détermination de la lame d'eau précipitée

En a appliqué deux méthodes pour l'estimation de la lame précipitée.

3-5-1 La moyenne arithmétique des stations

C'est la méthode la plus rapide, elle consiste à calculer la moyenne arithmétique des précipitations observées à chaque station .Cette méthode accorde une grande importance aux valeurs extrêmes .Son efficacité est meilleur pour les petits bassins ou l'influence de l'altitude, de l'exposition et de la latitude sur les précipitations est partout identiques.

$$\bar{p} = \frac{\sum P_i}{n} = \frac{405+399+443}{3} = 416 \text{ mm/an}$$

Le contrôle de l'adéquation de ce modèle :

N : Représente le nombre de station sur le bassin

σ : L'écart type sur les valeurs de précipitations

$\bar{x}$: La moyenne des valeurs

C_v : Le coefficient de variation, $C_v = 100 \sigma / \bar{x}$

On aura donc $E_r = \frac{C_v}{\sqrt{N}}$: E_r représente l'erreur en pourcentage

On obtient pour la période d'observation une erreur de 1.17%

3-5-2 La méthode de THIESSEN

C'est la méthode la plus adoptée. Les surfaces d'influences (polygones) pour chaque station sont déterminées grâce au réseau de médiatrices des segments joignant les postes deux à deux. Chaque surface partielle est affectée de la hauteur annuelle moyenne de la station concernée. La somme des volumes d'eau précipité au niveau de chaque polygone sera divisé par la surface totale du bassin versant pour obtenir la lame d'eau tombée. Tableau 27

Tableau N° 25 Lamé d'eau précipité par la Méthode de Thiessen

Stations	Précipitations P_i (mm)	Surface S_i (Km ²)	$P_i . S_i$
El Eulma	405	87	35235
Bir El Arch	394	167	65798
Béni Fouda	443	105	46515

$$P = \frac{\sum P_i S_i}{\sum S_i} = \frac{35235 + 65798 + 46515}{105 + 167 + 87} = 411 \text{ mm /an}$$

Discussion des résultats.

Les résultats obtenus à l'aide des deux méthodes présentent une différence pratiquement insignifiante, les valeurs obtenue s'approchent de la réalité si on les compare aux données d'observations .La valeur moyenne entre ces deux méthodes (413 mm /an) Tableau 28

Tableau N° 26 Lamé d'eau précipitée moyenne

Méthodes	Lamé d'eau précipité sur le bassin mm /an
arithmétique	416
Thiessen	411
Moyenne	413

3-6 La couverture nivale

La neige intervient dans l'écoulement superficiel et l'alimentation des aquifères. La couverture nivale a été observée pendant le mois de décembre 2004 et le mois Mars 2006 dans la ville d'El Eulma et Ouled Amrane . Fig 37 et Tableau 29



Fig N°37 Chute de neige 27décembre 2006 Ouled Amrane

Tableau N°27 couverture nivale

Région D'El Eulma	Couverture nivale (Hauteur de la neige cm)	
	Ville D'El Eulma	Ouled Amrane
25 /12/2002	4	5 .6
25/01/2003	3	3.8
31/12/2003	3.5	4.8
28/12/2004	6.5	10.6
5/02 /2005	7	8.7
12/01/2006	13	13.5
27/12/2006	12	15.6

4 Étude de la température.

La température joue un rôle important dans le bilan hydrologique d'un bassin versant. L'étude de l'évolution de la température elle est de la plus haute importance dans les problèmes d'évaporation, d'évapotranspiration et le déficit d'écoulement .Dans la région d'El Eulma trois stations prises en considération ont enregistré les températures suivantes durant les périodes 1971- 2006. Le régime thermique de la région, ce qui nous permet de représenter la variation de la température minimale, maximale et moyenne de la station d'El Eulma qui peut être représentative pour les trois stations de la période étudiée .Tableau 30 et Fig 38

Tableau N°28 Température min ,max ,moy annuelle .

Années	EL Eulma			Bir El Arch			Béni Fouda		
	Min	Min	Min	Max	Moy	Max	Moy	Max	Moy
1971-1972	9.2	9.3	9.2	20.5	14.5	20.5	14.5	20.6	14.3
1972-1973	9.4	9.3	9.3	20.4	14.6	20.3	14.6	20.4	14.5
1973-1974	9.4	9.4	9.4	20.5	14.5	20.5	14.5	20.2	14.6
1974-1975	9.3	9.1	9.1	19.4	14.6	19.6	14.8	19.3	14.7
1975-1976	10.2	9.9	10	20.3	14.5	20.1	14.4	19.6	14.6
1976-1977	9.1	9.1	9.1	20.4	14.4	20.5	14.5	20.7	14.5
1977-1978	9.6	9.5	9.6	20.6	14.6	20.7	14.5	20.8	14.3
1978-1979	8.7	8.8	8.8	19.7	14.5	19.8	14.3	19.6	14.2
1979-1980	9.5	9.5	9.4	21.3	14.5	21.3	14.5	21.5	14.4
1980-1981	9.2	9.2	9.3	20.4	14.6	20.4	14.6	20.4	14.5
1981-1982	9.4	9.2	9.4	20.1	14.8	20.1	14.8	19.9	14.6
1982-1983	9.6	9.5	9.5	21.2	15.6	21.2	15.4	21.6	15.7
1983-1984	9.3	9.4	9.3	21.5	13.5	21.4	13.4	21.6	13.2
1984-1985	8.6	8.7	8.7	21.9	13.9	21.9	13.8	22.1	13.9
1985-1986	9.5	9.4	9.4	19.5	14.4	19.6	14.4	19.5	14.4
1986-1987	9.1	9.1	9.1	19.5	14.6	19.4	14.6	19.3	14.7
1987-1988	10	9.8	9.8	19.6	15	19.6	14.9	19.8	14.9
1988-1989	9.9	10	10	19.7	14.7	19.7	14.8	19.6	14.8
1989-1990	9.7	9.5	9.8	20.2	13.5	20.3	13.4	20.1	13.3
1990-1991	10	10.1	10.3	19.5	13.5	19.5	13.5	19.6	13.6
1991-1992	8.5	8.6	8.5	20.1	13.7	19.9	13.8	19.8	13.8
1992-1993	8.6	8.5	8.5	20.4	13.6	20.3	13.5	20.4	13.5
1993-1994	9.3	9.4	9.4	20.1	14.5	20.1	14.5	20.1	14.3
1994-1995	10.2	10.1	10.2	20.7	15.6	20.7	15.5	20.9	15.6
1995-1996	9.4	9.4	9.5	19.5	15.2	19.8	15.3	19.8	15.4
1996-1997	9	8.9	8.9	21.2	14.5	21.2	14.6	21.4	14.3
1997-1998	10.2	10.1	10.2	22.1	13.5	22.1	13.4	22	13.7
1998-1999	10.4	10.3	10.4	21.4	14.6	21.4	14.6	21.3	14.6
1999-2000	10.3	10.4	10.3	20.5	15.4	20.4	15.3	20.5	15.5
2000-2001	9.4	9.5	9.4	19.6	14.5	19.6	14.4	19.7	14.7
2001-2002	8.6	8.6	8.6	19.7	14.4	19.7	14.2	19.9	14.5
2002-2003	9.3	9.3	9.4	20.2	14.5	20.2	14.3	20.1	14.6
2003-2004	10.5	10.5	10.5	19.1	14.3	19.1	14.3	18.7	14.5
2004-2005	9.9	9.7	9.9	20.2	14.5	20.2	14.5	20.5	14.4
2005-2006	10.2	10.2	10.2	19.3	14.2	19.4	14.3	19.4	14.3

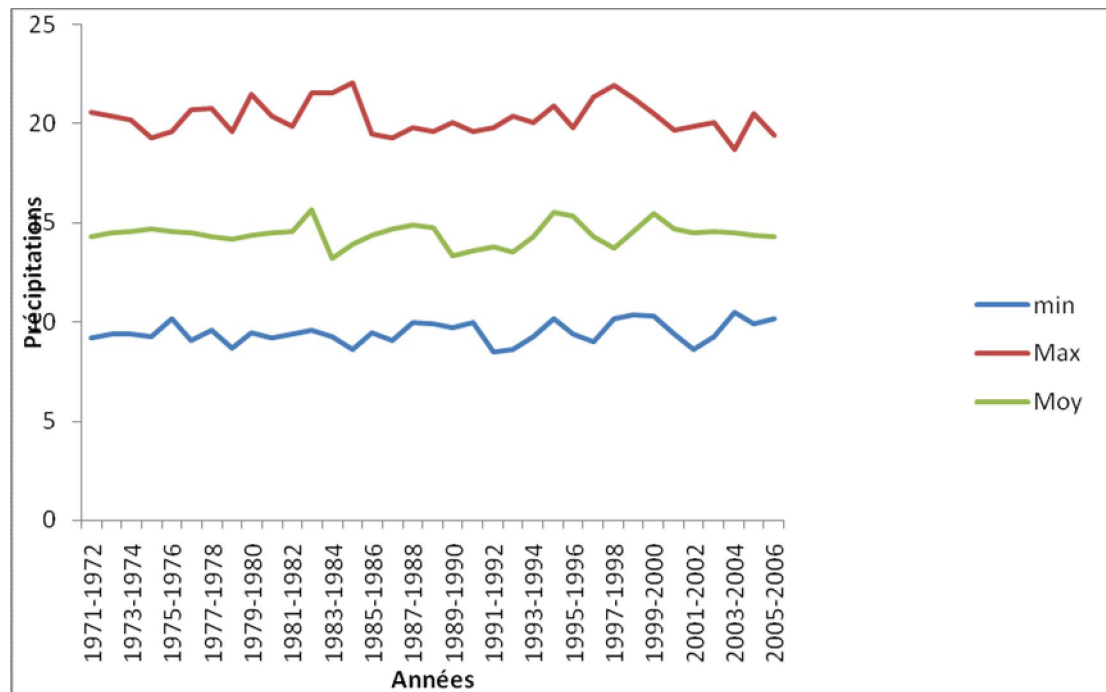


Fig N ° 38 Régime thermique Station d'El Eulma

5- Calcul de l'indice d'aridité.

5-1 Indice climatique annuelle de DE MARTONE 1923.

Cette indice est définie par la formule suivante :

$$P = \frac{P}{T+10}$$

P= Précipitation annuelle moyenne en mm

T = Température annuelle moyenne en (C°)

Selon la valeur de cet indice le climat est classé en cinq catégories Tableau 31

Tableau N° 29 Indice d'aridité

Indice d'aridité	Type du climat
I<5	Climat hyperaride
5<I<7.5	Climat désertique
7.5<I<10	Climat steppique
10<I<20	Climat semi aride
20<I<30	Climat tempéré

La valeur de l'indice permet de classer notre région dans l'étage bioclimatique semi aride
Tableau 32.

Tableau N°30 Indice d'aridité selon de Martonne 1923

Station	P (mm)	T (°C)	I	Observations
El Eulma	405	14.5	16.52	Climat semi aride
Bir El Arch	394	14.4	16.14	
Beni Fouda	415	14.4	17	

5-2 L'indice d'aridité mensuel

L'indice mensuel (i), donné par la formule :

$$I = \frac{12P}{T+10}$$

Avec P : moyenne mensuelle des précipitations en mm

T : moyenne mensuelle des températures en °C

Cette équation permet d'avoir l'évolution des conditions climatiques au cours de l'année. Tableau 33 et Fig 39

Tableau N° 31 Indice d'aridité mensuel selon de Martonne 1923

	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	juil.	Aout
i	15.6	13.9	14.3	23	19.6	19.8	20.8	19.7	22.5	11.1	3.3	8.33

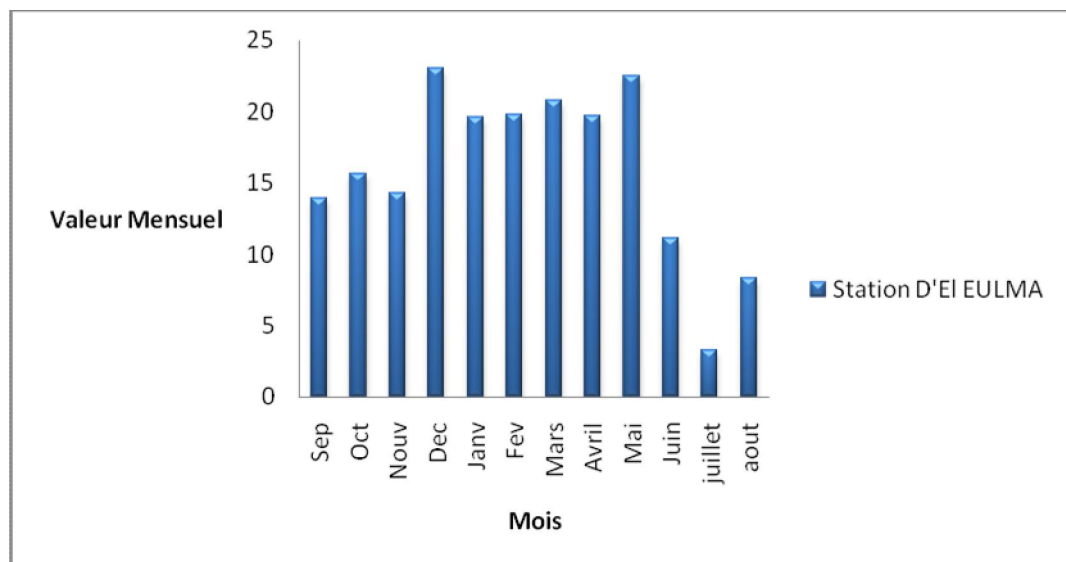


Fig N° 39 Indice d'aridité mensuel

D'après de Martonne l'indice d'aridité varie entre :

20 et 30 le climat est tempéré ce qui est le cas des mois de décembre, Mars et mai.

5 et 10 le climat est steppique le cas des mois de juillet et Aout.

10 et 20 Le climat est semi aride, le cas du mois Septembre, Octobre, Novembre, Janvier. Fig. 40

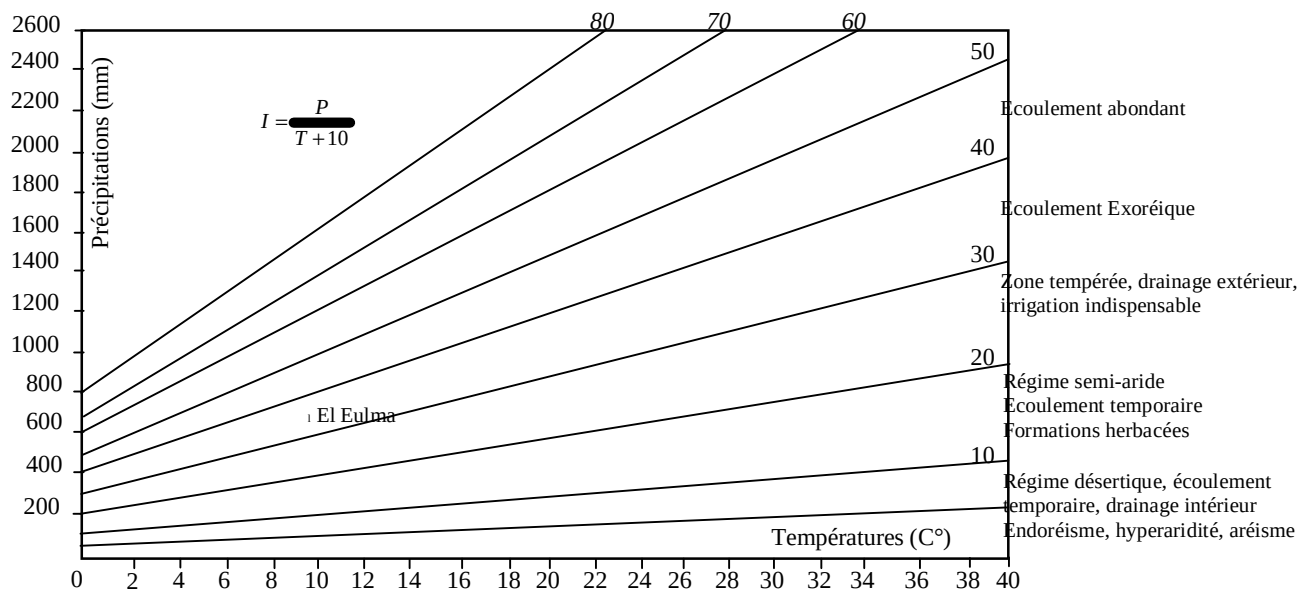


Fig N° 40 Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martonne 1923

6 - Diagramme pluviométrique

6-1- Méthode H.Gaussen et F.Bagnouls .

Pour H.Gaussen et F.Bagnouls ,la combinaisons des deux principaux facteurs La température et les précipitations permet de déterminer les mois secs qui correspondent selon la définition basée sur le comportement de la végétation aux mois ou le total des précipitations est égal où inférieur au double de la température moyenne mensuelle

L'application a la région d'El Eulma permet de nous donner une idée générale sur le bassin versant .Donc la période sèche correspond aux mois de Mai ,Juin, Juillet ,Aout et Septembre .La période humide coïncide avec les mois d'Octobre ,Nov ,Déc ,Jan ,Fev ,Mars et Avril. Fig 31

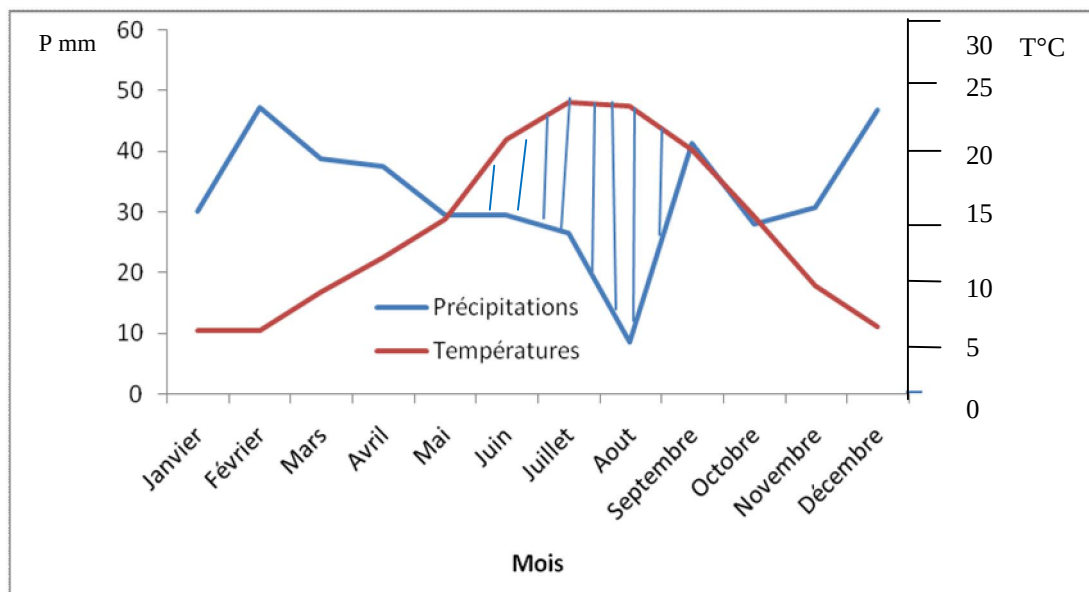


Fig N°41 Diagramme Ombrothermique Station d'El Eulma 1971-2

6-2 Méthode de G.Euverte.

G.Euverte en 1959 a présenté une approximation faite en considérant l'action de la chaleur et d'humidité vis-à-vis de l'activité biologique. Les besoins en eau des végétaux suivent une progression exponentielle lorsque les températures progressent arithmétiquement.

7 - Évapotranspiration .

L'évapotranspiration est sans doute l'une des données climatologiques la plus difficile à approcher. Dans le bilan hydrologique elle est le terme le plus important après les précipitations, elle est la somme des quantités d'eau, exprimées en mm, évaporées à partir de la surface du sol est utilisées par les plantes. Elle est aussi difficile à évaluer à cause de sa pluri-dépendance des facteurs tant biologiques que physiques (Rouabhia 2006)

L'ETP : Correspond à l'évapotranspiration d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité maximale permise pour les conditions climatiques cas des nappes superficielles.

7-1 Evapotranspiration potentiel (ETP) selon la formule de Turc (1962)

L.Turc 1962) a proposé une formule simplifiée tenant compte de la durée d'insolation et de l'humidité relative relevée dans la région. Elle est estimée à l'aide de la formule suivante :

$$ETP \text{ (mensuel)} = 0.4 \frac{T}{T+15} (I_{\text{h}} + 50) K$$

Avec : T températures moyenne mensuelle en °C du mois considéré

I_g : Radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale, exprimé en calories par cm^2 et par jour (0.4 coefficient valable pour le mois de 30 et 31 jours, pour le mois de février en prend la valeur de 0.37).

$I_g = I_{\text{EA}} (0.18 + 0.62 \frac{h}{H})$: Radiation solaire globale du mois considéré

I_{EA} : Radiation maximale théorique calculé

H : Durée astronomique du jour tabulé.

$K=1$, Si l'humidité relative mensuelle de l'atmosphère est supérieure à 50%

$K = 1 + \frac{(50 - H_0)}{70}$, si l'humidité relative mensuelle de l'atmosphère est inférieure à 50%

H_0 = Humidité relative moyenne de l'air pendant le mois considéré (%)

7-2-ETP selon GW.THORNTWAITE (1944).

La formule de calcul de l'évapotranspiration potentielle selon GW.THORNTWAITE (1944) tient compte de l'indice thermique et de la température moyenne mensuelle.

$$ETP = 1.6 \left(10^{t/I} \right)^a$$

$I = \sum_{i=1}^n i$ avec $i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$ indice thermique mensuelle et annuelle

ETP : Evapotranspiration potentielle non corrigée du mois considéré (mm)

$$a = (1.6 * I / 100) + 0.5$$

$$ETP = 1.6 \left(10^{t/I} \right)^a K$$

K : coefficient de correction qui dépend de la latitude du bassin et de la durée moyenne de l'ensoleillement.

Evapotranspiration potentiel annuel est respectivement près du double selon La méthode de Thornthwaite et près du triple selon la méthode de Turc du total pluviométrique annuel .Tableau 34 et 35.

Tableau N°32 Calcul de ETP selon Turc et Thorntwaite 1971-2006

Mois		Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
Température	El Eulma	20.7	15.3	9.9	6.1	5.1	6.2	8.4	11.4	16.5	21.7	25.8	25.5
	BirEl Arch	20.7	15.1	10	6.4	5.4	6.4	8.4	11.3	16.4	21.4	25.8	25.4
	Beni Fouda	20.5	15.3	9.8	6.5	5.2	6.3	8.4	11.4	16.3	21.6	25.6	25.4
Précipitation	El Eulma (1)	33	29	29	46	45	42	47	44	45	21.1	9	15
	Bir El Arch (2)	32	28	27	44	43	42	46	42	45	21	9.2	14
	Beni Fouda (3)	35	31	31	45	46	43	47	44	46	21	10	16
Ensoleillement		275	224	180	158	118	171	212	236	277	320	358	325
Méthode de L. TURC	$I_s A$	749	597	459	396	436	559	718	856	947	978	956	874
	H	372	350	310	304	312	307	371	392	453	435	442	417
	H_0	270	224	180	158	182	171	212	236	279	320	358	326
	h	57	70	77	82	79	78	77	69	63	48	37	44
	K	1.00											
	I_s	473	345	249	200	237	294	384	474	531	622	653	580
	ETP1	119	80	63	29	29	53	79	112	144	184	202	180
	ETP2	119	79	63.2	30	30	54	79	111	144.3	183	202	181
	ETP3	120	80	63	30	30	53	79	112	14	183	202	181
Méthode de Thornthwaite	i_1	8.59	5.43	2.81	1.35	1.03	1.38	2.19	3.48	6.09	9.26	11.99	11.78
	i_2	8.59	5.33	2.85	1.45	1.12	1.45	2.19	3.43	6.03	9.03	11.99	11.71
	i_3	8.46	5.43	2.76	1.48	1.06	1.41	1.45	3.48	6.26	8.84	11.85	11.71
	a_1	1.54											
	a_2	1.54											
	a_3	1.53											
	ETP1	94	59	30.8	14	11	14	23	37	66.4	100.9	132.1	130.0
	ETP2	95	59	30.72	15	11	15	23	37	65.92	99.5	132.6	129.6
	ETP3	94	60	30.24	16	12	15	23	38	66.08	102.0	132.3	130.8
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16
	ETPC 1	97	57	26	12	9	12	24	41	80	123	164	141
	ETPC 2	97	57	26	13	10	13	24	41	80	121	164	150
	ETPC 3	97	58	26	14	10	13	25	42	80	124	164	152

Remarque : Les indices 1, 2 et 3 du tableau 32 représentent les stations d'El Eulma, Bir El Arch et Béni Fouda .

Tableau N° 33 ETP des trois stations

Station	ETP (Turc)	ETP (Thornthwaite)	ETP corr (Thornthwaite)	Précipitations
El Eulma	1245	714	787	405
Bir El Arch	1276	716	798	394
Beni Fouda	1277	721	805	443

7-3-Calcul de ETR .

Quatre méthodes ont été appliquée pour le calcul de ETR .

La méthode de LTurc

La méthode de M Coutagne

La Méthode de Wundt

La méthode de W Thornthaite

7-3-1-Formule de L.TURC annuelle.

Ce paramètre est estimé à l'aide de la formule suivante

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.5 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

P = Précipitation moyenne annuelle en (mm)

L = 300+25T+0.05T³ ou T est la température annuelle moyenne en °C.

Le calcul de ETR pour les stations d'El Eulma ,Bir El Arch et Beni Fouda est de 386, 390 et 438 mm/an Tableau 34

Tableau N°34 Calcul de ETR selon Turc

stations	P (mm)	T °C	ETR
El Eulma	405	14.5	386
Bir El Arch	394	14.4	390
Beni Fouda	443	14.4	438

7-3-2- Formule de Coutagne

Le déficit d'écoulement donnée par la formule suivante : $D = ETR - P - \lambda P^2$, valable que lorsque les précipitations sont comprises entre $\frac{1}{8\lambda}$ et $\frac{1}{2\lambda}$

Avec $\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 \cdot T}$ T : Température moyenne annuelle en °C. Tableau 35

Tableau N°35 Calcul de ETR selon Coutagne

Stations	D
El Eulma	347 mm
Bir El Arch	343 mm
Beni Fouda	345 mm

7-3-3-Formule de Wundt

WUNDT a établi un diagramme permettant d'obtenir une valeur du déficit d'écoulement à partir d'un abaque, son application nous donne les résultats suivants.

Les trois stations présentent un déficit variable suite à la pluviométrie qui caractérise chaque station. Tableau 36 .

Tableau 36 Calcul de ETR selon Wundt

Stations	Déficit
El Eulma	365
Birr El Arch	385
Beni Fouda	305

7-3-4 - Abaque de Verdeil (1988) .

Afin d'estimer les valeurs de l'évapotranspiration réel ou déficit d'écoulement P .VERDEIL a établie un abaque bi logarithmique pour les régimes semi aride en tenant compte uniquement des précipitations annuelles. La valeur de ETR déduite de l'abaque est de 400 mm/an

8- Établissement du bilan hydrologique .

8-1 Formule de THORNTHWAITE.

La méthode de Thornthwaite permet de calculer l'évapotranspiration potentielle ou réelle en se basant sur les températures, les précipitations et les variations du stock en eau dans le sol. La formule de Thornthwaite a l'avantage de faire ressortir quatre paramètres (évapotranspiration, potentielle et réelle, le déficit agricole et l'excédent). A partir de ce dernier paramètre on aboutira au ruissellement et à l'infiltration.

Ces deux paramètres sont très utiles en hydrogéologie, Or l'estimation de la réserve facilement utilisable (RFU) reste très difficile à calculer.

Le RFU est estimé par la formule suivante

$$RFU = \frac{1}{3}(Da \cdot He \cdot Pr)$$

Avec : Da : Densité apparente = 1

He : Capacité de rétention = 0.20 sol argileux limoneux

Pr : Profondeur des racines = 1000 mm

$$RFU = \frac{1}{3}(1 \cdot 0.20 \cdot 1000) = 200/3 = 66$$

La zone étudiée est à vocation agricole céréalière (blé dure ,orge ,blé tendre ,avoine). Les racines de ce type de culture vont jusqu'à 1m de profondeur , on adopte alors une RFU maximale de 60 mm (Demdoun .1996, Boudoukha. 1998 ,Khemmoudj. 2002). Sur cette base nous avons établi les bilans hydriques des trois stations d'El Eulma, Bir El Arch et Beni Fouda tableau 37 ,38,39

Tableau N°37 Bilan hydrique selon G.W.Thornthwaite pour la période 1971-2006 Station

d'El Eulma .

	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Année
T°C	20.7	15.3	9.9	6.1	5.1	5.2	8.4	11.4	16.5	21.7	25.8	25.5	14.5
i	8.59	5.43	2.81	1.35	1.03	1.38	2.19	3.48	6.09	9.26	11.99	11.78	65,38
a	1.54												
ETP	94	59	31	14	11	14	23	37	66	101	132	130	620
k	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16	
ETP_C	97	57	26	12	9	12	24	41	80	123	164	141	783
P	49	28	30	47	50	42	39	28	28	29	25	10	405
Var	-48	-28	+4	+35	+41	+30	+15	-13	-52	-94	-139	-131	
RFU	0	0	4	39	60	60	60	47	0	0	0	0	
DA	48	28	-	-	-	-	-	-	-	37	155	126	394
EX	-	-	-	-	20	30	15	0	-	-	-	-	65
ETR	49	28	30	12	9	12	24	41	75	29	25	10	344

Tableau N°38 Bilan hydrique selon G.W.Thornthwaite pour la période 1971-2006 Station Bir El Arch

	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Année
T°C	20.7	15.1	10	6.4	5.4	6.4	8.4	11.3	16.4	21.4	25.8	25.8	14.4
i	8.59	5.33	2.85	1.45	1.12	1.45	2.19	3.43	6.03	9.03	11.99	11.71	65,17
a	1.54												
ETP	95	59	31	15	12	15	23	37	66	99	132	130	715
k	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16	
ETP_C	97	57	26	13	10	13	24	41	80	121	164	150	796
P	41	28	31	47	30	47	39	37	29	30	27	9	395
Var	-56	-29	+5	+34	+20	+34	+15	-4	-51	-91	-137	-141	
RFU	0	0	5	33	59	60	60	56	5	0	0	0	
DA	56	29	-	-	-	-	-	-	-	86	137	141	449
EX	-	-	-	-	-	-	33	15	-	-	-	-	48
ETR	41	28	26	13	10	13	24	41	80	35	27	9	347

Tableau N° 39 Bilan hydrique selon G.W.Thornthwaite pour la période 1971-2006 Station Beni Fouda

	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Année
T°C	20.5	15.3	9.8	6.5	5.1	6.2	6.3	8.4	11.4	16.3	25.6	25.4	14.4
i	8.46	5.43	2.76	1.48	1.06	1.41	1.45	3.48	6.26	8.84	11.85	11.71	64,19
a	1.53												
ETP	94	60	30	16	12	15	24	38	66	102	132	130	720
k	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.87	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16	
ETP _c	97	58	26	14	10	13	25	42	80	124	164	152	805
P	42	29	47	62	67	47	26	37	34	27	15	10	443
Var	-55	-29	+21	+48	+57	+34	1	-15	-45	-94	-49	-42	
RFU	0	0	21	60	60	60	60	45	0	0	0	0	
DA	62	28	—	—	—	—	—	—	1	94	49	42	276
EX	—	—	—	9	57	34	1	0	—	—	—	—	101
ETR	35	31	26	14	10	13	25	42	79	27	15	10	354

On peut dire que l'évapotranspiration réelle (mm) obtenue par chacune des méthodes de Turc, Coutagne, Wundt, Verdeil et Thornthwaite varie entre 305mm et 387 mm .Le rapport ETR /P (%) varie entre 73 et 94% donc les résultats trouvés sont assez comparables Tableau 40.

Tableau N°40 Résultats des 4 méthodes

Formules	P (mm)			T°C			ETR (mm)			ETR/P(%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Thornthwaite	405	395	443	14.5	14.4	14.4	347	347	354	94	93	93
Turc							378	372	388	93	94	93
Coutagne							334	343	345	82	87	83
Wundt							365	385	305	90	98	74
P.Verdeil							400			95		

8-2 Evolution de ETR de la Station d'El Eulma.

La variation de ETR déterminée par les trois auteurs est sensiblement identique ce qui traduit que les facteurs climatiques sont relativement les mêmes. Tableau 41

Tableau N°41 Evolution de ETR station d'El Eulma

Méthode	Demdoun 1996	Boudoukha 1998	Khemmoudj 2002	Khemmoudj 2008
Turc	384	393	387	380
Coutagne	352	-	359	347
Wundt	386	-	365	365
Verdeil	390	400	387	400
Thornthwaite	382	405	373	344
Moy	379	-	374	374

9 Ruissellement.

Afin de déterminer le ruissellement on utilise la méthode de Tixeront –Berkaloff. Cette formule elle augmente les erreurs car c'est une méthode empirique qui nécessite des corrections à l'aide des installations lysimétriques

$$R = \frac{P^2}{3(ETR)^2} \quad (1)$$

Avec :

R : Ruissellement annuel en mm.

P : Précipitation annuelle moyenne en mm.

La formule du bilan s'écrit de la manière suivante :

$$P = ETR + EX \quad (2)$$

P : Précipitations annuelles moyennes en (mm).

R : ETR selon Thornthwaite ou la lame d'eau évapotranspirée durant l'année

(E+I) : ruissellement + infiltration

De l'équation (2) on déduit l'expression :

$$E+I = P - R$$

Application

$$E+I = 409 - 344 = 65 \text{ mm}$$

Le ruissellement R = 36 mm Tableau 42.

$$Ex = 65 \text{ mm}$$

$$\text{Donc } I = 65 - 36 = 29 \text{ mm}$$

Tableau N°42 Ruissellement

	Boudoukha 1998	Khemmoudj 2002	Khemmoudj 2008
Excédent en mm	16	15	31
Ruissellement en mm	38	32	36
Infiltration en mm	-	-	29

10 Discussion des résultats

Le ruissèlement est inférieur à l'excédent ce qui nous donne une infiltration de 14 mm donc en est proche de la réalité. Géologiquement la région est formée par des alluvions, des graviers et une croûte calcaire dont l'épaisseur est très variable. Cette couche surplombe les formations des argiles sableuses du Mio-Plio-Quaternaire. Cette structure avec la morphologie elle favorise l'écoulement est minimisée l'infiltration.

11 Hydrologie de surface

La quantification des ressources en eau et plus particulièrement les débits extrêmes, sont les crues et l'étiage. Les crues permettent de mettre en évidence la réaction du bassin versant pendant un pas de temps réduit, à une averse ou séquence pluvieuse donnée. Cette réaction ou réponse du bassin versant, fonction des caractères propres des précipitations (Hauteurs, intensité, durée totale et durée efficace) est déterminée par la combinaison complexe des divers éléments caractérisant l'organisme fluvial : état de saturation des sols, importance des pentes, densité de drainage, taux de couverture végétale, forme du bassin versant. Quant aux étiages, phénomène moins brutaux dans leur apparition, leur étude permet de mettre en valeur la forte décroissance des débits en phase de tarissement et préciser les restitutions des nappes aquifères à l'écoulement fluvial. (Mebarki 1984)

11-1 Les paramètres caractéristiques d'une crue.

11-1-1-Le temps de concentration

C'est le temps mis par les précipitations pour s'acheminer de l'extrême limite du bassin versant de l'amont jusqu'à l'exutoire formé par sebkhat Bazer dans la région d'El Eulma. Tableau 43 En applique la Formule de Giandotti, La plus utilisée

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{MOY} - H_{min}}} \quad \text{avec :}$$

T : Temps de concentration en heures.

L : Longueur du talweg principal (Km).

S : Superficie du bassin versant (Km²)

H_{moy} : Altitude moyenne en (m).

H_{min} : Altitude minimale en (m).

Tableau N°43 Temps de concentration

Oued Principale	S(Km ²)	L (Km)	Hmoy	Hmin	Tc(Heure) Khemmoudj 2008	Tc(Heure) Demdoun 1996
Oued Medjaz	105	35.65	996	907	12,52	11.132
Oued Djermane	167	18.84	996	907	10.54	8.66
Oued Guitouine	130	15.36	996	907	9.10	8.64

11-1-2 Détermination des volumes de crue

Afin de déterminer le volume d'eau donnant le débit maximale en fonction de l'intensité de l'averse qui le provoque on a utilisé quelques formules empiriques

Estimation des débits moyens journaliers maximums

Afin de répondre a cette question, on a utilisé la relation dite formule rationnelle de Samie. Tableau 44

$$Q_j(f\%) = \frac{P_{jx} \cdot r \cdot S \cdot K_a \cdot 10^3}{86400} \text{ Avec :}$$

$Q_j(f\%)$: Débit moyen journalière maximale correspond à une averse

(P_{jx}) de fréquence donnée en mm.

$P_{jx}(f\%)$: Averse de pluie journalière de fréquence f% donnée mm

S : superficie du bassin versant

K_a : coefficient d'amortissement de crue qui est fonction de la rugosité est de la pente =0.008

r : Coefficient de ruissellement instantané de la crue qui est fonction de la hauteur de précipitation journalière (averse) maximale pour une fréquence donnée

en tenant compte de la nature du couvert végétale pour les crues catastrophique

Le sol légèrement perméable à faible couvert végétale cultivé

$C_e = r = 0.4$ à 0.9

Sol légèrement perméable à couvert végétal cultivé

$C_e = r = 0.4$ à 0.6

Donc :

$r = C_e f(0.1\%) = 0.90$

$r = C_e f(1\%) = 0.80$

$r = C_e f(5\%) = 0.75$

$r = C_e f(10\%) = 0.65$

86400 : Le nombre de seconde par jour

Tableau N° 44 débits instantanés selon Sami.

f (%)	T(ans)	K_a	r	$P_{jx}(f\%)$	$Q_{jx}(m^3)$		
					O.Djermane	O.El Medjaz	O.Guitoune
0.1	1000	0.80	0.90	131.08	182	142	115
1	100	0.80	0.80	84.10	104	81	65
5	20	0.80	0.70	65.01	70	55	44
10	10	0.80	0.65	55.81	56	44	35

11-1-3 Détermination des débits instantanés.

11-1-3-1 Formule de Turaza.

$$Q_p = 0.27 C_e I S \text{ Tableau 45}$$

Avec :

S : Superficie du bassin versant en km²

I : Intensité de l'averse (pluie) en mm /h et égale au rapport de la précipitation de courte durée sur le temps de concentration.

$$I = P_{tc} / T_c$$

$$Q_p = 0.27 C_e \frac{P_{tc}}{T_c}$$

Tableau N°45 débits instantanés selon Turaza

f %	e	Ptc			Tc			I			S Km ²			Qp (m ³ /s)		
		O.Djermane 1	O.ElMedjaz 2	O.Guitoune 3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
0.1	0.90	88.28	97.31	88.2	10.54	12.52	9.10	8.37	7.77	9.69	167	130	105	83.66	72.72	47.24
1	0.80	65.65	72.30	65.6				6.22	5.77	7.20				24.36	52.02	53.29
5	0.75	50.75	55.94	50.7				4.81	4.46	5.57				52.66	7.40	8.43
10	0.6	43.57	48.02	43.5				4.13	3.83	4.78				11.73	0.65	1.30

11-1-3-2 Formule de Giandotti

Le débit instantané est proportionnel au débit journalier maximal.

$$Q_{inst} = Q_{jx} \cdot K \text{ Tableau 46}$$

$$\text{Avec } K = \left(\frac{P_{tc}}{P_{jx}} \right) \cdot \left(\frac{24}{T_c} \right)$$

P_{tc} : Précipitation de courte durée en mm

P_{jx} : Précipitation maximale journalière en mm

T_c : Temps de concentration en heures

Q_{jx} : Débit maximal journalier en m³/s

Q_{inst} : Débit instantané en m³/s.

Tableau N° 46 débits instantanés selon Giandotti

f(%)	T ans	P _{jx} (m ³)			P _{tc} (mm)	T _c			K			Q _{inst}					
		1	2	3		1	2	3	1	2	3	1	2	3			
99.9	1000	88.2	97.31	88.2	131.50	11.132	8.66	8.64	150.20	79.94	143.08	1.85	1.59	1.85	277,87	127,10	127,10
					111.75				56.46	84.1	206,73				89,77	155,58	
99	100	65.65	72.30	65.6	97.80				86.38	45.96	65.01				159,80	73,07	120,26
95	20	50.75	55.94	50.6	75.60				74.15	39.45	55.81				137,17	62,72	103,24
90	10	43.75	48.02	43.5	64.90												

11-2 -Discussion des résultats

Les trois formules nous donnent des débits des cours d'eau comme réponse des averses de précipitations des trois bassins versants. Mais elles restent comme des estimations théoriques qui seront comme base pour toutes quantifications pratiques. Cette quantité d'eau écoulee par les trois cours d'eau constitue une réserve qu'il faut mobiliser pour le réinjecter dans la nappe superficielle afin de réaliser une gestion durable des ressources en eau dans la région.

12-Conclusion

L'étude hydro climatologique a montré la variation des paramètres hydro climatologiques. le facteur principale qui contrôle les précipitations et le bilan hydrologique reste la température qui définit la nature du climat de la région .Cette dernière elle varie à échelle annuelle entre 9°C et 20°C pour les trois stations, ce qui donne à la région un climat de type généralement semi aride. Les précipitations ont à leur tour un rôle déterminant dans le climat et tombent sous forme de précipitations, ou sous forme de neige et varie entre 291mm et 588mm pour les trois stations. L'estimation de l'ETP a permis de voir que ce paramètre est pratiquement le double (800 mm) des précipitations alors que l'ETR reprend pratiquement 94% de la lame d'eau tombée sur le bassin versant ,l'infiltration et le ruissellement représentent 6% de la lame d'eau tombée .

Géométrie de l'aquifère

1) Introduction :

La recherche et l'exploitation des ressources en eaux souterraines sont étroitement liées à la connaissance de la nature géologique des sédiments et leur extension aussi bien horizontale que verticale (épaisseur).

Une première campagne géo électrique a été réalisée en 1972 par la compagnie générale de géophysique (CGG), pour le compte de la direction de l'hydraulique de la wilaya de Sétif

2 Matériels et méthode

Depuis 1989 le Pr Boudoukha a réalisé des prospections à l'aide de SEV en tant qu'expert hydrogéologue, que se soit pour le compte des propriétaires privés ou pour le compte des entreprises étatique . Pour des raisons de disponibilité de matériel, la prospection électrique se fait selon le dispositif de Schlumberger, avec lequel les sondages sont effectués en ligne AB = 2000m, MN_{max} = 220m. Ayant une banque de données des sondages réalisés surtout pour les zones non couvertes par la 1^{ère} campagne on a pu exploiter les résultats afin de reconstruire la géométrie des aquifères existants dans la région et la détermination des paramètres hydrodynamiques tels que la perméabilité (K) et la transmissivité (T).

Chaque S.E.V est caractérisée par un nombre d'information tel que le nom du propriétaire, le lieu (les coordonnées Lambert), l'orientation, la résistivité apparente des différentes formations géologiques traversées et les coupes géo- électrique probables .

Le but des S.E.V effectuées est purement hydrogéologique et la prospection dans le cas de la présence d'un terrain résistant aquifère, donner une profondeur de ce dernier et celle du forage au débit optimum. L'interprétation des S.E.V nous a donnée la profondeur de différentes formations géologiques rencontrées, avec la résistivité apparente calculée .la répartition des S.E.V sur l'ensemble de la région étudiée a permis d'avoir la carte de position des S.E.V Fig. N° 42.

75 SEV ont été choisie en fonction de leur position dans le terrain,

L'interprétation des données géophysiques et la corrélation avec la géologie a permis de relever les informations concernant les horizons géo-électriques recoupent les formations lithologiques rencontrées par les forages. Fig 43

L'interprétation a mis en évidences les aquifères suivantes :

L'aquifères du Mio- plio-quaternaire se trouvant dans

- Les argiles sableuse.
- Les calcaires lacustres.

L'aquifères de la nappe de Djemila se trouve dans les formations carbonatés.

L'aquifère l'ensemble allochtone Sud Sétifiens se trouve dans les formations carbonatés.

L'analyse des données des forages et les SEV de calage ont permis d'attribuer à chaque formation une fourchette de résistivité ainsi ;

- Les argiles sableuses sont caractérisées par une résistivité de 20 ohm.m
- Les calcaires lacustres sont caractérisés par une résistivité allant de 30 à 70 ohm.m
- Les argiles et les argiles gypseuses sont caractérisées par une résistivité allant de (5 à 12) ohm.m
- Les calcaires à silex sont caractérisés par une résistivité allant de 150 ohm.m
- Les marneux calcaires du Maestrichtien sont caractérisés par une résistivité allant de 80 ohm.m
- Les calcaires du Cénomanien sont caractérisés par une résistivité allant de 200 ohm.m

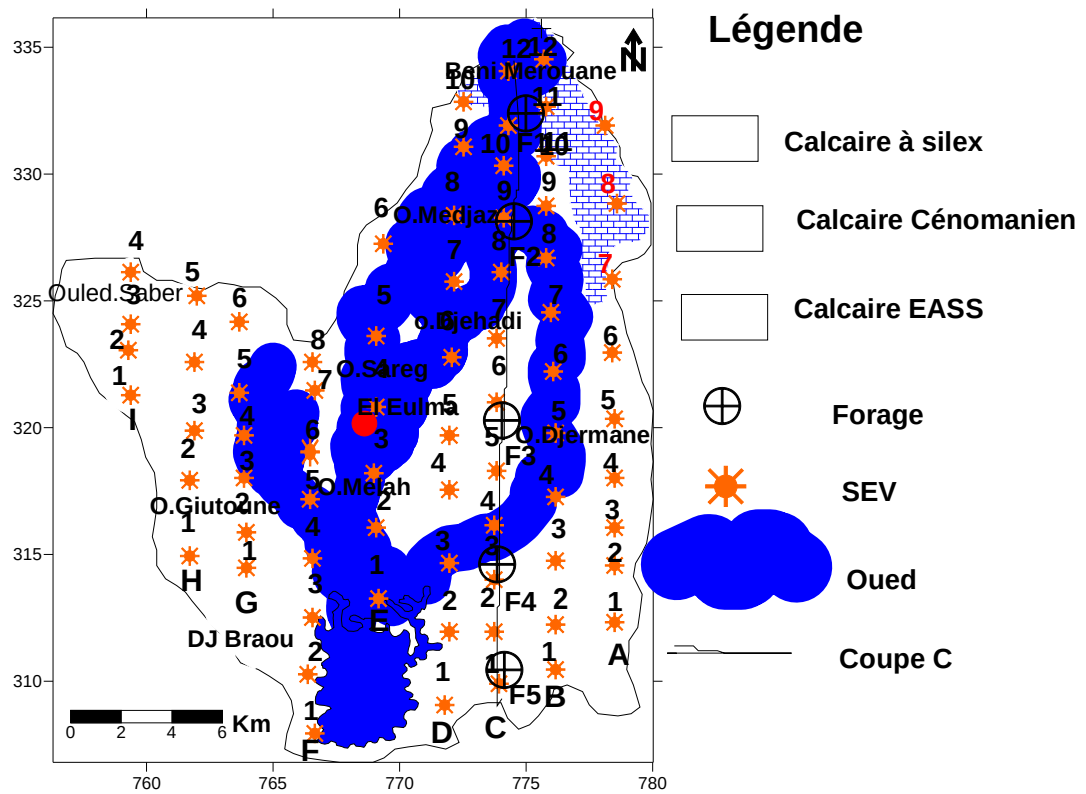


Fig N°42 Carte d'implantation des SEV

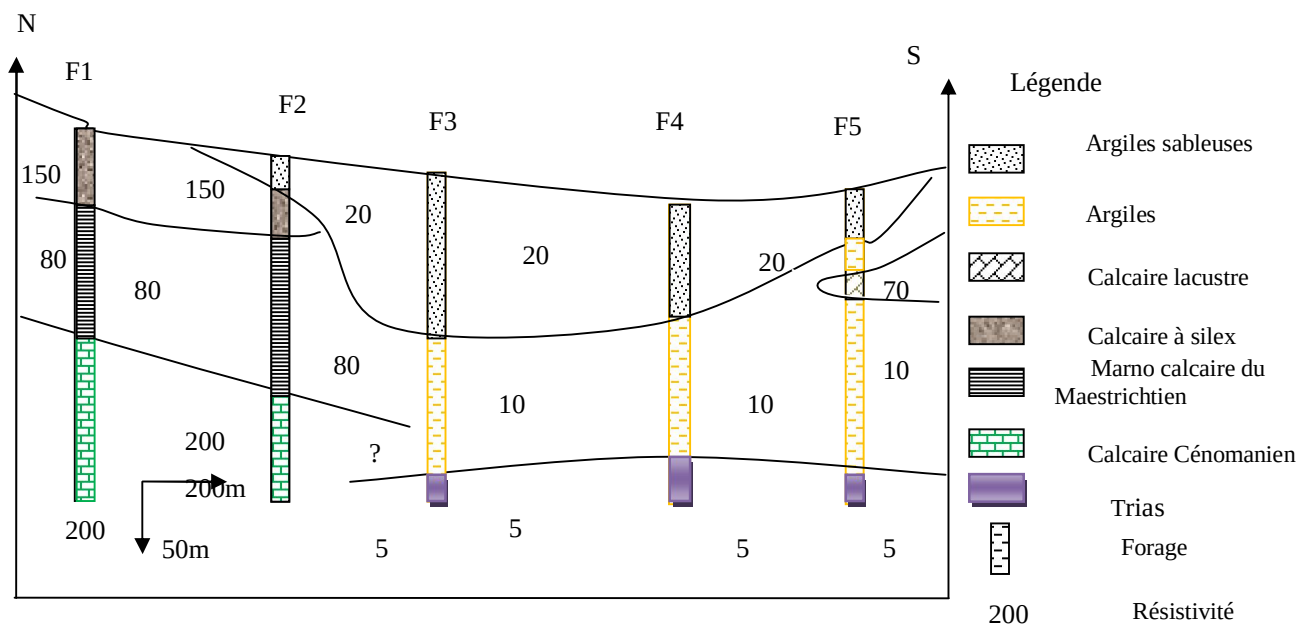


Fig N°43 Coupe géo électrique C avec les forages implantés dans la région

3- Cartes d'égales épaisseurs des différentes formations géologiques.

3-1 Carte d'égale épaisseur des argiles sableuses.

Les extensions des formations géologiques des argiles sableuses sont réparties sur l'ensemble de la région étudiée. Son épaisseur varie en moyenne de 25 m au Nord, 50 m au Sud à l'Est et à l'Ouest. Son intérêt hydrogéologique est faible à moyen. Fig. 44

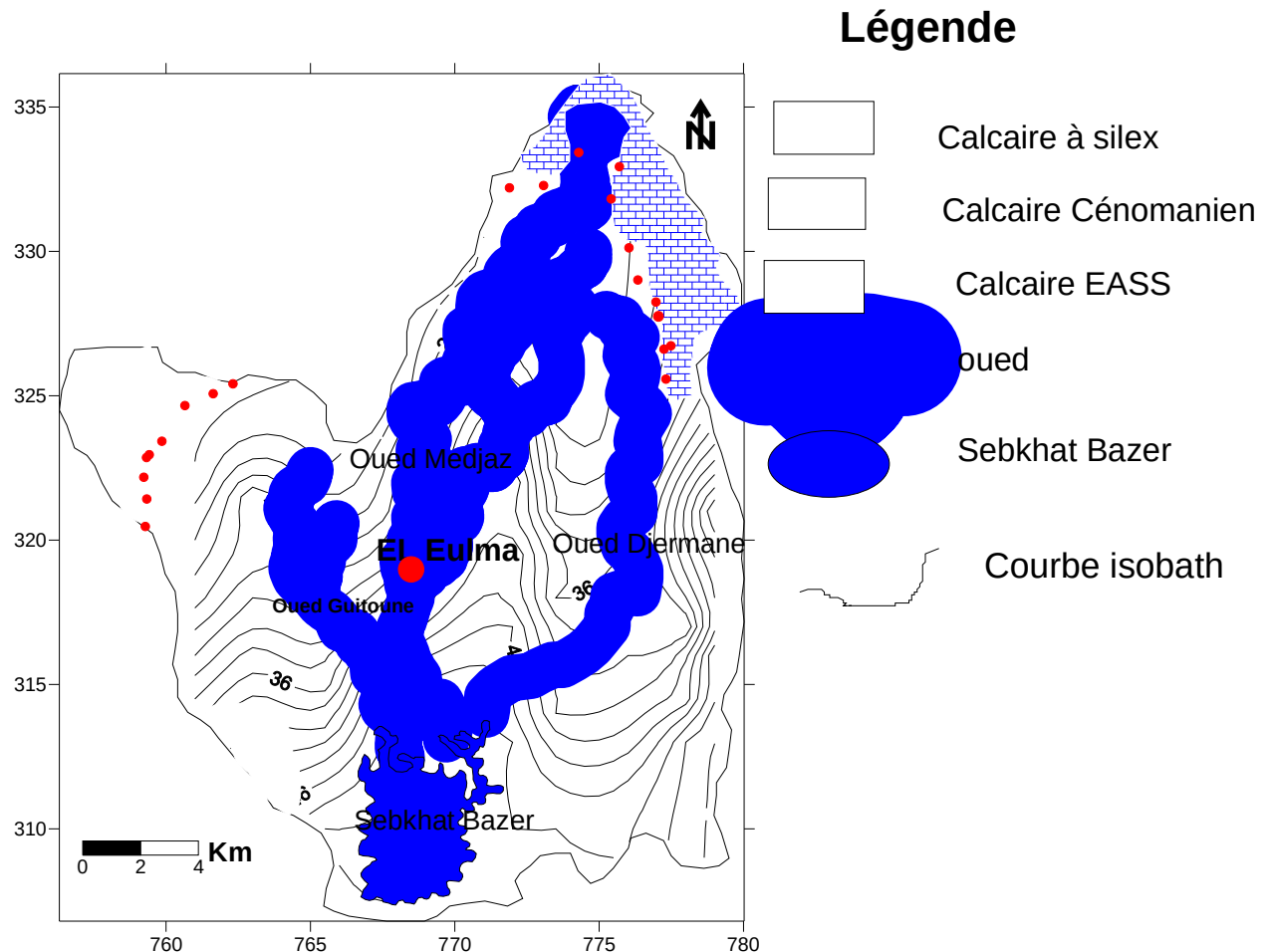


Fig N°44 Carte d'égales épaisseurs des argiles sableuses

3-2 Carte d'égale épaisseur du calcaire lacustre.

Deux zones favorables d'extension plus ou moins importante, la première localisée au Sud ouest avec une épaisseur de 45 m, à l'Est les calcaires lacustres sont absents. Ils sont développés au sud dans la plaine de Ain Lahdjar son intérêt hydrogéologique est moyen avec un débit des forages de 5 l/s. Fig. 45

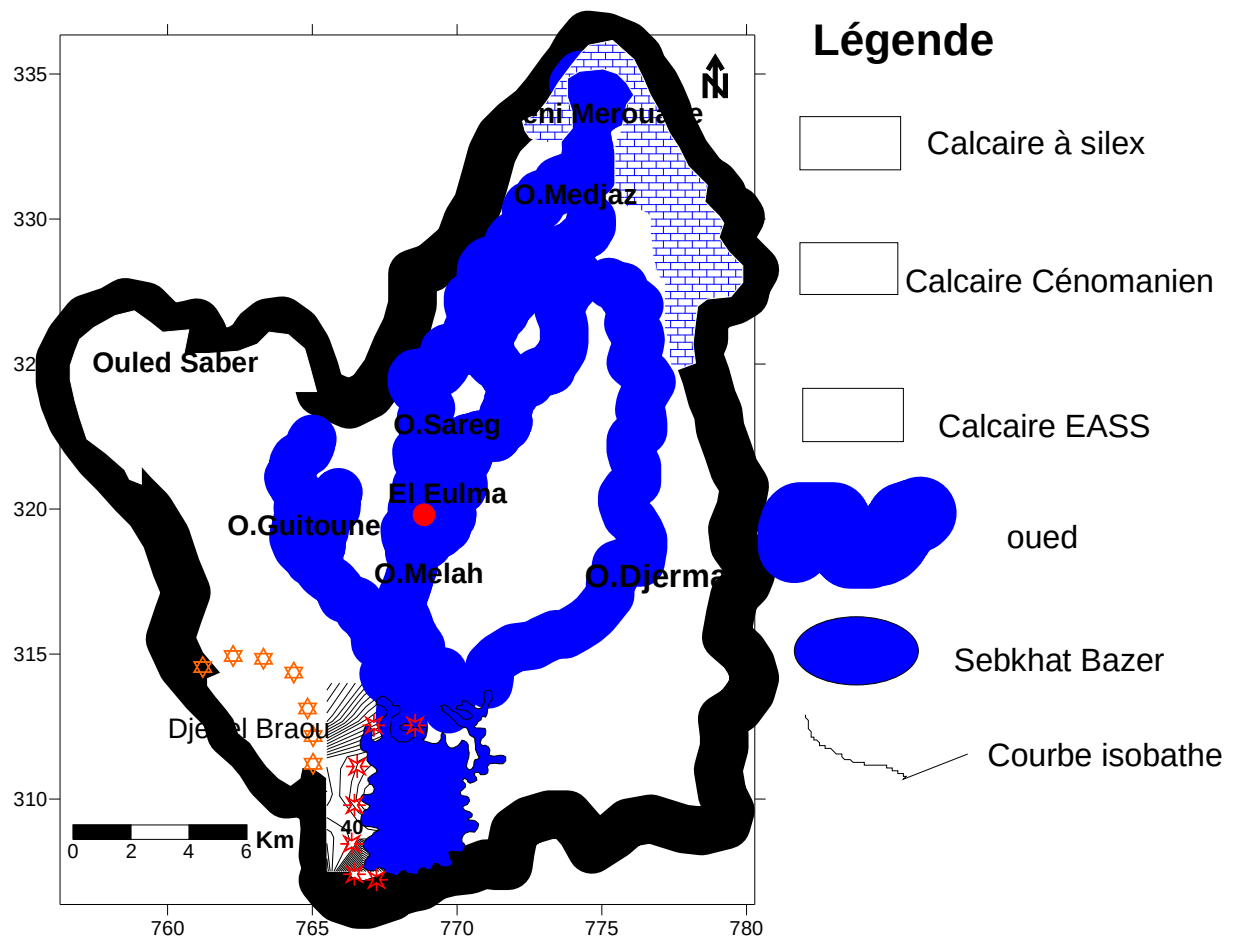


Fig. N °45 Carte d'égales épaisseurs des calcaires lacustres

4- Exploitation de la résistivité apparente pour la détermination des paramètres hydrodynamiques.

Plusieurs auteurs ont montré l'existence probable d'une corrélation entre la résistivité électrique apparente des formations géologiques et la perméabilité et plus particulièrement dans les alluvions, les sables argileux et les sédiments glaciaire. (Monjoie et al.1987), Haddouchi (1987), Neumann et al (1990), Ahmed et al (1988).

Les résultats trouvés sont comparées à ceux déduites des essais de pompage. Généralement le dispositif géophysique utilisé en prospection électrique est celui de **Schlumberger**.

4-1- Méthodes de corrélations perméabilité-résistivité (Dassargues .A 1992)

- ü A) Calcul de la corrélation entre $\log K$ et ρ_A par régression linéaire ou parabolique, et déduction directe des valeurs de la perméabilité K à partir des mesures de ρ_A .
- ü B) Krigeage des $\ln K$ sur base des seuls mesures de K par essais de pompage.
- ü C) Utilisation de la corrélation entre $(\log K)$ et (ρ_A) pour la déduction des valeurs de K et Krigeage des $\log K$ sur base de toutes les valeurs obtenues.

- ü D) Cokrigage des $\ln K$ en se servant d'un jeu de données secondaire constitué par les mesures de ρ_A la corrélation ($\ln K - \rho_A$) ou ($\log K - \rho_A$) n'est pas calculé.

On opte pour la première méthode, pour la détermination de la perméabilité parce que et son intervalle de variation à partir d'une résistivité parce que elle est basée sur la recherche d'une équation de la parabole de régression de $\log K$ sur ρ_A par les moindres carrés.

L'équation de la parabole est la suivante

$$\log K = a + b(\rho_A) + c(\rho_A)^2 \quad (1)$$

Dans ce cas les coefficients a, b, c ont été pris comme suit :

$$a = -4.797409$$

$$b = 0.02104219$$

$$c = -3.37441 \cdot 10^{-5}$$

Les coefficients a, b, c sont appliqués dans le cas où $\rho_A < 300 \text{ ohm/m}$

C'est le cas de notre terrain, que toutes les valeurs la résistivité apparente ne dépassent pas la valeur de 300 ohm /m

Donc l'équation (1) Peut s'écrire par

$$\log K = -4.797409 + 0.02104219(\rho_A) - 3.37441 \cdot 10^{-5}(\rho_A)^2$$

La corrélation perméabilité – résistivité a donné les résultats tableau 48

Tableau 48 calcul des perméabilités

Aquifère		Perméabilité	Aquifère		Perméabilité
Sables argileux N=35 SEV			Calcaire Lacustre N=5 SEV	min	6.67*10 ⁻⁵
				max	1.3*10 ⁻⁴
				moy	4.42*10 ⁻⁵
				Ecart type	3.21*10 ⁻⁵
	min	1.2*10 ⁻⁵	Calcaire à silex d'Yprésien N=5 SEV	min	0.12°10 ⁻⁴
	max	5.6*10 ⁻⁴		max	6.78°10 ⁻⁴
	moy	3.3*10 ⁻⁵		moy	4.12°10 ⁻⁴
	Ecart types	3.1*10 ⁻⁵		Ecart type	2.1°10 ⁻⁴
Marno calcaire du maestrichtien N= 20 SEV	min	1.2*10 ⁻⁵	Calcaire Du Cénomancien N= 5 SEV	min	4.3*10 ⁻³
	max	7.6*10 ⁻⁵		max	6.8*10 ⁻²
	moy	3.2*10 ⁻⁵		moy	3.6*10 ⁻²
	Ecart type	2.23°10 ⁻⁵		Ecart Type	2.7*10 ⁻²
Calcaire Jurassique de E.A.S.S N = 5 SEV	min		2.34*10 ⁻²		
	max		22.1*1 ⁻²		
	moy		8.34*10 ⁻²		
	Ecart type		3.12*10 ⁻²		

N = Le nombre de sondage électrique vertical SEV

En fonction des résultats trouvés on a établie la carte de répartition de la perméabilité dans l'ensemble de la région d'El Eulma qui varie $2 \cdot 10^{-2}$ m/s dans les alluvions et le calcaire de l'ensemble allochtone Sud Sétifien jusqu'à $1.2 \cdot 10^{-5}$ des formations des argiles sableux et les marno calcaires du maestrichtien

La perméabilité la plus élevée se localise dans le nord de la région tant que les zones les moins perméables se trouvent dans le sud de la région à l'exception des formations carbonatées qui ont une perméabilité assez importante localisée dans la zone Nord et à Est Fig 46.

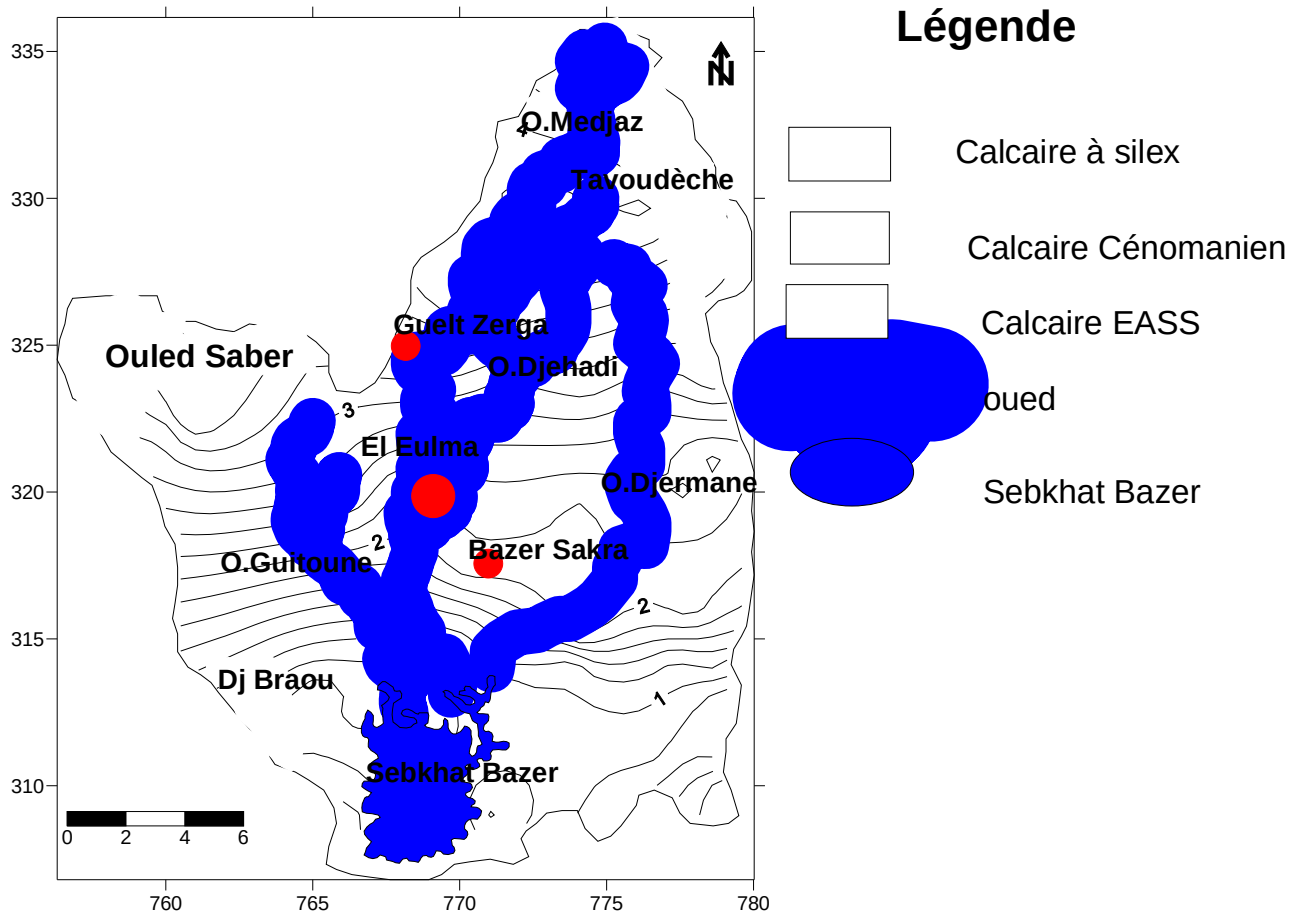


Fig. N°46 Carte de répartition de la perméabilité de l'aquifère superficiel dans la région d'EL Eulma (10^{-4} m/s.)

5- Résistivité des différentes formations géologiques (CGG 1972).

La Prospection géophysique menée par la CGG 72 a donnée les résistivités des différentes formations géologiques qui varie selon la nature lithologique des roches et l'âge des différentes formations géologiques . Tableau 49

Tableau 49 résistivité des formations géologiques par CGG 72

Système		Formations géologiques	Résistivités Ohm.m
Pliocène		Cailloutis	15 - 50
		Croute	50- 100
		Limons	10
Miocène		Marnes	10
		Grés et Conglomérats	100
Éocène		Calcaires à Silex	100 - 150
		Marnes	10
Crétacé Supérieure	Turonien	Calcaire	100-200
	Cénomanién	Marne et Calcaire	6- 10-100
Crétacé inférieur	Aptien	Dolomie	200 - 500
	Barrémien	Calcaire	100 - 200
	Hauterivien	Marnes	10
Jurassique	Lias	Calcaire Jurassique	200
Trias		Formations salés	0.5 - 3

6-Conclusion

Les caractéristiques géo électriques des différentes formations géologiques aquifères ont permis de voir que :

- L'aquifère superficiel du Mio-Plio-Quaternaire a une forte extension latérale et une épaisseur qui peut atteindre 50 m.
- L'aquifère des calcaires lacustres du Villafranchien est très limité dans l'espace et on ne le retrouve que dans l'extrême sud du bassin versant son épaisseur moyenne est de l'ordre de 75 .
- L'aquifère de l'ensemble allochtone Sud Sétifien est localisée au Sud avec une extension latérale limitée
- L'aquifère de la nappe de Djemila est localisé sur la limité Nord du bassin versant avec des épaisseurs variables qui peut atteindre les 200 m
- Il faut noter que ces deux aquifères sont en liaison avec les deux premières aquifères et constituent ainsi une limite à flux imposé

Hydrogéologie

1)-Introduction :

Le système aquifère de la région d'El Eulma appartient au grand complexe des dépressions fermées d'El Eulma dont la superficie est de 1500 Km². La structure est caractérisée par un empilement d'aquifères de formations géologiques diversifiées et complexes.

2) Structure géologique et hydrogéologie :

La structure géologique de la région est caractérisée par la présence de trois grandes unités. Au nord la nappe de Djemila, au Sud l'ensemble allochtone Sud Sétifien et au centre le Mio-Plio-quadernaire. (Villa 1977).

De cette structure géologique résulte un système aquifère à couches multiples :

2-1La nappe de Djemila

Du haut en bas en a :

2-1-1 L'aquifère des calcaires à silex de l'Yprésien.

Très perméable cette aquifère est limitée au Nord par l'unité supérieure à matérielle Eocène et au Sud elle est en position de discordance par rapport aux formations géologique du Mio –Plio – Quadernaire .L'épaisseur elle varie de 50 m à 150 m .le débit des forages est de 30l/s.

2-1-2 L'aquifère des marno –calcaires schisteux du Maestrichtien.

Cette aquifère est limitée au Nord par les calcaires du cénonanien, à l'Est par l'unité supérieure à matériel Eocène , au sud elle est en contact avec les Calcaires à silex de l'yprésien et elle est en discordance avec le Mio –Plio –Quadernaire . L'épaisseur est de 200 m et le débit des forages varie entre 5l/s et 15l/s.

2-1-3 L'aquifère des calcaires du Cénonanien.

Il est caractérisé par des calcaires massifs qui constituent le cœur de la nappe de Djemila .Les calcaires sont de couleur blanchâtre et karstifiés dans la région de Tachouda et Ouled Saber .Cette aquifère laisse apparaitre trois grandes sources (Ain Makhoulf ,Aim Boudiaf , Ain Zouaoui le débit partiel de chaque source 40 l/s .

2-2 Le Mio –plio-quadernaire.

2-2- 1 La nappe des argiles sableuses .

C'est une nappe qui s'étend sur l'ensemble de la région, limitée au Nord par les formations carbonatées de la nappe de Djemila, au Sud par l'ensemble allochtones Sud Sétifien .La lithologie est caractérisée par les sables argileux, son épaisseur varie entre (15 – 50) m exploitée par un nombre très important de puits, le débit varie entre (2 à5)l/s elle est libre sur toute son étendu. Tableau 50

2-2-3 La nappe des calcaires lacustres

L'étude lithostratigraphique et géophysique de la région des hautes plaines Sétifiennes par (Pr Boudoukha 1998) a montré que la nappe des calcaires lacustres est discontinue sous forme de lambeau à travers la région. Elle est localisée dans les régions de Ain Lahdjar, Ras Elma et Guellal. Dans la région d'El Eulma elle est localisée dans le sud et très développée à l'Est. Lithologiquement les calcaires lacustres sont de couleurs beige ou brune, renfermant des cavernes typiques du milieu lacustre. Actuellement cette nappe constitue un réservoir important pour la région vu le nombre important de forages réalisés pour le développement de l'agriculture. La profondeur varie entre (80 à 200) m le débit est de l'ordre de 5l/s. Tableau 50

2-3 Ensemble allochtones Sud Sétifien (EASS).

C'est un aquifère à caractère régional, carbonaté et constitue un potentiel en eau non négligeable dans les hautes plaines sétifiennes. La profondeur moyenne des forages est de 200 m dans Djebel Braou, Youcef, Sekrine, Hammam, Hamouda, Guergour et Anini. Ces formations sont caractérisées par une fissuration variable avec la présence de trois grandes familles de fissures : celle de direction N 0° à N 20°E affectant les massifs de Dj Youcef, Tella, Guedmane, La famille de direction N 60° à N 120°E affectant les massifs de Dj Guergour, Della, Braou, Sekrine, Kalaouan, Agmeroual, Zana, Mestaoua, Guedmane et Hamouda. La troisième famille ayant une direction N 140° à N 180°E affectant les massifs de Dj Zdim, l'écaille de Ain Lahdjar, Dj Messaouda, Hammouda, Tnoutit et les Azraouat donc on peut constater que certains massifs ont deux familles de directions. Cette fracturation a une faible influence sur les débits de forages, on peut dire que le pendage des couches est déterminant pour la constitution des réserves importantes cas de Dj Tnoutit, Youcef et Braou. La région d'El Eulma est caractérisée par la présence de la nappe dans Dj Braoui et plus à l'Est Dj Tnoutit. Tableau 50.

Tableau 50 Types d'aquifères

Unités géologiques	Formations	Aquifères
Nappe de Djemila	Calcaire à silex d'Yprésien	Libre au Nord et captive au Sud
	Marno – Calcaire du Maestrichtien	libre au Nord et Captif au Sud
	Calcaire du céno manien	Captif
Mio – Plio-Quaternaire	Sables argileux	Libre
	Calcaire lacustre	Captif
Ensemble allochtone Sud Sétifien	Calcaire jurassique	Karstique

3) Géométrie du système aquifère :

L'analyse des coupes et la description des différents forages et puits a permis de tracer une coupe hydrogéologique schématisée. Cette coupe montre la présence de discontinuité dans les différentes formations géologiques, induisant un système aquifère multiple dans la région. Fig 47

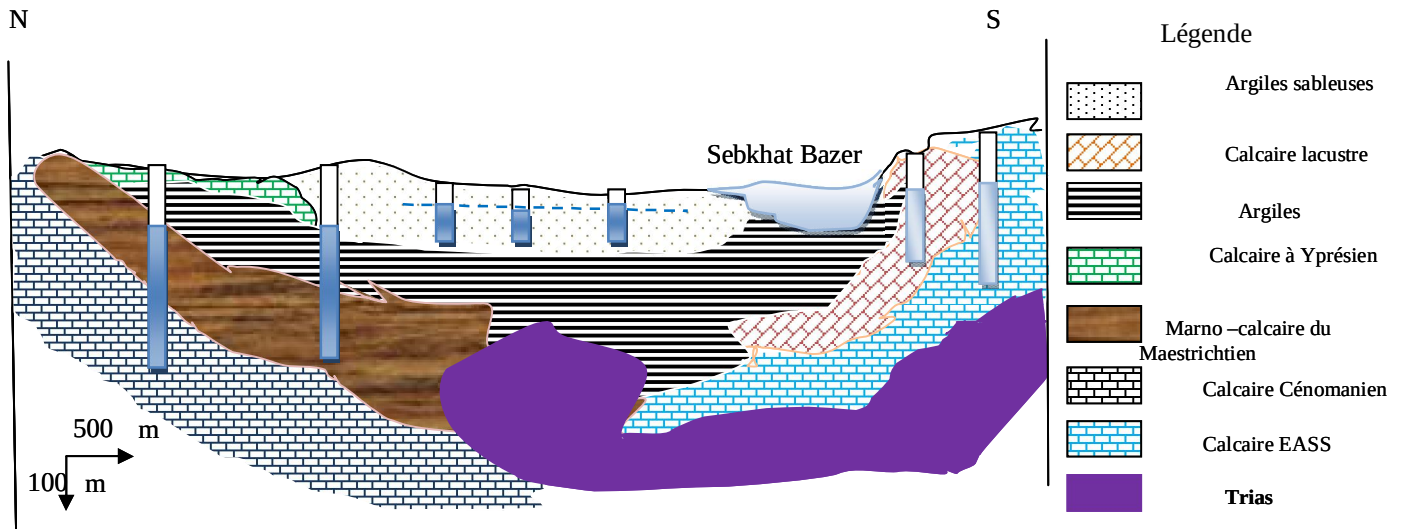


Fig. N°47 Coupe Hydrogéologique Synthétique

5 Conditions aux limites.

Afin de comprendre le fonctionnement hydraulique, on examine les conditions aux limites du système aquifères et les relations qui existent entre les différentes nappes.

4-1 L'aquifère des argiles sableuses

Elle a un flux de nappe des formations carbonates de la nappe de Djemila au nord et au sud ouest le flux de nappe de l'ensemble allochtone sud Sétifien avec un potentiel imposé de Sebkhat Bazer. A l'est et l'ouest la limite de partage des eaux. Fig 48

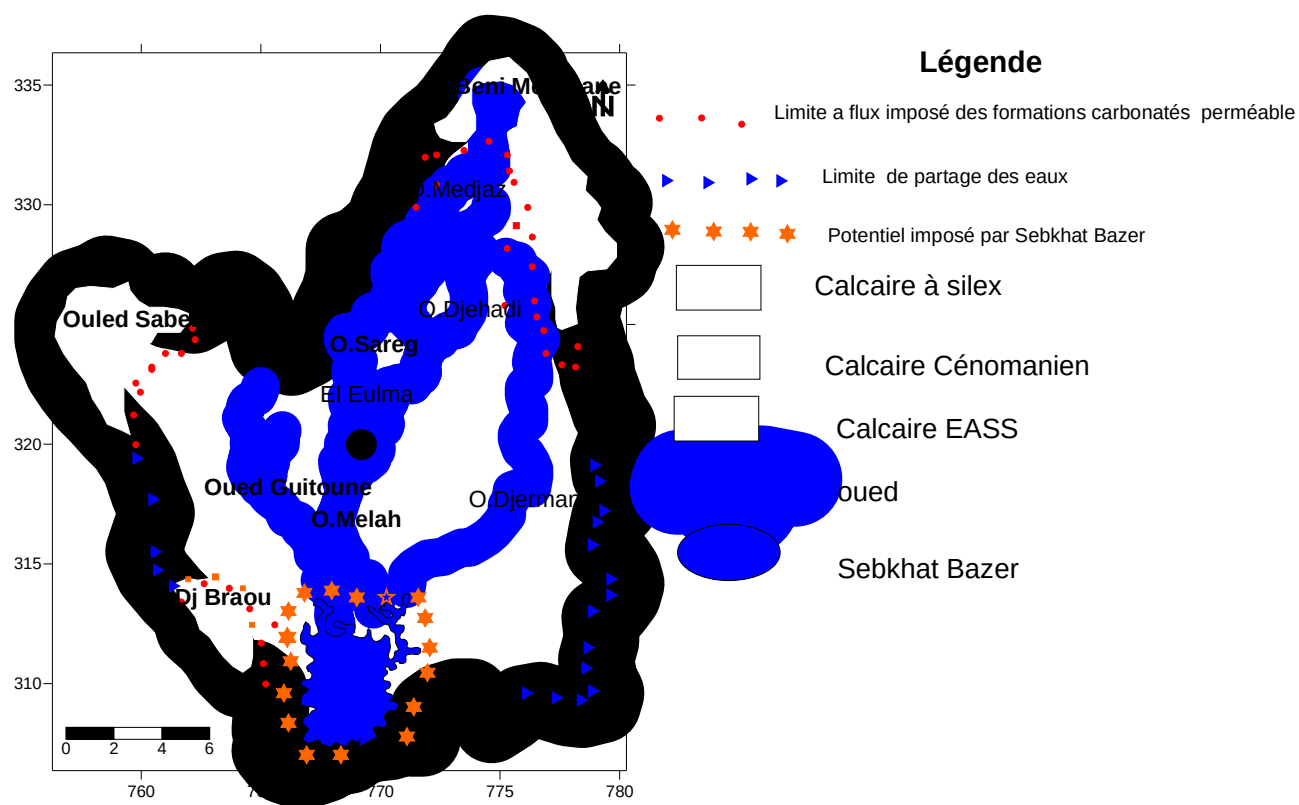


Fig N°48 conditions aux limites du système aquifère des argiles sableuses

4-2 L'aquifère des calcaires lacustre.

L'aquifère des calcaires lacustre a une limite de flux imposé par les formations carbonatées de l'ensemble allochtone sud sétifien au Sud Ouest et le potentiel imposé de Sebkhath Bazer . Fig 49

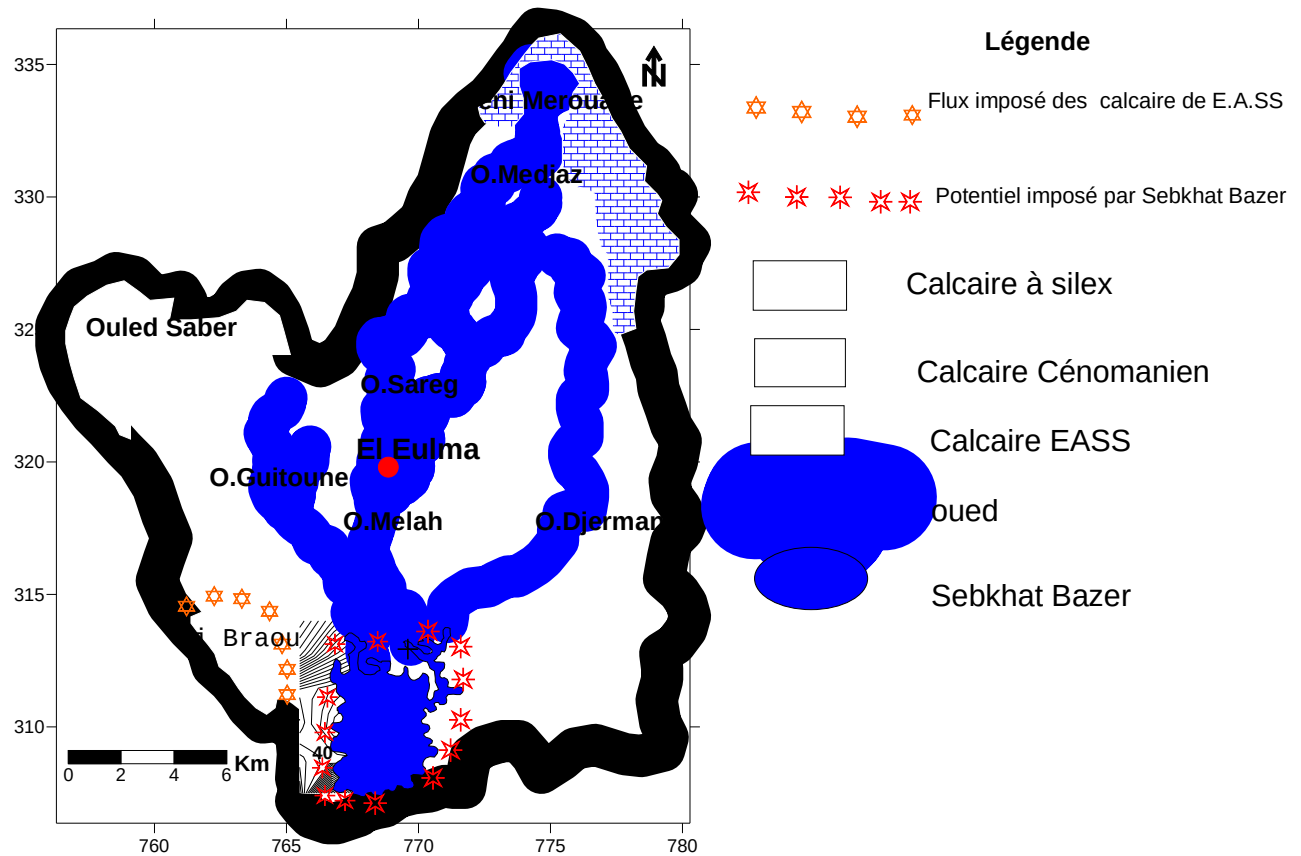


Fig N ° 49 Conditions aux limites des calcaires lacustres .

4) Paramètres hydrodynamiques.

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les paramètres hydrodynamiques dans la région à l'aide des essais de pompages, (Boudoukha 1988, 1998, Demdoum 1996, Khemmoudj 2002 et 2006). Tableau 51

Tableau 51 Paramètres hydrodynamiques moyenne des aquifères : Argiles sableux, calcaires lacustres, calcaires de l'yprésien et Calcaires de E.A.SS

Types d'aquifères	Perméabilité m/s	Transmissivité m ² /s
Argiles Sableuses	$5.2 \cdot 10^{-4}$	$8.2 \cdot 10^{-4}$
Calcaire lacustre	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$6.2 \cdot 10^{-4}$
Calcaire Yprésien	$5.8 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$
Calcaire EASS	$7.23 \cdot 10^{-2}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$

5-1 Carte des perméabilités

La perméabilité dans la région d'El Eulma varie d'une formation à une autre. Pour la l'aquifère superficiel on a trois zones distinctes. Fig 50

La zone des perméabilités qui varient entre $(4.5 \cdot 10^{-4}$ à $5.2 \cdot 10^{-4})$ m/s localisé dans le Nord .

La zone des perméabilités qui varie entre $(2.2 \cdot 10^{-4}$ à $3.2 \cdot 10^{-4})$ m/s au centre.

La zone des perméabilités qui varient entre $(0.5 \cdot 10^{-4}$ à $1.2 \cdot 10^{-4})$ m/s au Sud .

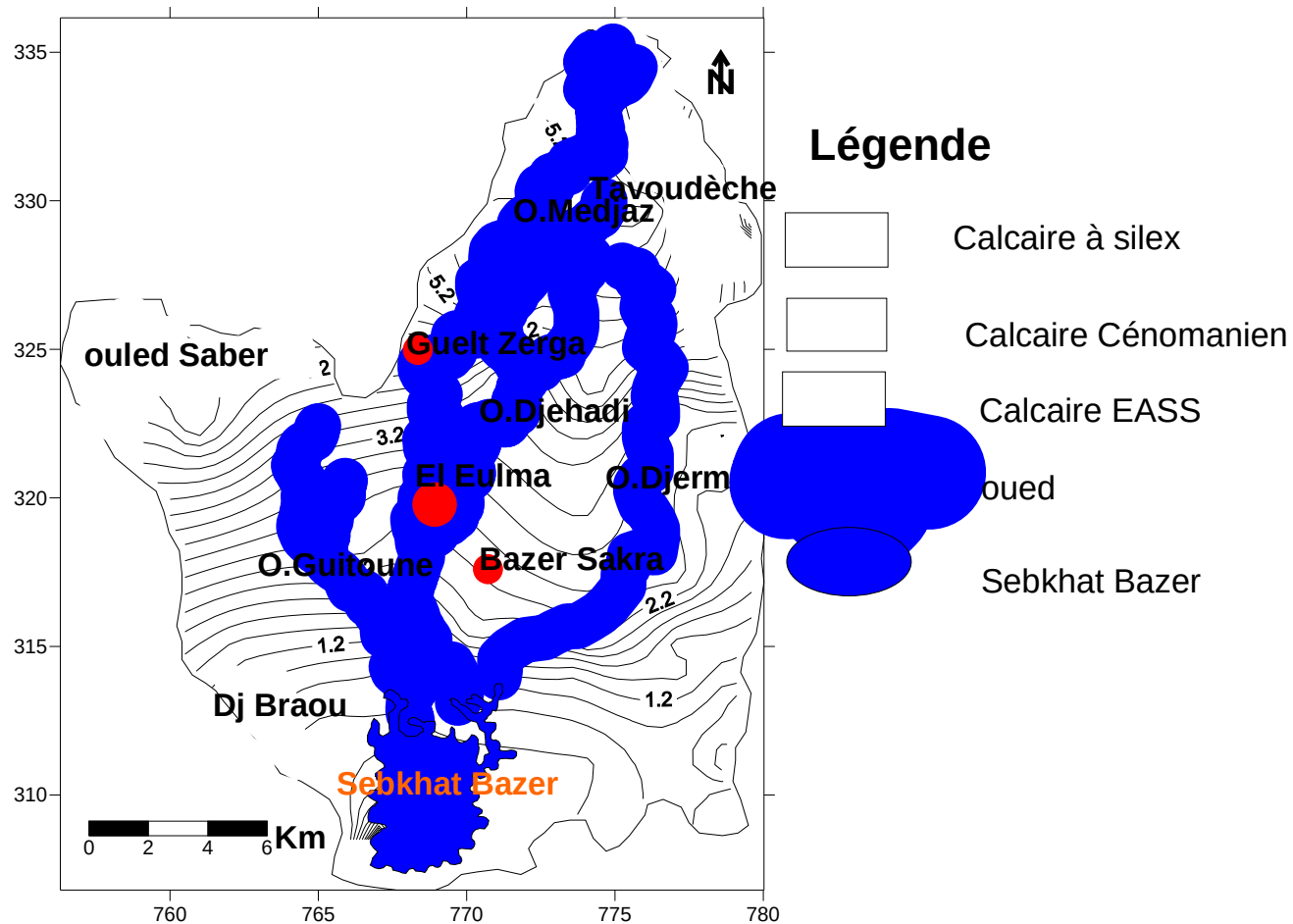


Fig. N °50 Carte des Perméabilités en 10^{-4} (m/s)

5-2 Carte des Transmissivités : Fig 51

La zone nord a des transmissivités varient entre $(5.5. 10^{-4} \text{ à } 6.510^{-4}) \text{ m}^2/\text{s}$.

La zone du centre à des transmissivités varie entre $(3.5.10^{-4} \text{ à } 5.5.10^{-4}) \text{ m}^2/\text{s}$.

La zone du Sud à des transmissivités varie entre $(1.5.10^{-4} \text{ à } 3.5.10^{-4}) \text{ m}^2/\text{s}$.

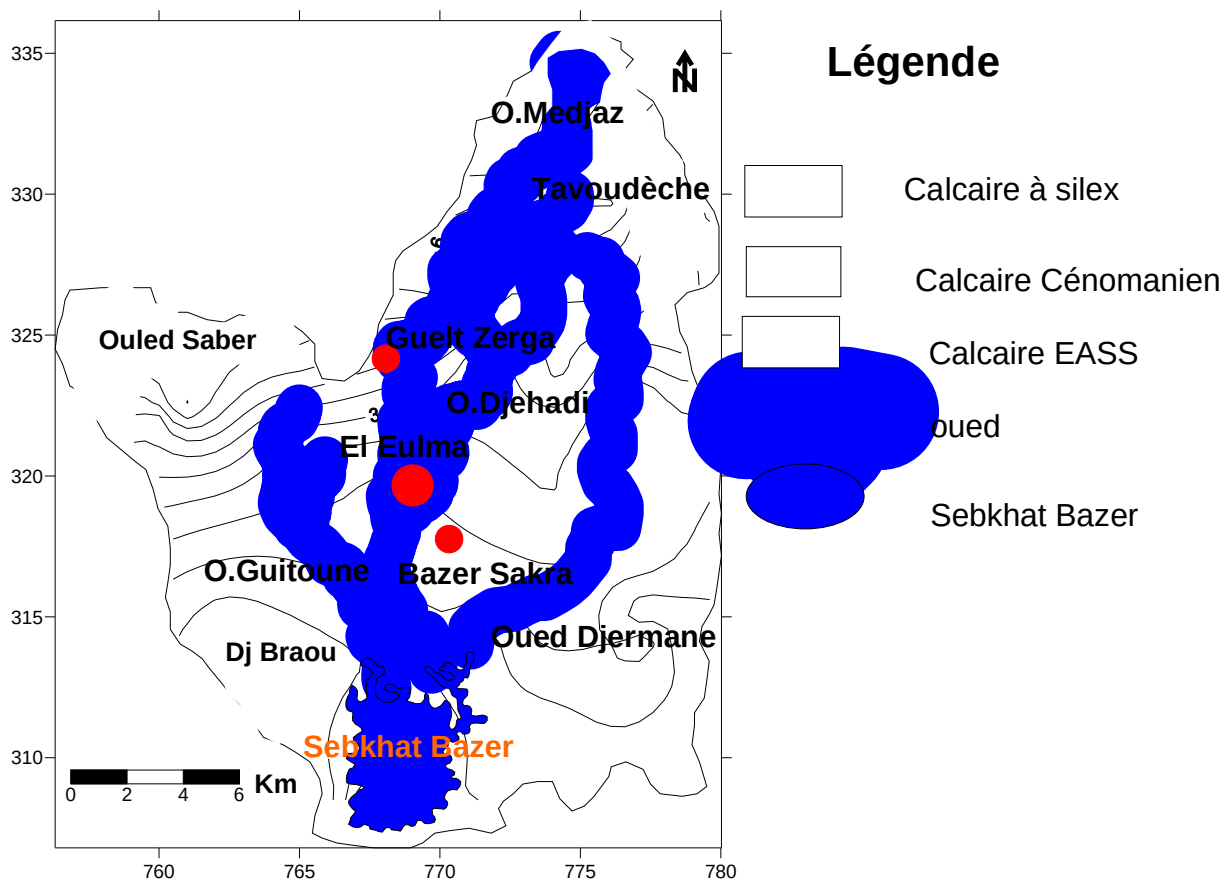


Fig. N° 51 Carte des Transmissivités en $10^{-4} (\text{m}^2/\text{s})$

6 Piézométrie .

6-1 Inventaire des points d'eau

La surexploitation de la nappe superficielle pousse les habitants et particulièrement les fellahs à chercher l'eau en utilisant des moyens de forages et les techniques de prospections géophysiques. Ceci a favorisé l'accroissement du nombre des puits et forages au cours du temps. Tableau 52 et 53

Tableau 52 : Evolution du nombre des points d'eau de la région d'El Eulma

Unités géologiques	Aquifère	Sources	puits			Forages			Profondeur m
			1986	2002	2006	1986	2002	2006	
Mio- Plio-Quaternaire	Sables argileux	Ain Menasria Ain Touila Ain Beida Ain Beggag Ain Berda	2325	1917 0	35591	0	0	0	2-45
	Calcaire lacustre		0	0	0	0	15	150	75-165
Nappe de Djemila	Calcaire d'Yprésien	Ain Sidi Messaoud	10	25	40	2	20	120	12-150
	Marno- calcaire du maestrichtien		40	60	60	2	35	95	4-200
	Calcaire Cénomanién	Ain Zouaoui Ain Makhoulouf Ain Boudiaf	0	0	0	3	14	85	85-300
Ensemble allochtone Sud Sétifien	Calcaire du Jurassique		0	0	0	3	8	20	85-300

Tableau 53 Forage du secteur étatique

Sous bassin	Dénomination	Localisation	Aquifère	Commune	Wilaya	Coordonnées m			Débit exploité l/s	Profondeur	Destination
						X	Y	Z			
0701	Dj.Braou Bis	Dj.Braou	EASS	Bazer Sakra	Sétif	763550	311200	965	20	73	AEP
0701	Dj.Braou	Dj Braou	EASS	Bazer Sakra	Sétif	763600	311500	970	6	200	AEP
0701	Bazer	Dj.Braou	EASS	Bazer Sakra	Sétif	762700	310900	950	25	150	AEP
0701	EU 2B	El Eulma	Calcaire Yprésien	El Eulma	Sétif	771500	321450	985	17.1	202	ZIE
0701	EU 2B bis	El Eulma	Calcaire Yprésien	El Eulma	Sétif	771500	321450	985	6	200	AEP
0701	Khanga	Khanga		Ouled Saber	Sétif	758800	322450	1020	10	100	AEP
0701	Guelte Zerga	Sidi Salah		Guelte Zerga	Sétif	760400	32200	1060	6	150	AEP

6-2 Evolution de la piézométrie.

Etude de l'évolution de la piézométrie dans l'espace et le temps permet de comprendre les mécanismes qui régissent l'écoulement des hydrosystèmes .Ceci peut se faire à l'aide du suivi du niveau piézométrique au cours des variations climatiques à l'aide des cartes piézométriques à différentes périodes .

6-2-1 Piézométrie de la nappe superficielle des argiles sableuses .

La direction et le sens d'écoulement des eaux souterraines présentent une analogie avec les eaux de surface .l'ensemble convergent vers Sebkhath Bazer .Les isopièzes sont espacés au Nord et au centre avec un gradient hydraulique faible qui varie entre 0.002 et 0.004 .Au Sud l'écoulement se fait du sud vers le nord due au flux des formations carbonatées de ensemble allochtone Sud Sétifien.Les isopièzes sont très rapprochées avec un gradient hydraulique qui varie entre 0.028 et 0.056. a l'approximait de Sebkhath Bazer se forme cône de dépression explique une convergence locale.

6-2-2 Evolution de la piézométrie entre 1974 et 1985.

L'étude piézométrique de ce système aquifère a été réalisée pour la première fois 1974 et qui a montré que le niveau d'eau dans les puits en 1985 a montré que le niveau d'eau dans les puits a baissé de 10 mètres entre cette date et 1985 .Cette baisse est due à l'accroissement du nombre de puits.

6-2-3 Evolution de la piézométrie entre 1985 et 2001.

Depuis 1985 le niveau piézométrique n'a fait que baisser et on a pu enregistrer jusqu'a plus de 10 m de battement .Cet état a provoqué une inversion de l'écoulement à l'aval au niveau de la sebkhat d Le battement moyen de la nappe est de l'ordre de 5 m, Cette fluctuation est due a une grande exploitation de l'eau en plus augmentation progressive des puits pour le développement de l'agriculture .Fig. 52

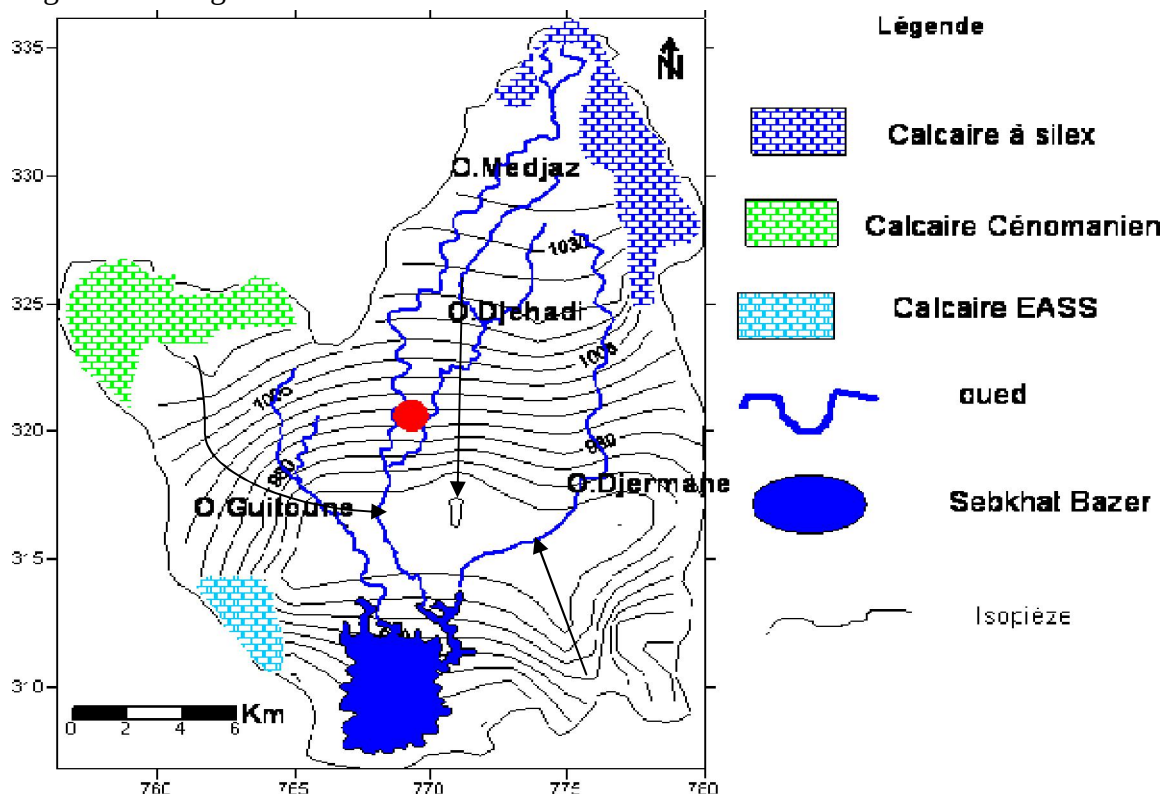


Fig N° 52 Carte piézométrique basses eaux de la nappe superficielle du Mio –Plio-Quaternaire Aout 2001

6-2-4 Piézométrie 2006.

Deux campagnes piézométriques ont été effectuées pendant celles des hautes eaux allant du 15 mars au 15 avril 2006 et la deuxième et celle des basses eaux allant du 15 juillet au 15 Aout 2006. Ces deux campagnes ont montré que la nappe a conservée la même structure piézométrique .On assiste à une inversion de l'écoulement dans la partie Sud avec une avancé du biseau salée à partir du lac salé .Boudoukha 1988 et Boudoukha et khemmoudj 2006 Fig 53 et 54

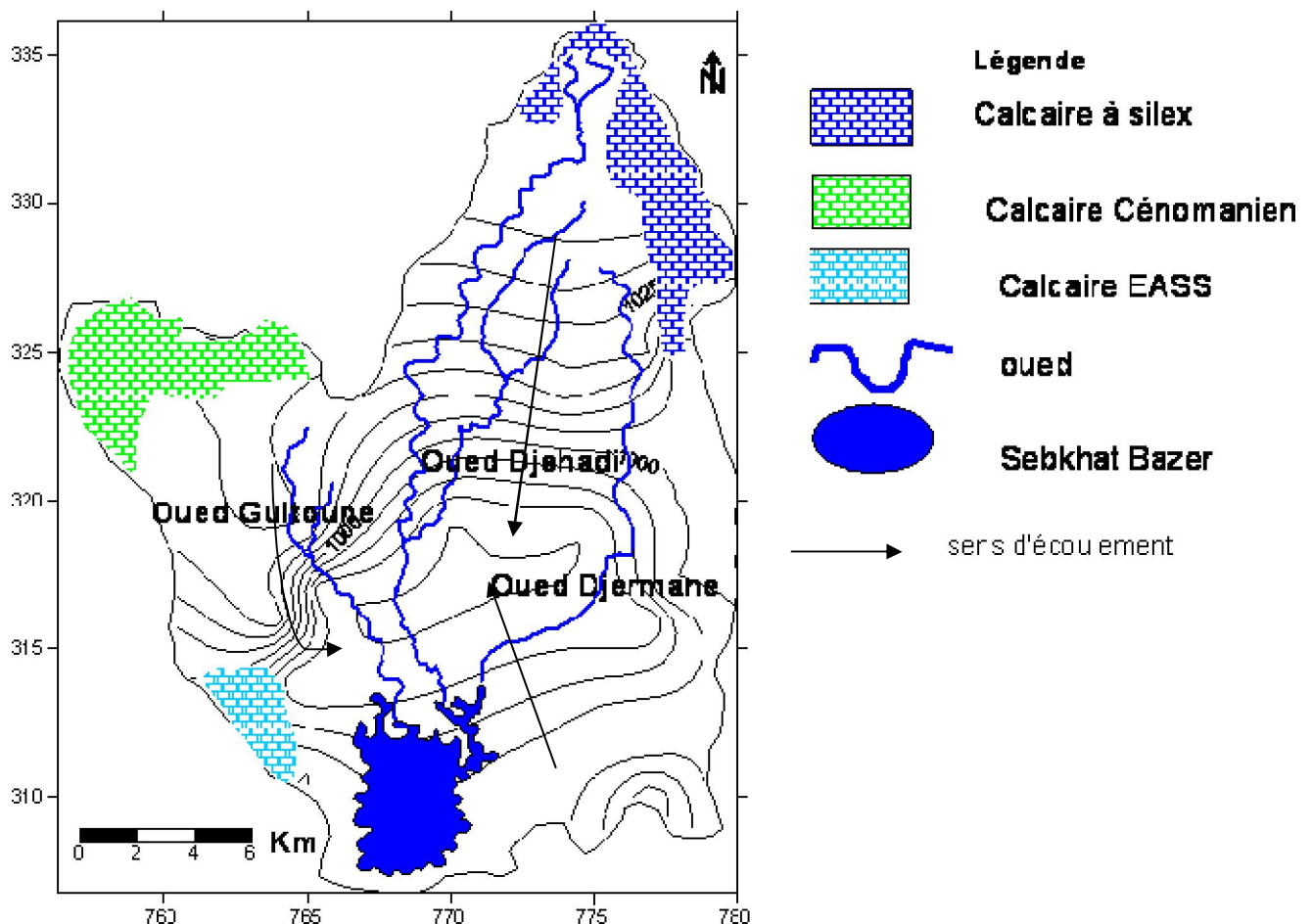


Fig. N°53 Carte piézométrique Basses eaux nappe superficielle des argiles sableuses

Mio-Plio-Quaternaire 2006

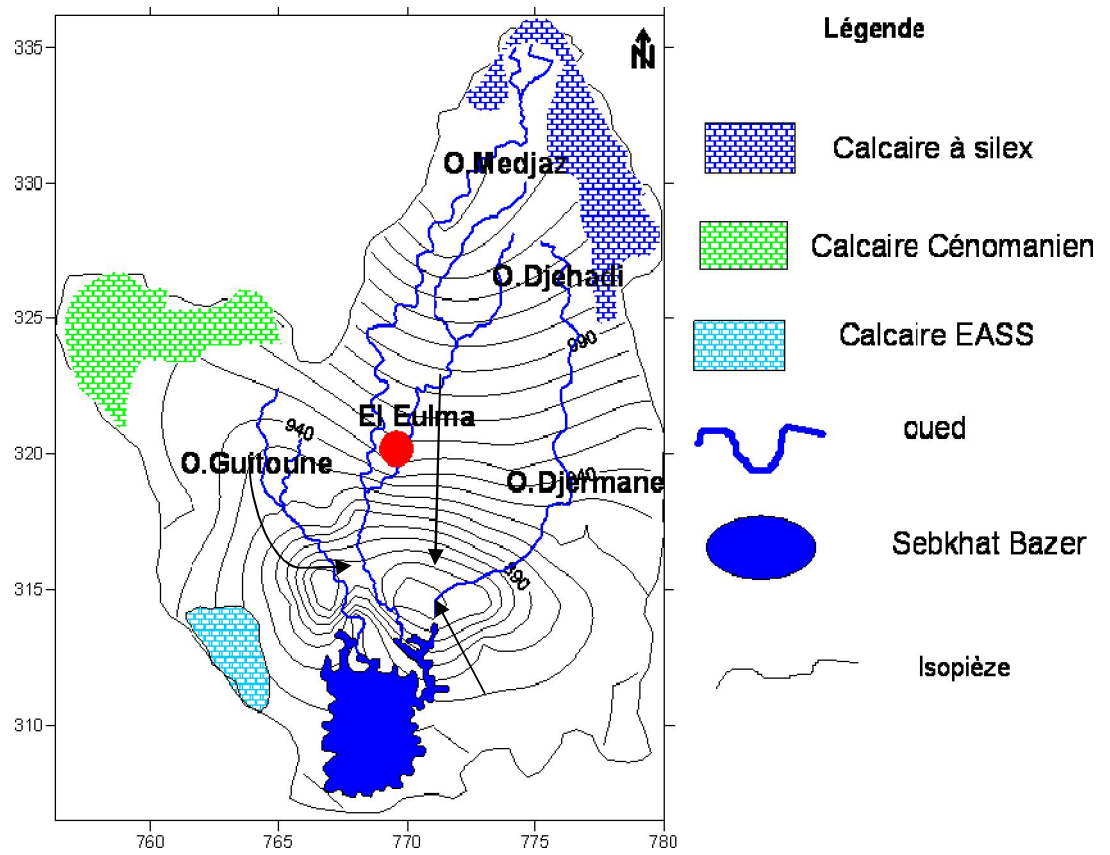


Fig. N°54 Carte piézométriques hautes eaux nappe superficielle des argiles sableuses
Mio-Plio-Quaternaire 2006

7 Conclusion

Le système aquifère de la région d'El Eulma est constitué par deux nappes, la première est celle des argiles sableuses dont la profondeur varie entre 2 m et 54 m . Cette aquifère est la plus sollicitée avec un nombre de puits qui évolue rapidement au cours du temps. L'alimentation se fait par les précipitations et les formations des massifs carbonatés de la nappe de Djemila au Nord et l'ensemble allochtone Sud Sétifien au Sud .Le sens d'écoulement se fait du Nord vers le Sud . La deuxième nappe est celle des calcaires lacustres localisée au Sud avec une profondeur moyenne de 75 mètres constitue ainsi un réservoir important en eau souterraines.

Hydrochimie

1 Introduction :

L'étude de la qualité des eaux a été abordée au moyen de 100 échantillons répartis sur un cycle de quatre ans (2002 à 2006). Ces analyses ont concernés les eaux souterraines, les eaux de pluie et ceux de la neige dans la région d'El Eulma. Les prélèvements ont été effectués pendant deux périodes celle des basses eaux allant du 15 mars au 15 avril et celle des hautes eaux allant du 15 juillet au 15 août.

2 Répartition des échantillons.

Les échantillons analysés sont réparties comme suit : 60 % eaux des argiles sableux , 11% eaux des calcaires lacustres .27% eaux des formations carbonatés de la nappe de Djemila ,1% des eaux de sebkhat Bazer et 1% eaux des formations de l'ensemble allochtone sud sétifien 15 stations pour les eaux de pluies ,17 stations des eaux des oueds ,15 stations des eaux de neige et 10 stations des eaux usées , rejet industriel et eaux pluviales du bassin urbain de la ville d'El Eulma . Tableau 54.

Tableau 54 Répartition des points d'eau analysés.

Formation géologique	Aquifère	%	Puits	Forages	Sources
Moi -Plio - Quaternaire	Argiles sableux	60	55	00	05
	Calcaire lacustre	11	00	11	00
Nappe de Djemila	Calcaire Yprésien	07	00	05	02
	Marno Calcaire	14	00	14	01
	Calcaire du Cénomanien	06	00	03	03
Sebkha	Sebkhat Bazer	01	00	00	00
Ensemble Allochtone Sud Sétifien	Calcaire du Barrémien	01	00	01	00
Σ		100	55	34	11
Eau de pluie	15 Stations				
Eau de surface (oueds)	Suivit des paramètres physico chimiques et des éléments majeurs 17 stations				
Eau de neige	15 Stations				
Eaux usées, rejets industriel, eaux pluviales du bassin urbain				10 Stations	

L'étude physico chimique des eaux souterraines du bassin versant de la région d'El Eulma est basée sur deux campagnes d'échantillonnages effectuées en même temps que la piézométrie comme on l'a vu plus haut

3-Matériels et méthodes d'analyses :

Les analyses des différents échantillons ont été réalisées dans plusieurs laboratoires :

Le laboratoire de chimie et de contrôle de qualité de l'entreprise nationale des appareils de mesure et de contrôle (EN.AMC) El Eulma .

Le laboratoire de chimie et métallurgie de Entreprise national TREFISOUD El Eulma.

Le laboratoire de chimie et électrochimie EN ENPEC Sétif .

Le centre de recherche et développement (CRD) Sonatrach Boumerdes .

Le laboratoire de génie chimique Université de Constantine .

Les éléments analyses sont les suivants :

Les éléments majeurs (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} , NO_3^- , HCO_3^-)

Les éléments traces (Sr^{++} , Pb^{++} , Zn^{++} , Cu^{++} , Cr^{+++} , Ni^{++} , Cd^{++} , Fe^{++} , Mn^{++} ,)

Phénols, PO_4 , P_2O_5

L'appareillage utilisé : Absorption atomique SAA, Photomètre a microprocesseur MPM 1500, X-RAY Fluorescence spectromètre (XRF-1800 SHIMADZU)

Les paramètres physico chimique T, Cond, pH, Eh, O dissout ont été mesuré sur le terrain à l'aide d'un multi paramètres WTW 2000

4 Les sources de la région d'El Eulma .

Les mesures des paramètres physico chimique et les analyses hydrochimiques des anions et les cations des sources jaillissantes dans la région pour comprendre l'origine et la circulation des eaux souterraines et les échanges qui se déroulent entre les eaux et le milieu .Fig 55 et tableau 55

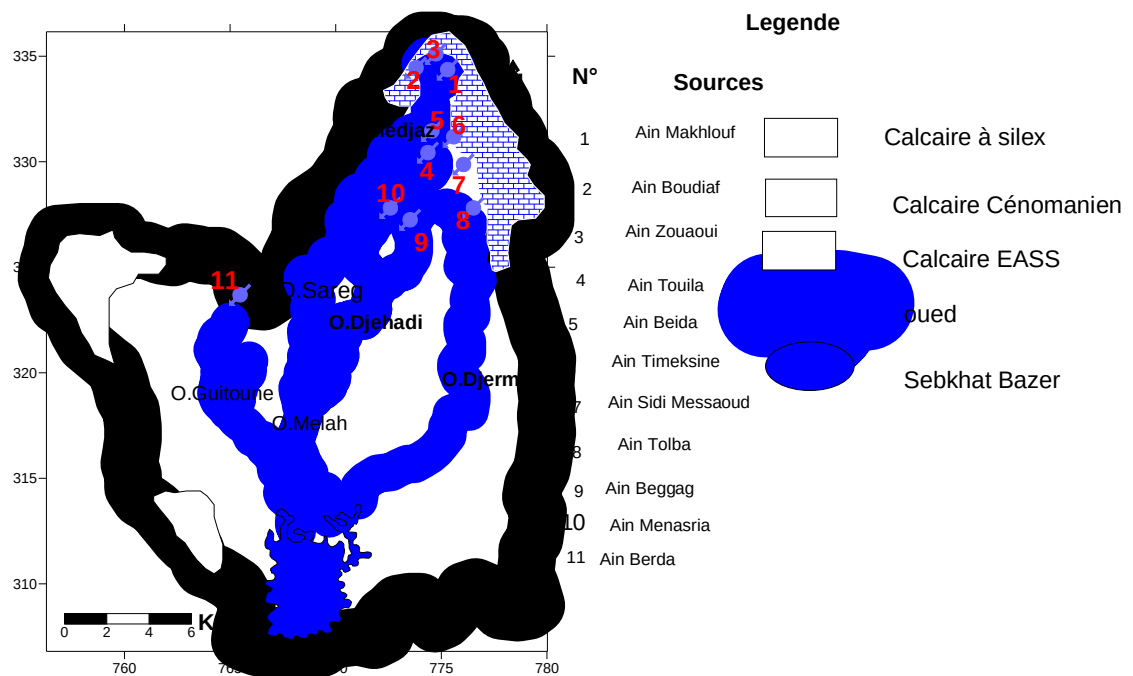


Fig 55 Carte de situation des sources

Tableau 55 les sources de la région d'El Eulma

N°	Sources	Debit l/s	Situation	Formation drainée
1	Ain Makhoulf	40	Medjaz –Sareg -Melah	Calcaire Sénonien
2	Ain Boudiaf	40	Medjaz –Sareg -Melah	Calcaire Sénonien
3	Ain Zouaoui	2	Medjaz –Sareg -Melah	Calcaire Sénonien
4	Ain Touila	5	Medjaz –Sareg-Melah	Mio-Plio-Quaternaire
5	Ain Beida	2	Medjaz –Sareg- Melah	Mio-Plio-Quaternaire
6	Ain Timeksine	5	Djermane	Marno –Calcaire Maestrichien
7	Ain Sidi Messaoud	40	Djermane	Calcaire à Silex
8	Ain Tolba	2	Djermane	Calcaire à Silex
9	Ain Beggag	2	Oued Djehadi	Mio-Plio-Quaternaire
10	Ain Menasria	3	Oued Djehadi	Mio-Plio-Quaternaire
11	Ain Berda	2	Oued Dehamcha	Mio-Plio-Quaternaire

4-1 La température.

Elle joue un rôle important dans l'activité chimique, bactérienne et l'évaporation des eaux. La température des eaux dépend des conditions d'écoulement et de la structure des aquifères. Elle varie en fonction de la température extérieure, des saisons, de la nature géologique et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol. Trois groupes ont été identifiés, Le groupe formé par les sources ayant une température qui varie entre 10°C et 14°C, correspondent aux sources jaillissant des formations géologiques du Mio –Plio-Quaternaire. Le deuxième groupe de sources dont la température varie entre 12 °C et 16°C, Correspond aux sources qui jaillissent des calcaires du sénonien et des calcaires de l'ypresien. Le troisième groupe de sources dont la température varie entre 18°C et 21°C correspond aux sources émanant des marno - calcaires du Maestrichtien.

La température La plus élevée est celle de la source Ain Timeksine ce qui explique que l'origine de cette eau a pour origine les marno- calcaire du maestrichtien c'est une formation très riche en pyrite .Tableau 56 et Fig 56

Tableau 56 Température des sources 2006 °C

N° de sources		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Paramètres Statistiques	Min	10	10	09	12	12	18	10	10	12	12	12
	Max	15.2	14	15.6	16	16	21	15	15	16	16	16
	Moy	11.3	12	10.3	14	12.7	18.2	12.5	12	12	11.5	11.8
	Ecart type	10.3	11	9.6	12	10.2	15	10.1	10.2	11.1	10.3	11.2
	Norme OMS	< 25 °C										

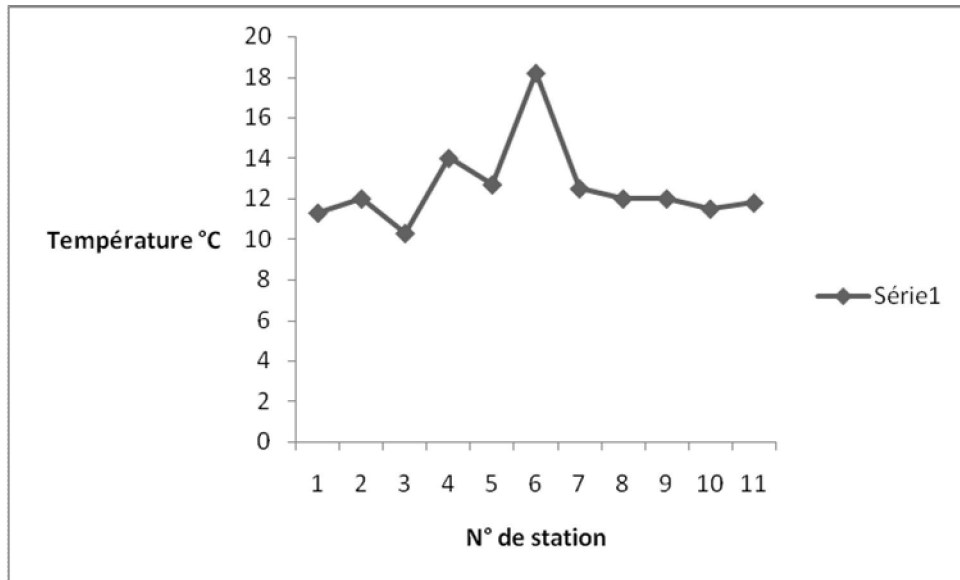


Fig N ° 56 Températures des eaux des sources

4-2 La Conductivité électrique des eaux des sources(CE).

La conductivité est liée à la présence des espèces ioniques en solution, les sources présentent une minéralisation moyenne (300 -600) $\mu S/cm$ pour les formations Carbonatés, or pour le Mio-Plio -Quaternaire la conductivité varie entre (680 - 2200) $\mu S/cm$ cette augmentation est due a la minéralisation des eaux qui augmente du nord au sud . Tableau 57 et Fig 57

Tableau N° 57 Conductivité électrique des eaux des sources $\mu S/cm$

N° de sources		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Paramètres Statistiques	Min	213	407	325	204	289	348	347	545	987	965	975
	Max	324	519	688	482	395	780	689	789	1200	1100	1265
	Moy	225	466	446	328	316	485	479	623	1024	980	1085
	Ecart type	201	408	385	256	298	356	378	456	789	325	765
	Norme OMS	<400 $\mu S/cm$										

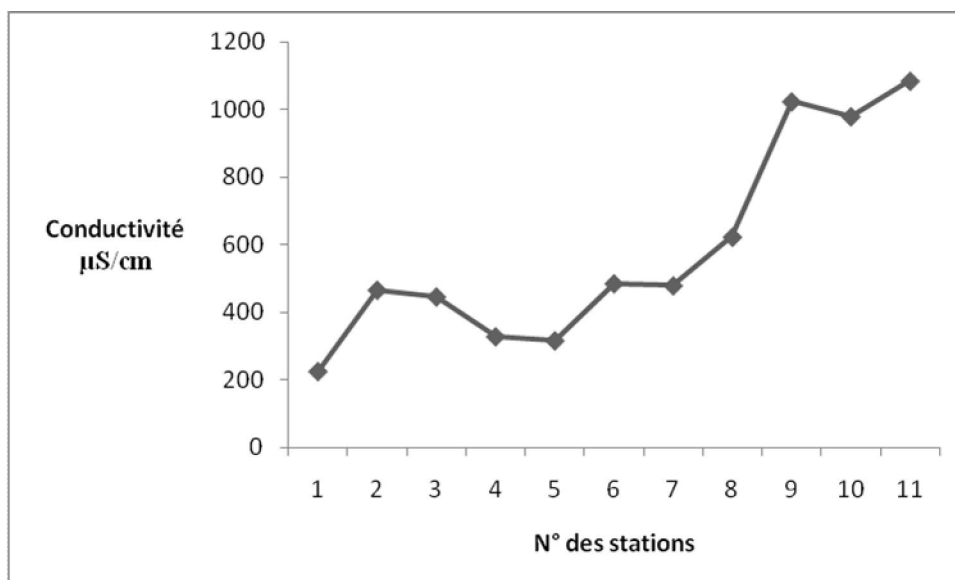


Fig N° 57 Variation de la conductivité des eaux des sources

4-3 Le potentiel hydrogène pH.

Le pH dépend des mécanismes chimiques, c'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. Le pH des sources est supérieure à 7, sauf pour la source Ain Berda (11) qui a pH de 5.1, cette valeur due à l'impact des lixiviats de la décharge sur les eaux souterraines. Tableau 58 et Fig. 58

Tableau N° 58 pH des eaux des sources

N° de sources		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Paramètres statistiques	Min	7.2	7.3	7.1	7.2	7.3	7.5	7.3	7.1	7.2	7.1	4.1
	Max	7.6	7.4	7.6	7.8	7.6	8.2	7.6	7.6	7.5	7.5	6.5
	Moy	7.4	7.2	7.3	7.4	7.4	7.6	7.5	7.3	7.3	7.4	5.1
	Ecart type	0.5	0.6	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.5	0.4	0.2
	Norme OMS	6.5 < pH < 9.5										

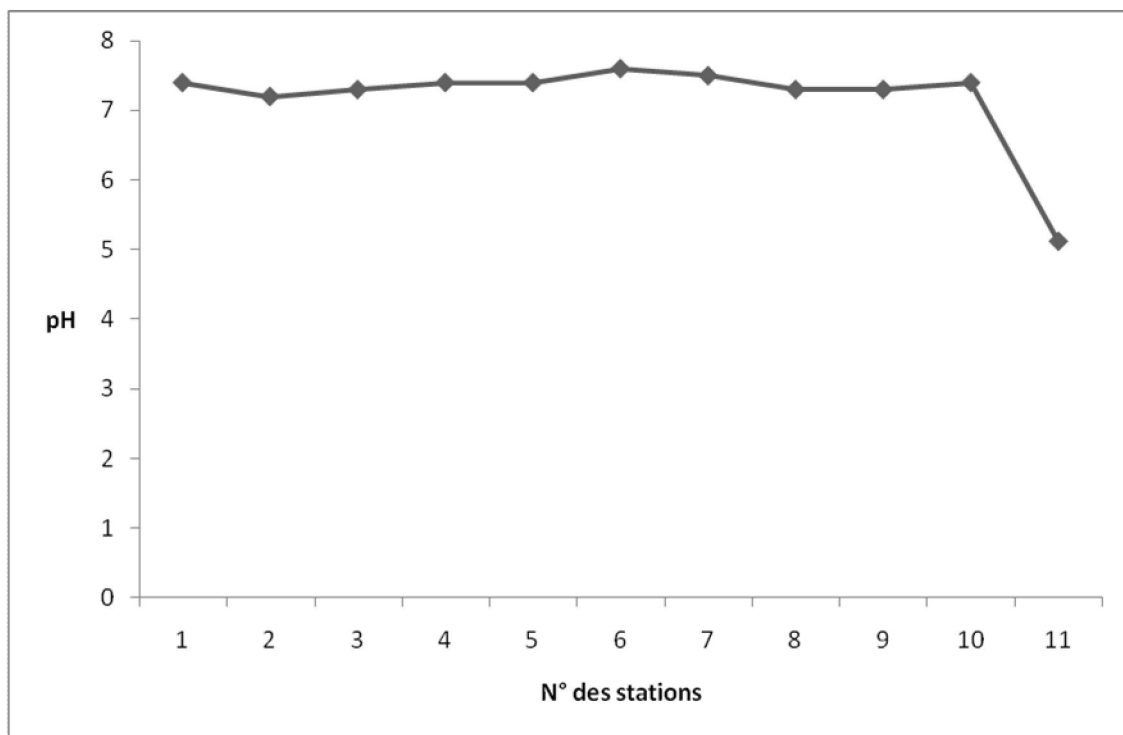


Fig N ° 58 : pH des eaux des sources

4-7 Oxygène dissout (O₂).

4-8

Le suivi spatio- temporel de oxygène dissout des sources a montré que la moyenne de la variation des concentrations varie entre 3.6 et 5.6 mg/l. sauf pour la source Ain Berda dont la moyenne est de 1.6 mg/l ce qui confirme l'impact de la décharge sur les eaux souterraines . Tableau 59 et Fig 59

Tableau 59 Oxygène dissout mg/l

N° de sources		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Paramètres Statistiques	Min	3.8	4.7	5.5	4.5	4.2	5.1	3.7	3.9	3.8	3.2	1.4
	Max	4.3	5.1	5.8	6.7	4.8	5.8	4.7	4.6	6.8	3.7	2.5
	Moy	3.6	4.5	5.2	5.6	4.3	5.2	3.8	4.2	4.5	3.4	1.6
	Ecart type	1.5	3.5	3.4	3.6	2.6	3.5	2.1	3.5	3.2.	3.3	1.3
	Normes OMS	3 mg/l										

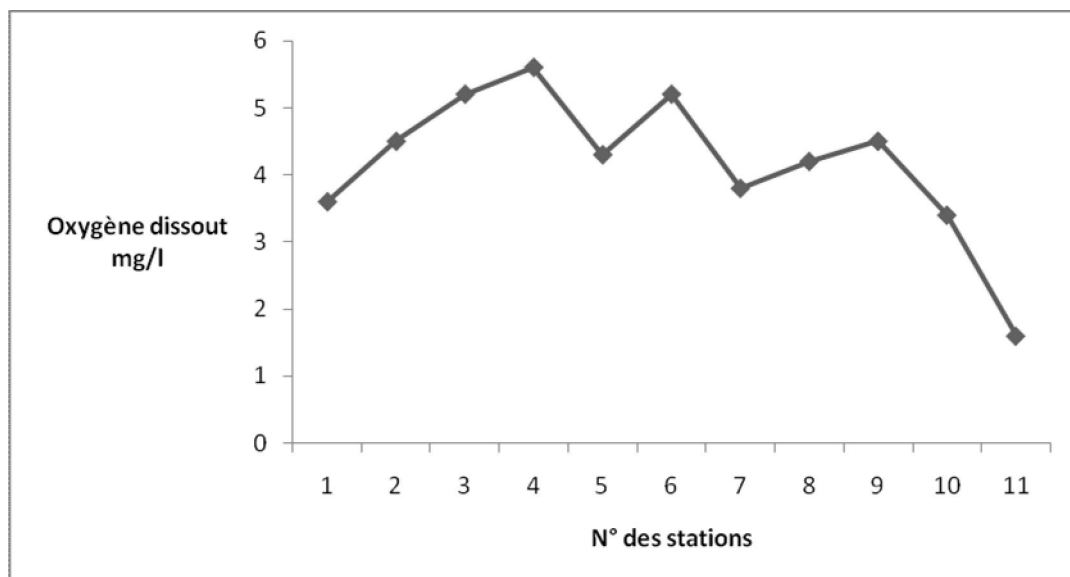


Fig N °59 : Oxygène dissout des eaux des sources

4-9 Le potentiel d'oxydo -réduction (Eh).

Ce paramètre nous permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau et la tendance des réactions chimiques (oxydation et réduction)

Le potentiel d'oxydation d'une réaction est donné par l'équation de Nernst

$$Eh = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln K_{sp} \quad \text{Ou} \quad E = E^0 + \frac{2.3RT}{ZF} \text{Log}(a_i)$$

Avec l'activité ionique $a_i = \gamma_i c_i$

γ_i = coefficient d'activité

c_i = la concentration de l'ion

R : Constante des gaz parfait $8.3145 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T : La température en Kelvin (K)

F : La constante de Faraday 96485 C mol^{-1}

n : Le nombre d'électrons échangés

L'activité des électrons est donnée par la formule suivante :

$$Pe = \frac{F}{2.303RT} Eh$$

A la température 25°C

$$Eh = 0.059 Pe \Rightarrow Pe = 16.9 Eh$$

Le suivi de mesure du potentiel d'oxydo- réduction des sources a montré que la moyenne de la variation des concentrations varie entre 106 mV et 245 mV donc on peut dire on a un pouvoir oxydant en augmentation, les sources Ain Timeksine (6) et la source Ain Berda (11) ont une concentration de 68 mV et 62 mV donc une réduction.

Pour la source 6 ,la réduction est due a l'oxydation de la pyrite donc consommation de l'oxygène ,tandisque la source 11 la réduction est due a l'impact de la décharge public sur les eaux souterraine .Tableau 60 et Fig 60

Tableau 60 potentiel oxydo rédox en mV

N° de sources		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Paramètres Statistiques	Min	123	120	163	101	126	65	128	102	134	124	53
	Max	350	405	588	152	145	97	187	204	179	165	98
	Moy	156	213	245	106	112	68	135	140	152	132	62
	Ecart type	33	25	30	55	58	23	62	65	69	59	45
	Normes OMS	250 mV										

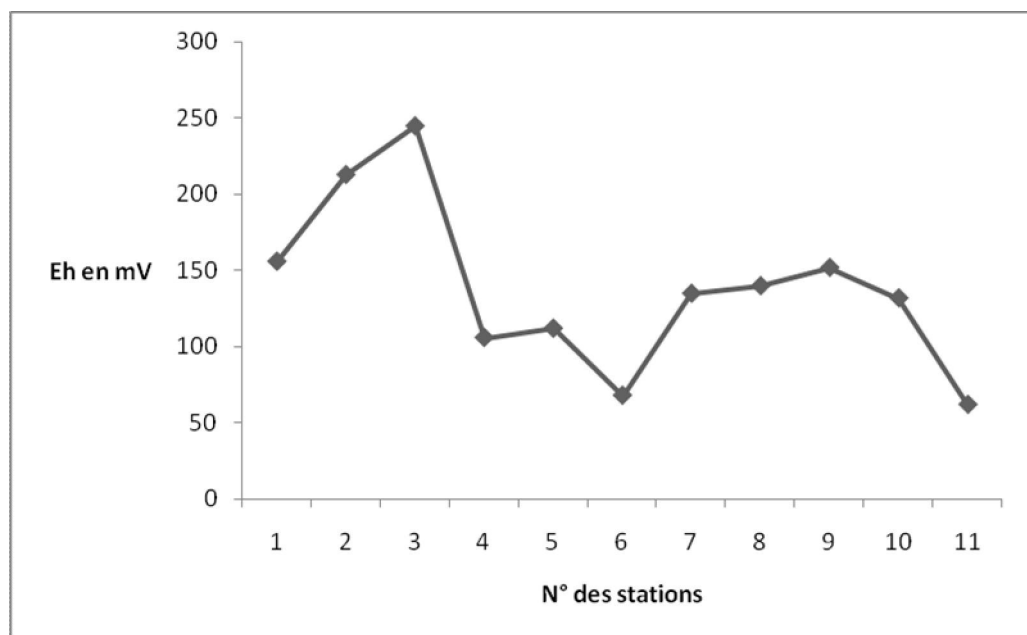
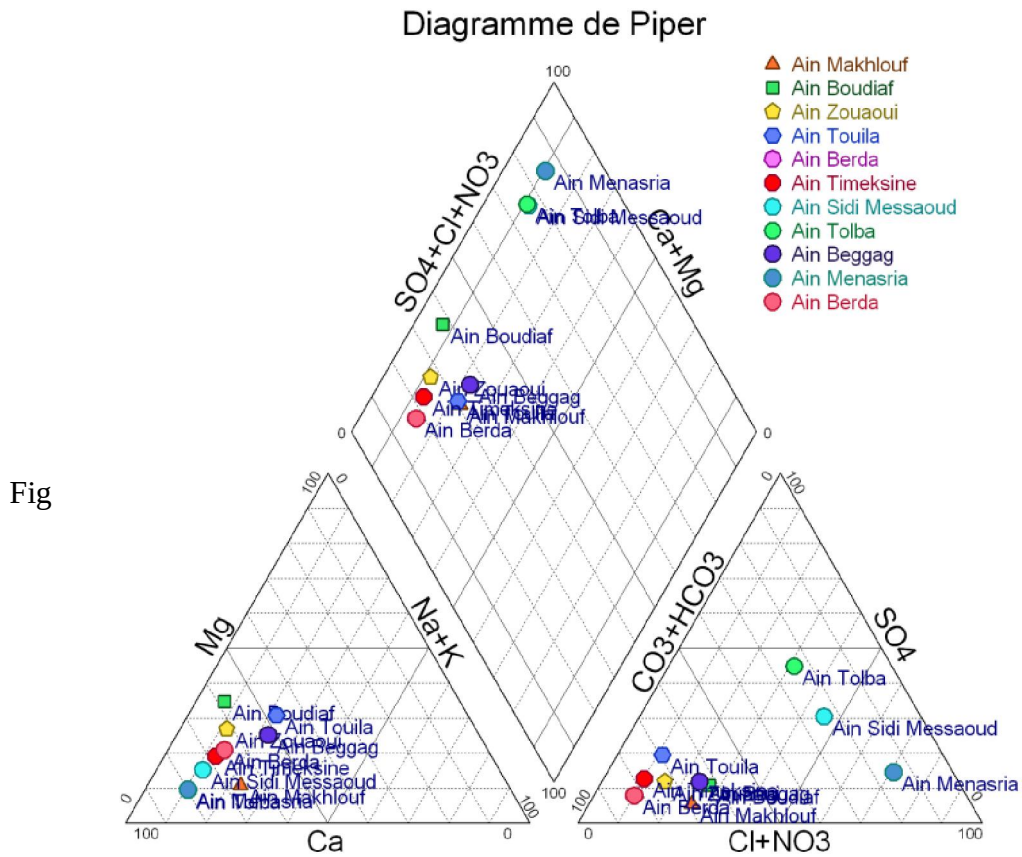


Fig N °60 : Potentiel oxydo réduction des eaux des sources

5 Diagramme de Piper .

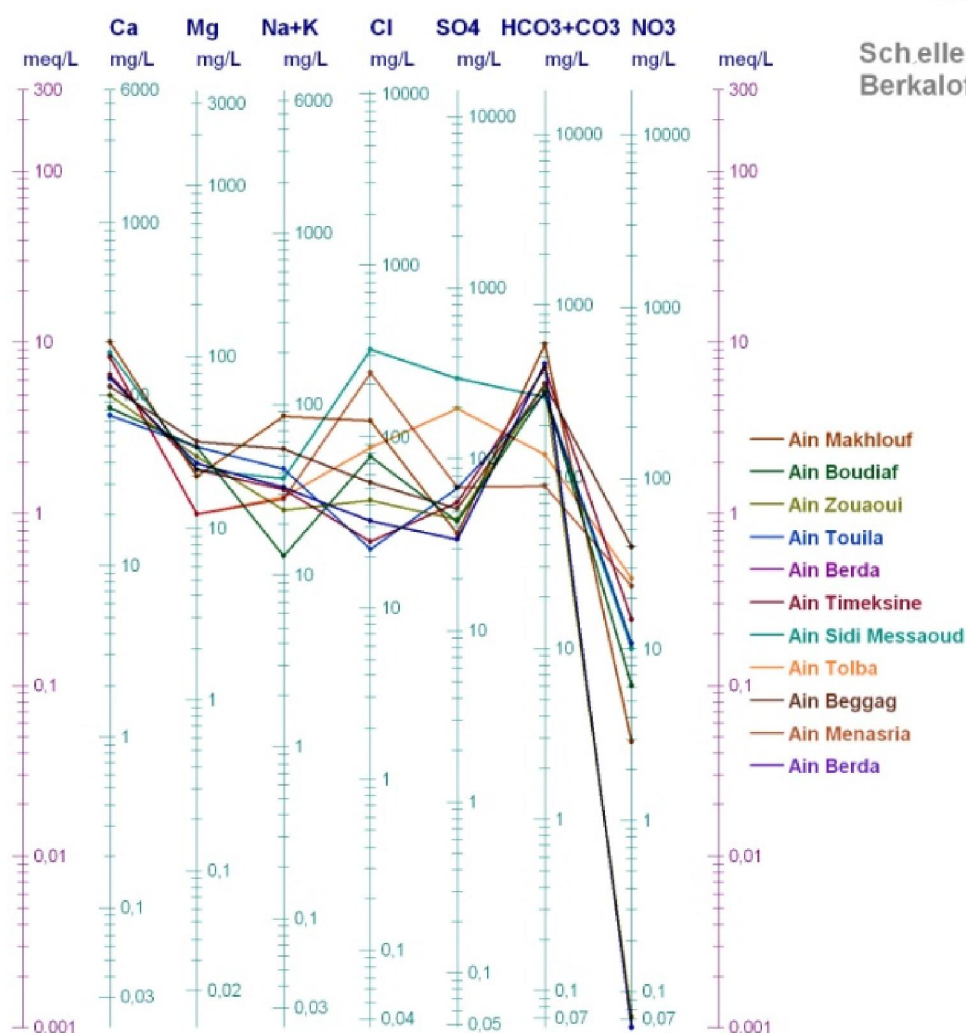
L'identification des faciès hydrochimique par le diagrammes de Piper, nous permet de dire que,les e sources Ain Menasria, Tolba et Sidi Messaoud ont un faciès chloruré calcique due a l'interaction des eaux avec les marno –calcaires du Maestrichien , tan disque les autre sources ont un faciès bicarbonaté calcique due a l'interaction de l'eau avec les formations carbonatés du de la nappe de Djemila Fig 61



61 : Diagramme de piper des eaux des sources 2006

6 Diagramme de SCHOELLER- BERKALLOF :

Le diagramme tracé confirme le faciès chloruré calcique des sources ain Menasria ,Tolba et Sidi Messaoud ce qui traduit l'influence des marno –calcaire sur les eaux et rend la minéralisation liée aux ions Cl^- et Ca^{++} . Les autres sources ont un faciès bicarbonaté calcique ce qui traduit le lessivage des formations carbonatés de bordure et confirme l'origine de l'alimentation de la nappe. Fig 62



6 Comparaison des eaux de pluie et les eaux de neige .

Les précipitations liquides ont un faciès bicarbonaté calcique, la différence réside que les eaux de pluie qui sont plus chargées en chlore et en Sodium, ce lien est probablement dû au phénomène d'évaporation et la présence aux aérosols lors des précipitations. Fig 63, 64, 65, 66

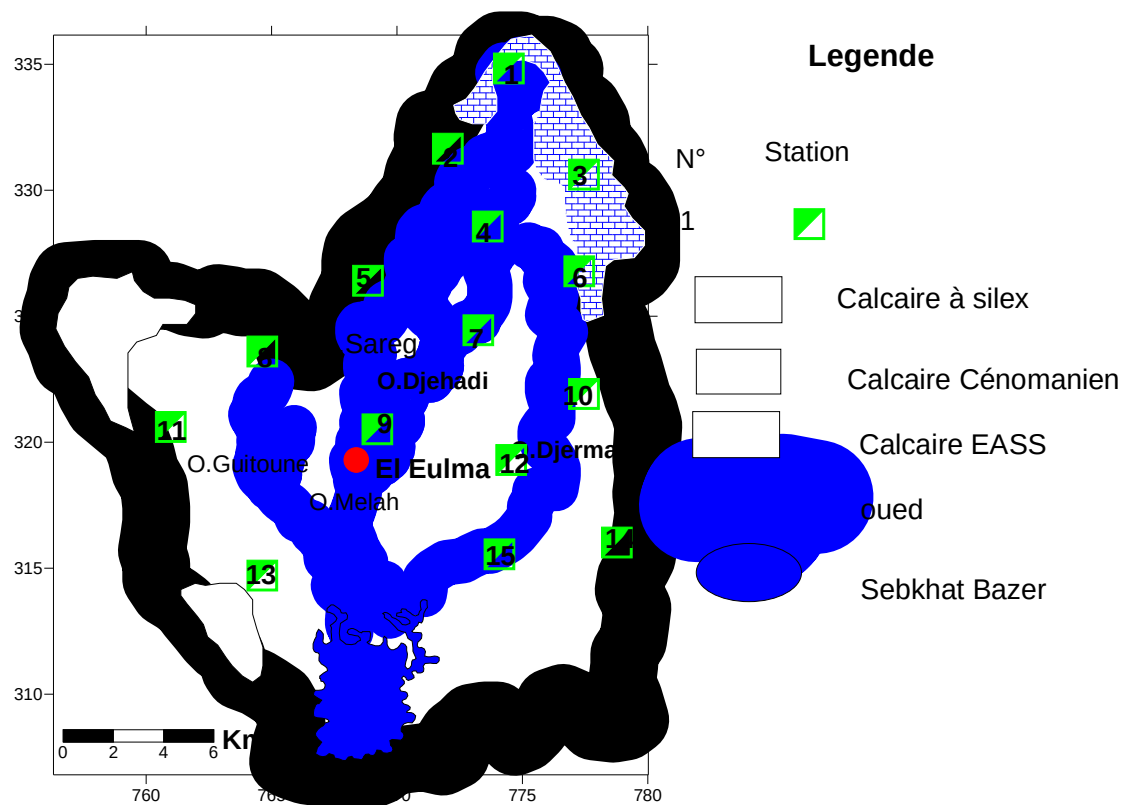


Fig 63 : Stations de prélèvement des eaux de neige

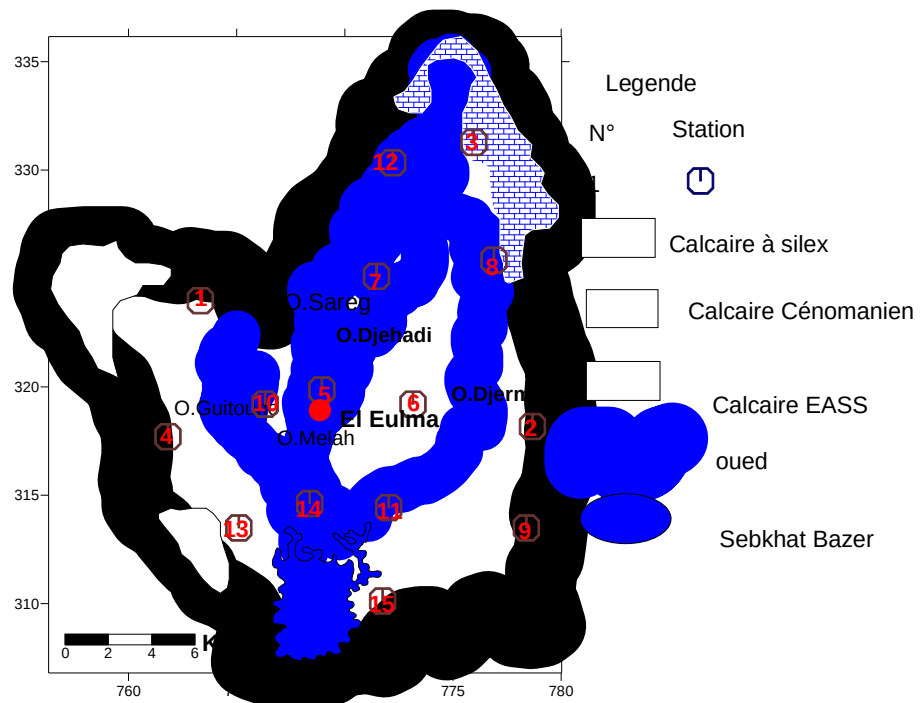
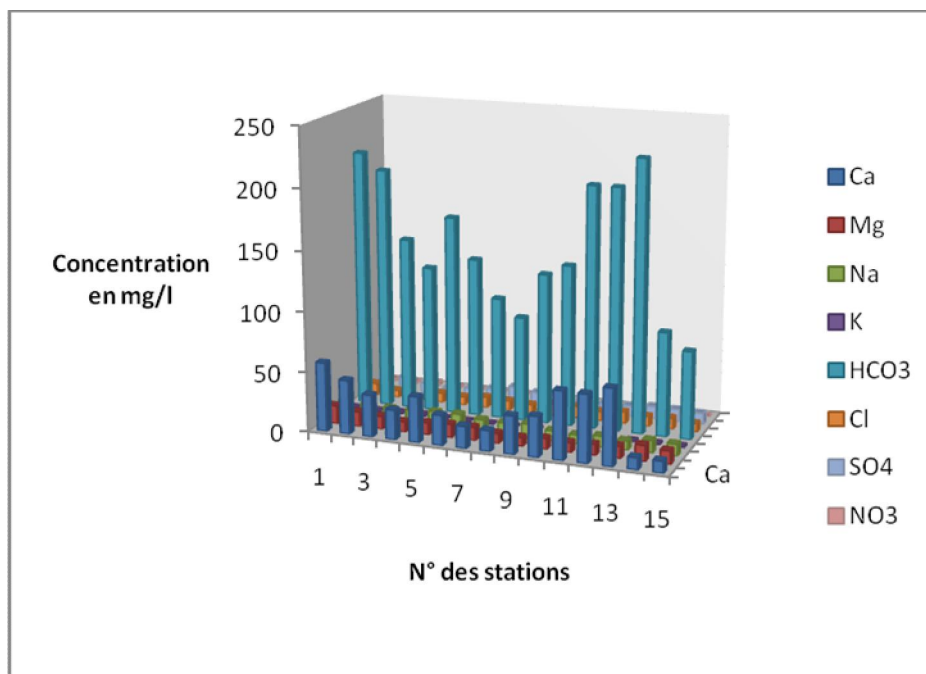


Fig 64 : Stations de prélèvement des eaux de pluie



FigN° 65 :Evolution des éléments chimique des eaux de neige

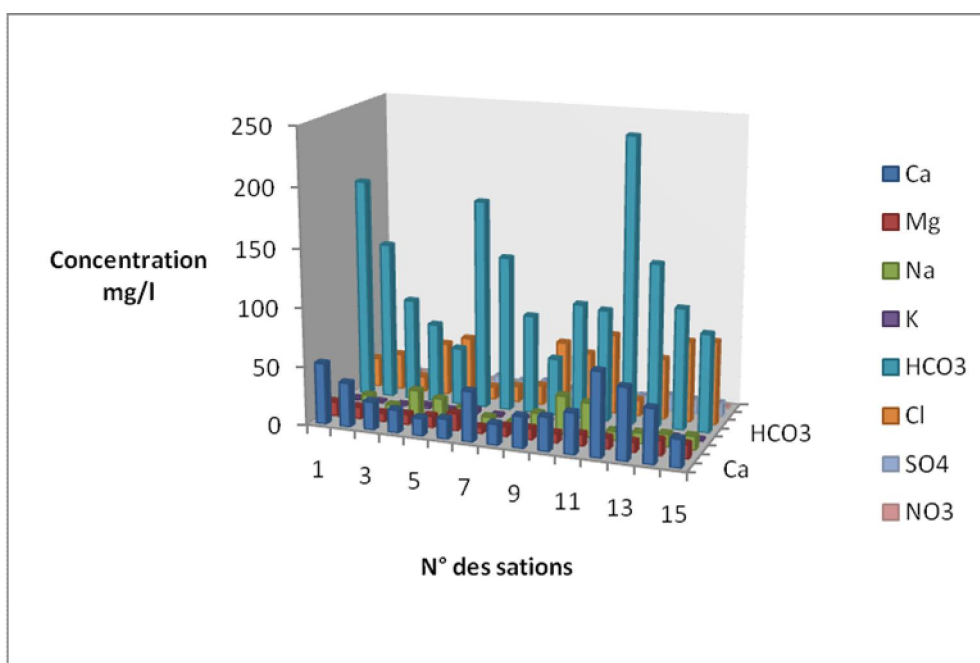


Fig N° 66 : Evolution des éléments chimiques des eaux de pluie

8-Chimisme des eaux de surface.

Un suivi de la qualité des eaux de surface a été réalisé dans 17 stations : 3 à oued Guitoune , 4 à oued Djehadi , 5 à oued Djermane et 5 à Oued Medjaz. Fig 64.

L'évolution de la minéralisation des eaux de surface varie en fonction de la lithologie traversée par les eaux .Ainsi on constate que la salinité augmente tout en se déplaçant de l'amont vers l'aval .pour les oueds ,Medjaz ,Guitoune et Djermane les formations sont carbonatées au Nord et argileuses au Sud .Or pour Oued Djehadi c'est l'inverse qui se produit ,on assiste à une dilution des eaux du nord au sud due a la présence des argiles riches en gypse. Pour les nitrates ,les nitrites et l'ammonium ,leur variation élevée est due au rejets des eaux usées de la ville d'El Eulma , les agglomérations du milieu rurale et les eaux des unités industrielles de la région .Tableau 61 et fig 67,68,69,70

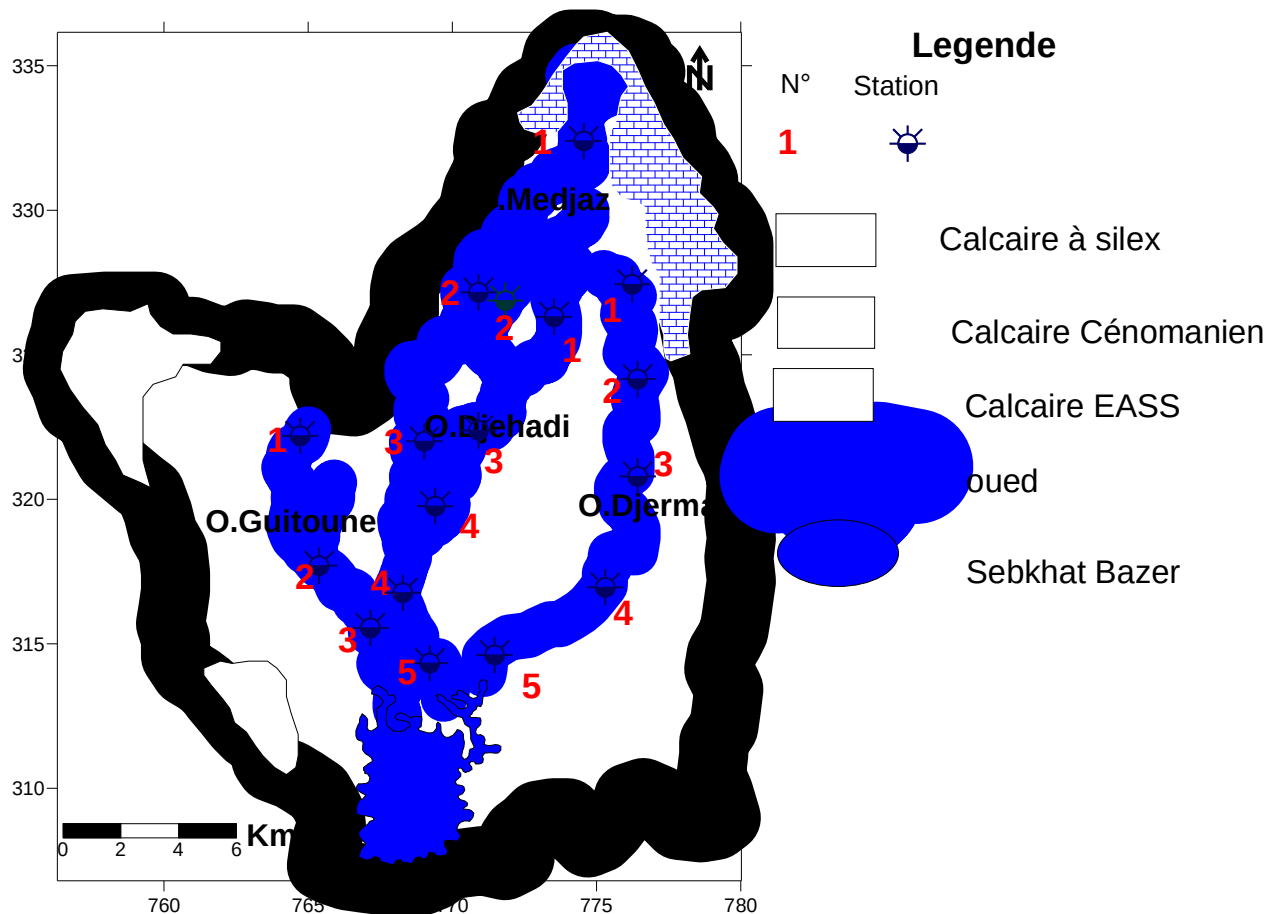


Fig 67 :Carte de position des stations de prélèvement des eaux de surface

Tableau 61 Analyse des eaux de surface. Aout 2006

Paramètre	Paramètres Statistiques														
	E.Type	Moy	Max	Min	E.Type	Moy	Ma	Min	E.Ty	Moy	Max	Min	E.Type	Moy	
T	0,44	15,76	16,3	15,2	0,58	15,34	16,1	14,6	0,48	15,85	16,2	15,2	0,226	15,56	
°C	0,18	7,44	7,6	7,1	0,14	7,4	7,9	7,5	0,15	7,72	7,9	7,5	0,052	7,56	
pH	9,05	151,2	162	135	8,90	159,6	178	148	13,36	163,75	175	143	6,338	129,66	
Eh	195,99	870,4	1195	634	275,77	931,6	1675	924	44,01	834,25	917	802	429,54	1119,3	
CE	1,68	2,92	5,2	0,8	0,89	4,24	5,6	2,8	1,89	3,25	5,8	0,5	0,442	4,3	
Od	14,76	86,71	103,85	62,48	24,65	87,98	102,17	42,3	7,62	93,3	76,85	54,75	9,30	93,7	
Ca	6,04	14,95	25,17	9,88	1,34	9,56	11,2	7,72	2,10	11,71	15,17	9,62	4,56	11,71	
Mg	66,97	95,15	185,16	24,17	29,49	51,89	104,28	24,8	7,03	67,66	71,15	55,32	46,88	67,66	
Na	5,12	14	20	6	3,06	8,92	12,5	4,25	2,80	9,33	9,20	7,13	2,65	9,33	
K	27,21	100,56	134,52	70,87	57,82	103,97	188,38	64,2	28,68	108,33	148,17	74,28	35,3	108,33	
HC	68,24	132,14	235,27	48,17	36,99	54,11	117,34	11,7	45,802	146,17	165,17	35,17	79,119	146,17	
Cl	25,95	103,97	132,8	68,19	65,19	91,62	175,25	22,1	15,121	85	78,33	39,25	13,108	85	
SO	38,57	48,79	102,83	12,10	38,15	21,62	97,2	1,38	45,404	45,97	103,28	2,17	27,609	31,2	
NO	1,06	1,51	3,25	0,17	0,68	0,39	1,75	0	1,244	1,06	2,87	0	0,876	1,03	
NH	1,67	2,48	4,95	0,89	0,93	0,66	2,38	0	1,611	1,56	3,49	0	0,858	1,673	
Oue ds	Medjaz				Djerbane				Djehadi				Guitoune		

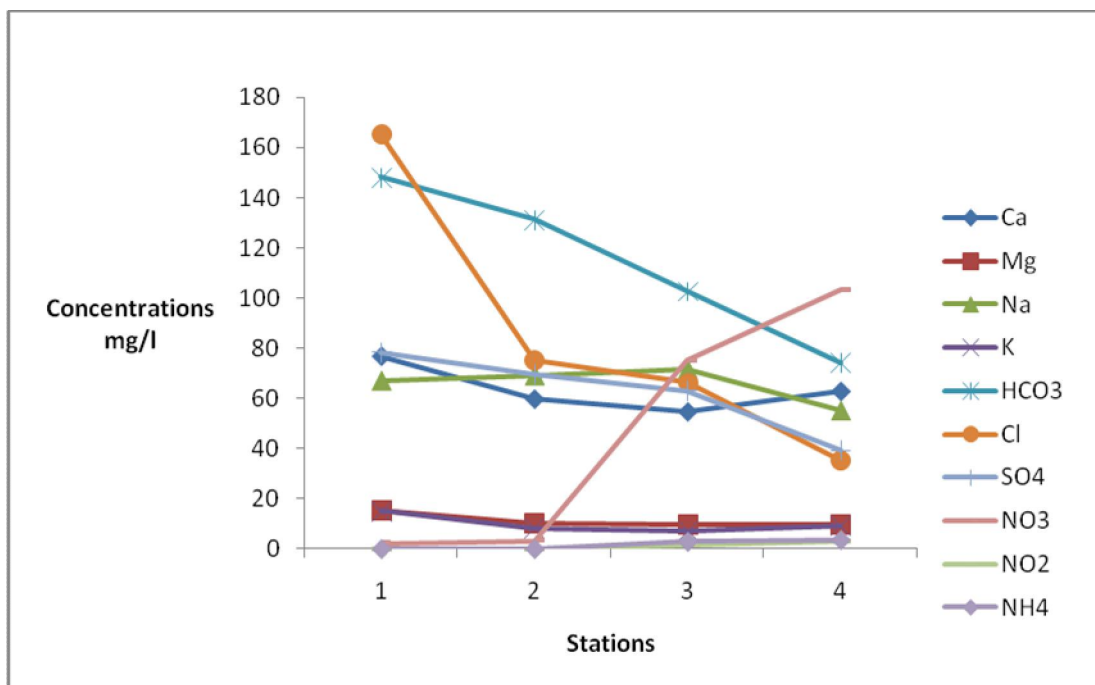


Fig N° 68 : Évolution spatial des éléments chimiques sur Oued Djehadi

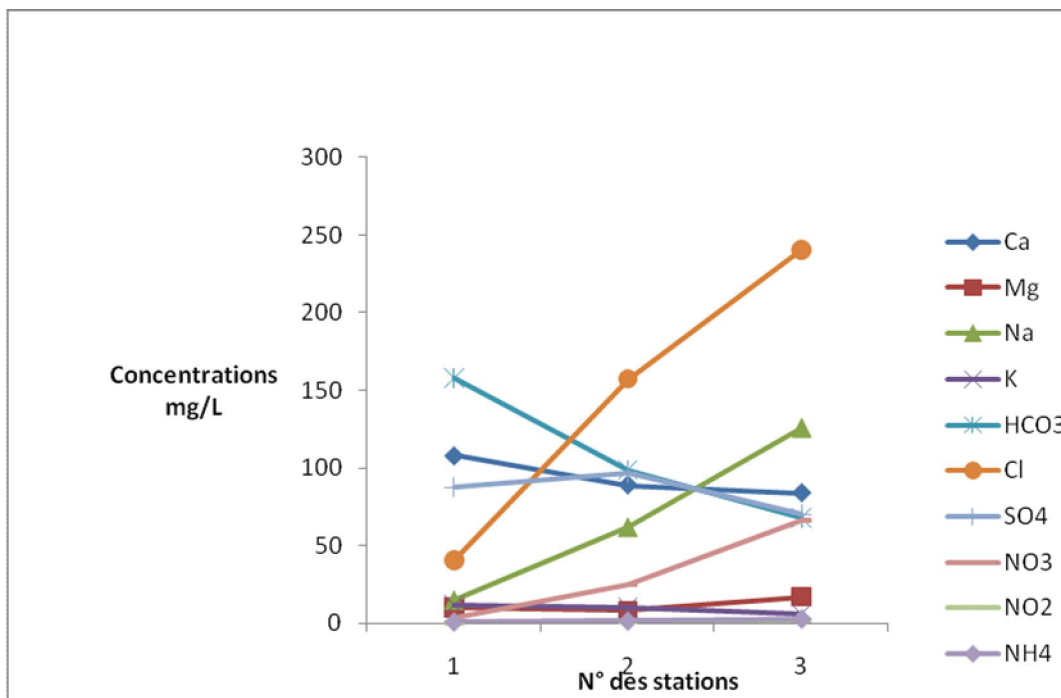


Fig N°69 :Evolution spatial des éléments chimiques sur oued Guitoune

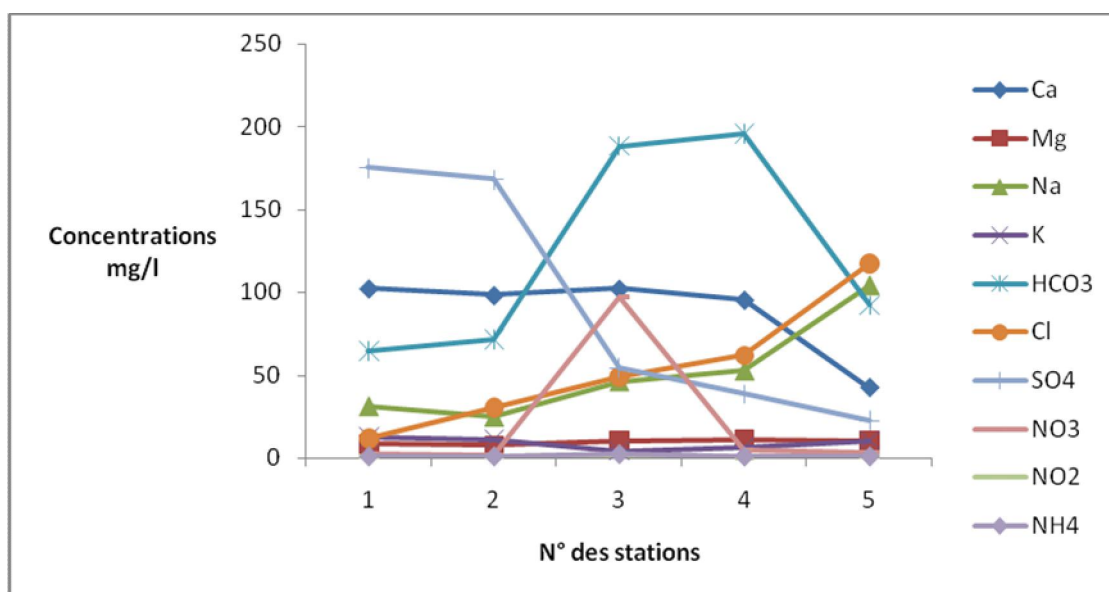


Fig N°70 : Evolution spatial des éléments chimiques sur Oued Djermane .

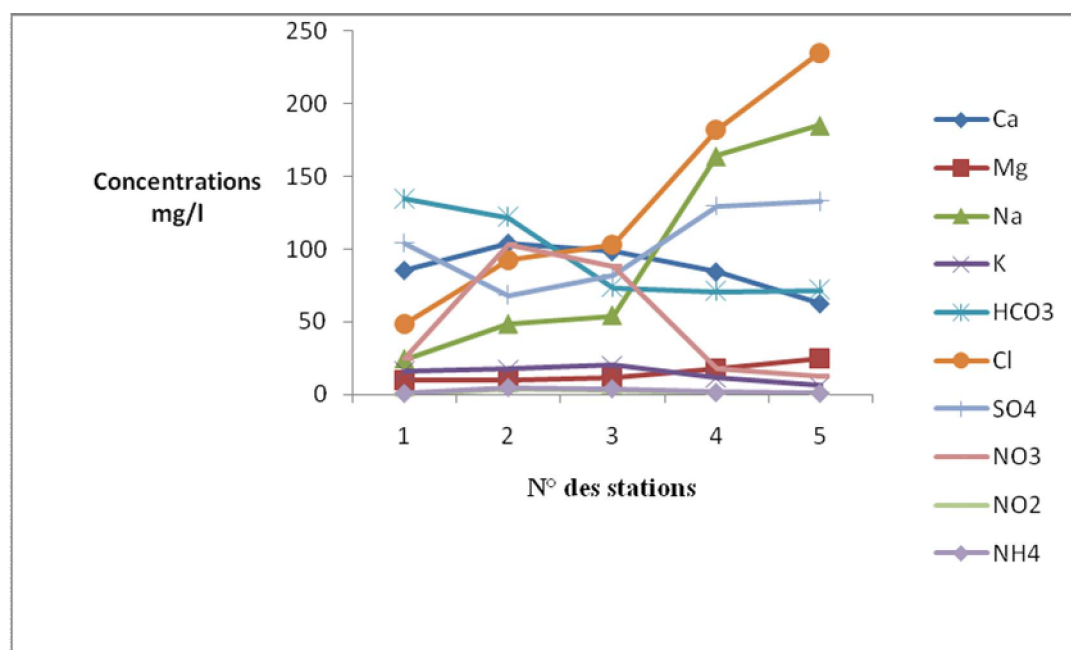


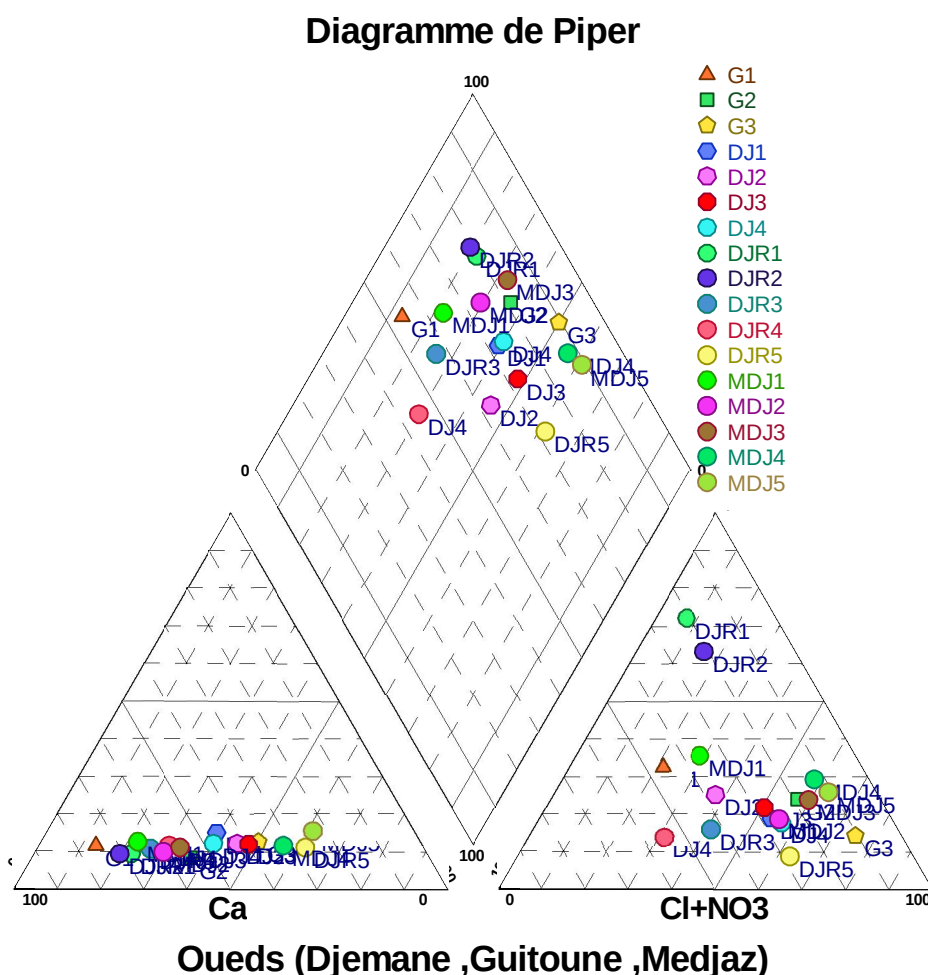
Fig N° 71 : Evolution spatial des éléments chimiques sur Oued Medjaz

8-1 Conductivité des eaux de surface .

La conductivité électrique des eaux de surface des oueds de Medjaz et Guitoune et Djermane augmente dans le sens d'écoulement du Nord au Sud , celle de oued Djehadi elle est élevée au Nord et faible au Sud .

8-2 Facies chimique des eaux de surface .

Les facies hydrochimique identifié par le diagramme de Piper des analyses hydrochimiques des eaux de surface les stations Djr5,Mdj5 ,G3 et Dj1 sont de type chloruré sodique ,tan disque les autres stations ont un facies chloruré calcique a sulfaté calcique alors que les points Djr1 et Dj4 ont un facies bicarbonaté calcique .Cette variation des facies est liée a la nature lithologique des terrains traversés par les oueds .Fig 72



9 Faciès chimique des eaux souterraines.

A partir des calculs de quantités en réaction et la classification des ions, nous avons déterminé les faciès chimique les plus dominants dans la région en période de basses eaux et hautes eaux durant la période 2003- -2006 pour les aquifères des argiles sableux ,l'aquifère des calcaires lacustre pour le Mio-plio-quaternaire ,l'aquifère des calcaires Cénomaniens ,les marno –calcaire du maestrichien et le calcaire de à silex de yprésien pour la nape de Djemila et le calcaire du jurassique pour l'ensemble allochtone sud sétifien .Tableau 62

L'évolution des faciès chimiques varient d'une période à une autre . Les faciès dominants sont : Le faciès bicarbonaté calcique, le sulfaté calcique, le chloruré calcique et le chloruré sodique.

Le faciès bicarbonaté calcique est dominant dans les aquifères carbonatés et les zones limitrophes.

Le faciès sulfaté calcique est présent dans les eaux des aquifères des marno calcaires du Maestrichtien.On note la présence du faciès bicarbonaté calcique magnésien avec un pourcentage de 3%.

Le faciès chloruré calcique sur le centre de la plaine en liaison avec les formations alluvionnaires et gypsifères où en a probablement un échange de base entre le sodium et le calcium comme on le verra plus loin.

Le faciès chloruré sodique est localisé dans le sud de la région à la proximité de Sebkhaz Bazer en liaison avec les des formations évaporitiques.

Tab 62 Evolution des faciès chimique

Géologie	Aquifères	Faciès chimique	Basses eaux				Hautes eaux			
			2003	2004	2005	2006	2003	2004	2005	2006
Mio –Plio-Quaternaire	Argiles sableuses	Bicarbonates calcique	25%	25%	25%	26%	67%	65%	68%	67%
		Chloruré calcique	35%	35%	35%	30%	25%	27%	24%	23%
		Chloruré sodique	40%	40%	40%	44%	8%	8%	9%	10%
	Calcaires lacustres	Bicarbonates calcique	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
		Chloruré calcique	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
Nappe de Djemila	Calcaire Cénomaniens	Bicarbonaté calcique	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Calcaire Yprésien	Bicarbonaté calcique	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Marno – calcaires du Maestrichien	Sulfaté calcique	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%
		Bicarbonaté calcique magnésien	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Ensemble allochtone sud sétifien	Calcaire du Jurassique	Bicarbonaté calcique	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Le diagramme de Schoeller –Berkalof, montre également la présence de trois facies hydrochimique le bicarbonaté calcique ,le chloruré calcique et le chloruré sodique Fig 74

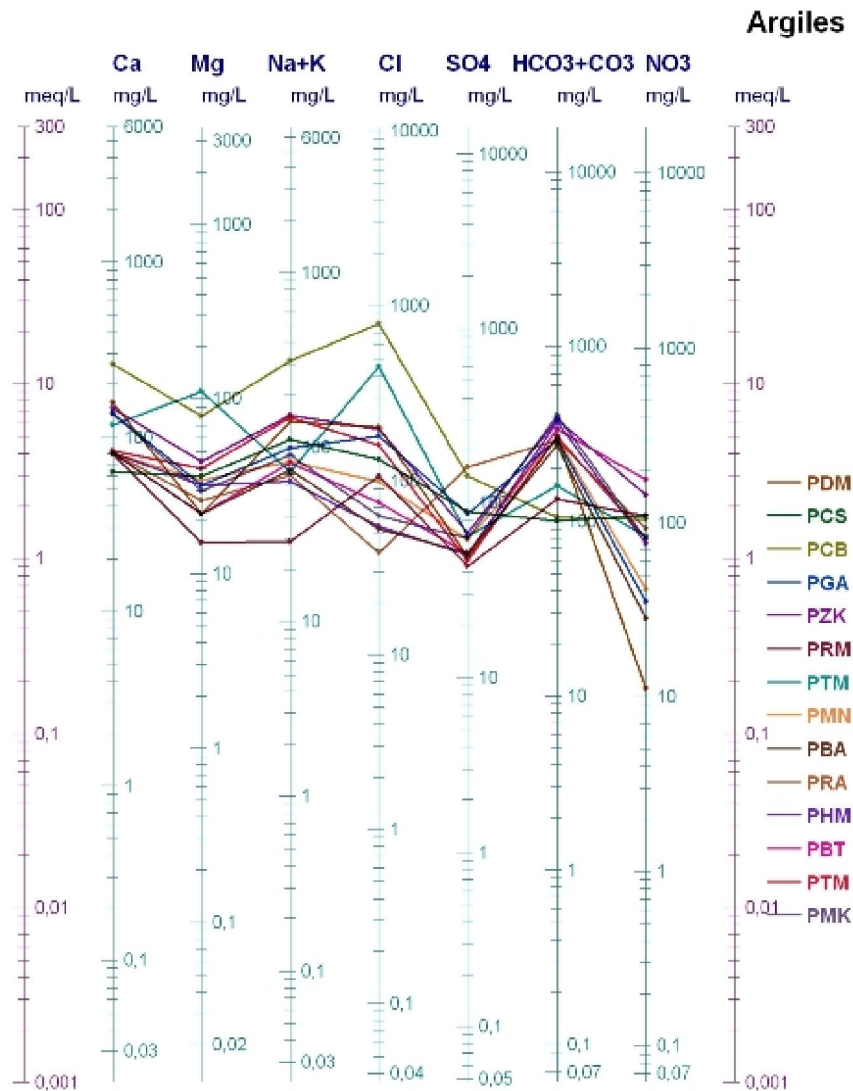


Fig. N° 74 : Facies chimique de l'aquifère des argiles sableuses selon le diagramme de Schoeller –Berkalof

10-2 La nappe des calcaires lacustres.

Localisée dans les formations du Mio-Plio-Quaternaire , la nappe des calcaires lacustres est profonde et l'ensemble des points d'eau sont des forages dont la profondeur varie entre 50 m - 150 m.

Les deux diagrammes montrent que la majorité des eaux ont un facies bicarbonaté-calcique suite à la présence de la matrice calcaire dans lequel l'eau est emmagasiné .Néanmoins une tendance chloruré calcique apparait dans ces eaux due à la proximité de la sebkhat Fig 75 et 76

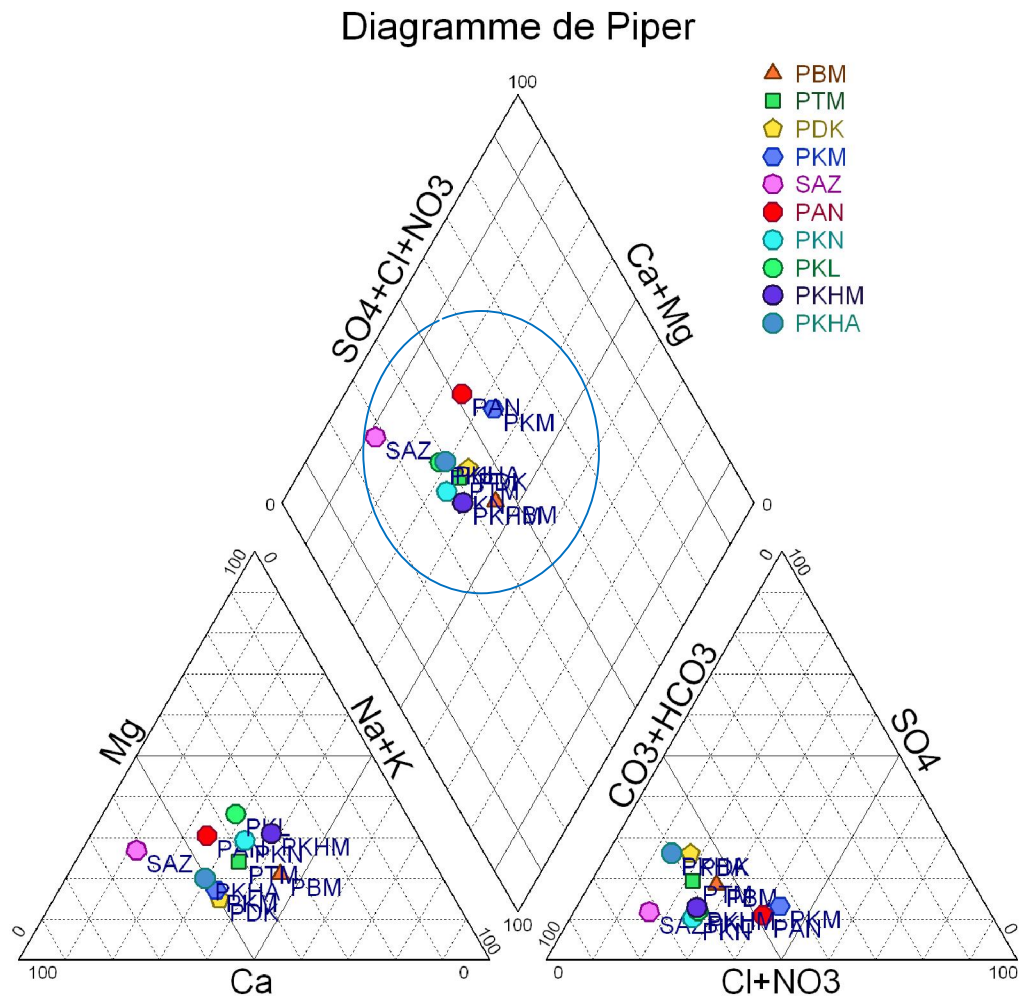


Fig N ° 75 : Facies chimique de l'aquifère des calcaires lacustres selon le diagramme de Piper

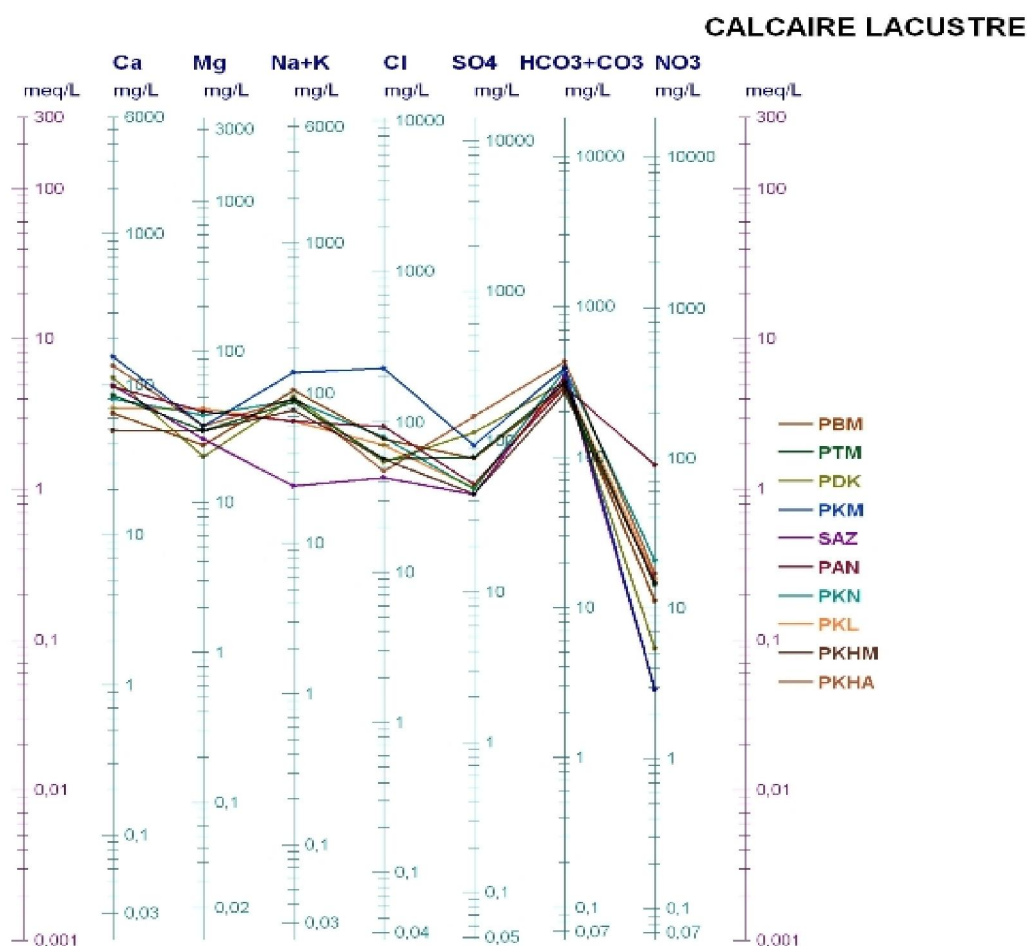


Fig N° 76 : Facies chimique de l'aquifère des calcaires lacustres selon le diagramme de Schoeller –Berkaloff

10-3- La nappe des marno –calcaires –schisteux.

Les deux diagrammes montrent la présence de deux facies différents :

Le 1^{er} sulfaté calcique qui représente la quasi-totalité des échantillons, en liaison avec l'oxydation de la pyrite.

Le 2^{ème} groupe de faciès bicarbonaté calcique magnésien, en liaison avec des formations carbonatés et dolomitique. Fig 77 et 78

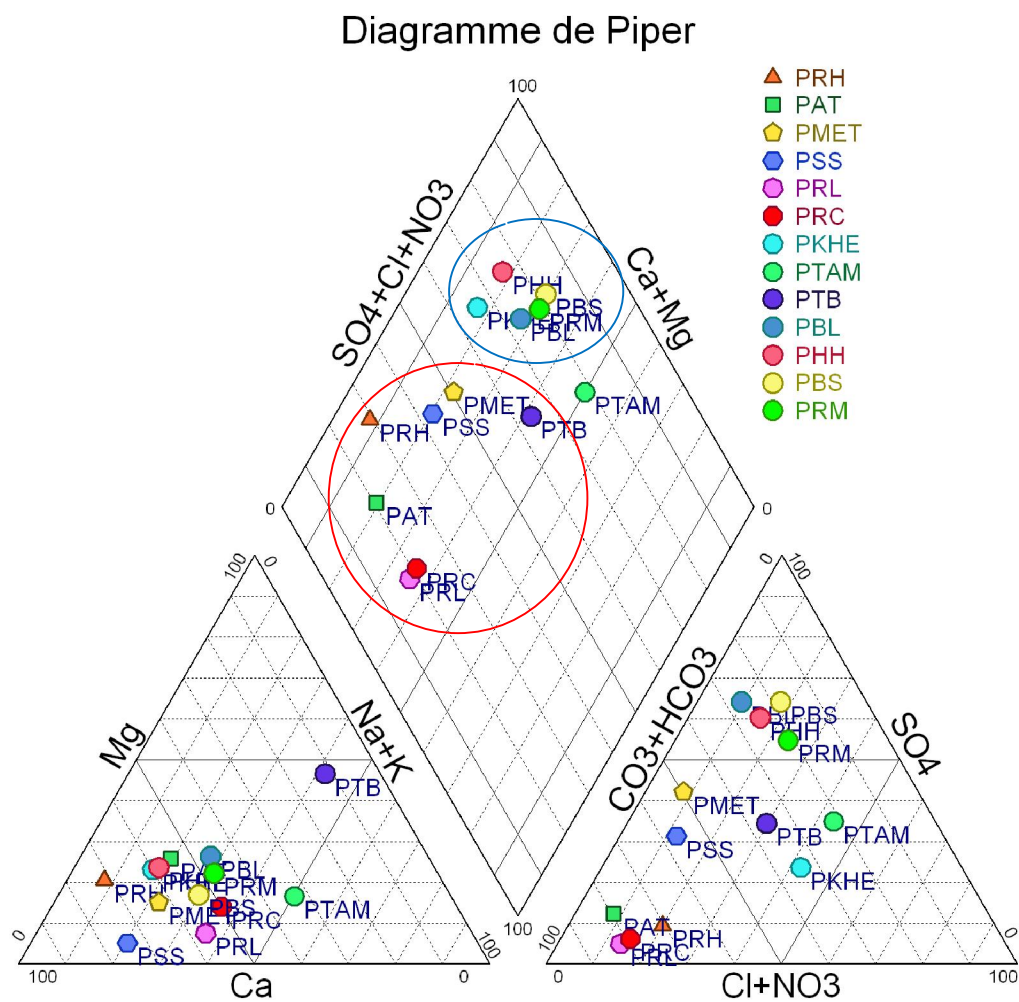


Fig N ° 77 : Facies chimique de l'aquifère des marno –calcaires –Schisteux selon le diagramme de Piper.

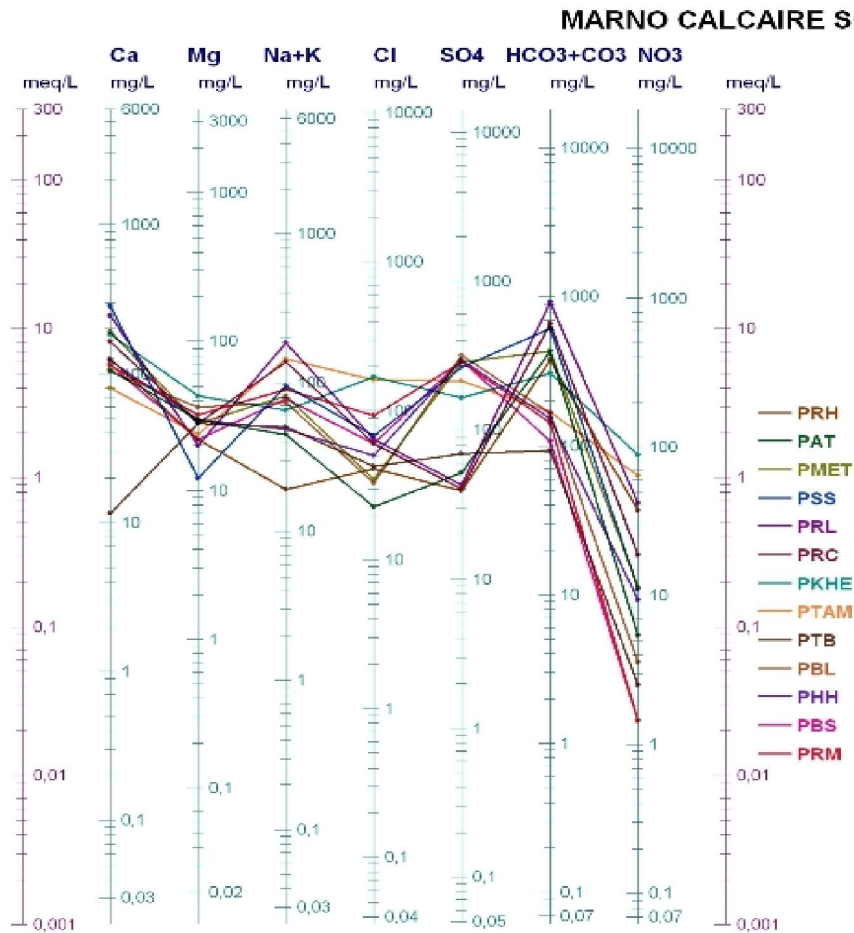


Fig N ° 78 : Facies chimique de l'aquifère des marno –calcaires –Schisteux selon le diagramme de Schoeller –Berkaloff

10-4 Nappes des formations carbonatées.

IL faut rappeler qu'on a trois aquifères

- Les calcaires du Cénomanien.
- Les calcaires à Silex de l'Yprésien.
- Les calcaires allochtone du Sud Sétien.

La majorité des échantillons ont un faciès bicarbonaté calcique, avec parfois des chlorurés calciques à sulfatés calciques due au lessivage des calcaires lacustres et les marno- calcaires schisteux .Fig 79et 80

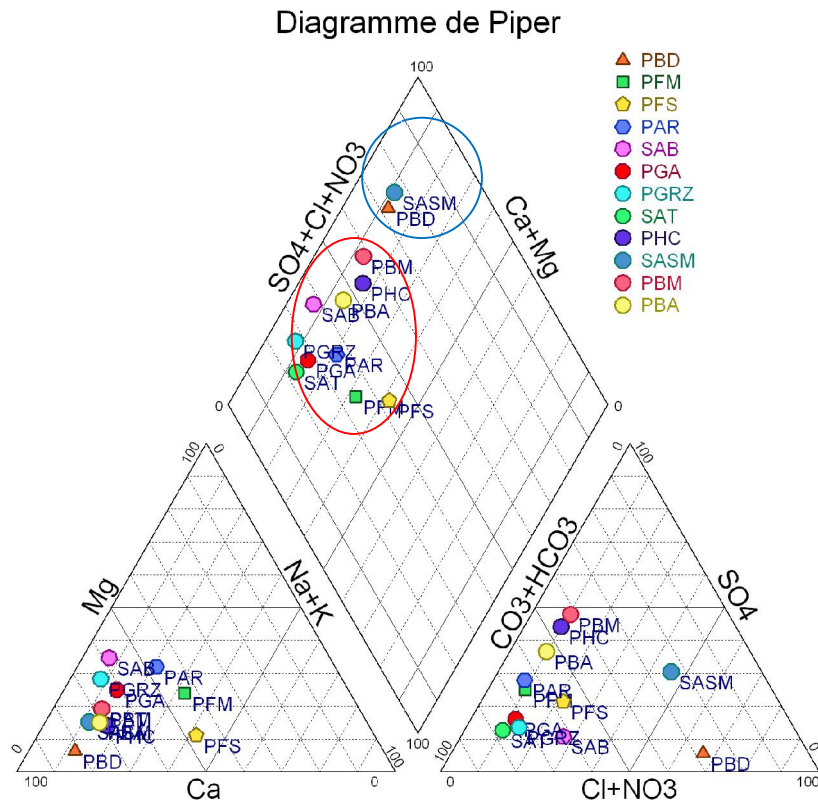


Fig N °79 :Facies chimique de l'aquifère des formation carbonatés selon le diagramme de Piper.

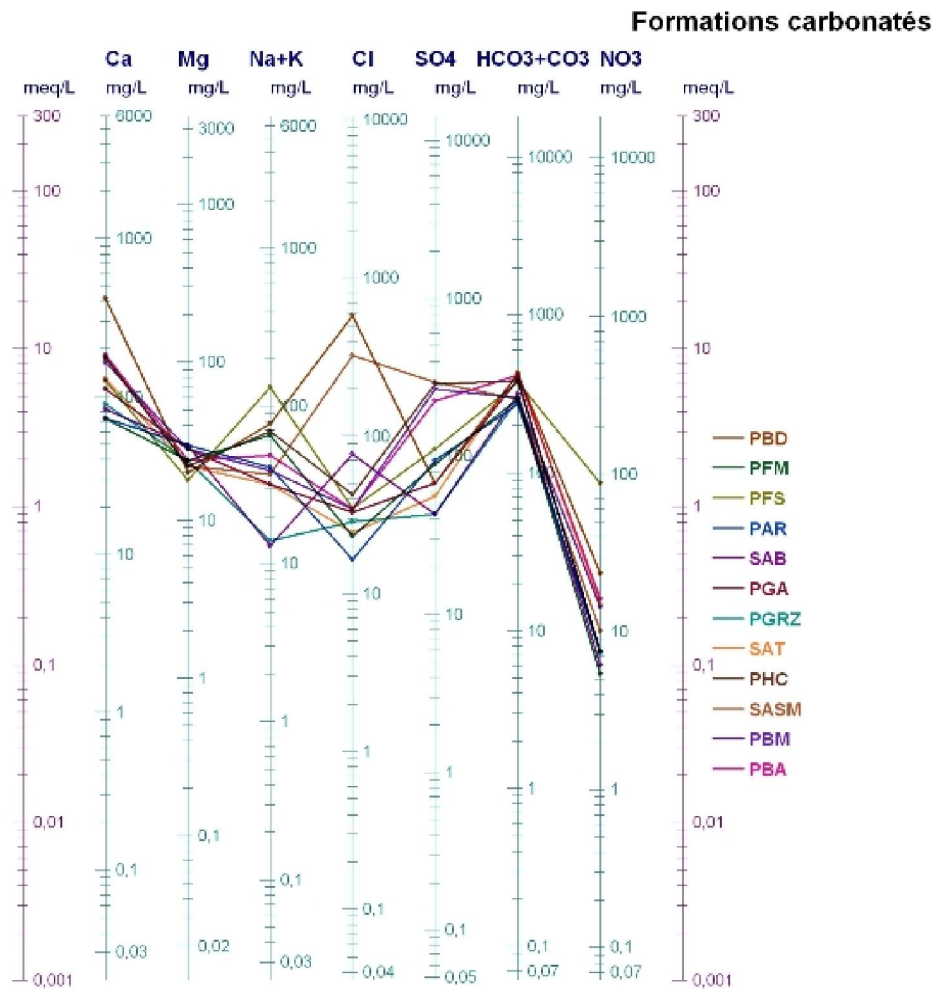


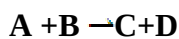
Fig N ° 80 Facies chimique de l'aquifère des formations carbonatés selon le diagramme de Schoeller –Berkaloff

11) Etude thermodynamique des solutions.

11-1 Les types de réactions chimiques dans l'eau.

Les réactions chimiques des solutions aqueuses peuvent être réversibles ou irréversibles à l'état d'équilibre. Or lors de l'équilibre, on a l'influence des concentrations sur la vitesse des réactions on parle alors de la loi de l'action de masse.

Soit la réaction chimique suivante :



A l'état d'équilibre ou l'équilibre homogène on peut écrire :

$$Aa + Bb = Cc + Dd$$

Où

$[A]$, $[B]$, $[C]$, $[D]$ les substances.

a, b, c, d les coefficients de la réaction.

Avec $[A] = \frac{\text{le nombre de moles de } A}{\text{Volume du système}}$ o

A l'équilibre on définit la constante d'équilibre $K_C(T)$ selon la relation suivante :

$$K_C(T) = \frac{[A]^a[B]^b}{[C]^c[D]^d}$$

La constante d'équilibre dépend de la température et des substances considérées.

11-2 Activités chimiques.

Le calcul thermodynamique des équilibres chimiques des eaux rend compte des interactions électrostatiques entre les différents ions « i » ces derniers sont représentés par l'activité ionique. Pour une solution idéale, l'activité et la molarité sont égales.

Donc on définit l'activité chimique par le coefficient d'activité (α) à l'aide de la relation suivante :

$$\alpha = \gamma m$$

Avec :

α : Activité chimique

m : la concentration molaire

La force ionique est donnée par :

$$I = \frac{1}{2} \sum m_i Z_i^2$$

I : La force ionique.

m_i : La molalité de l'ion

Z_i : La charge de l'ion

Pour une solution diluée $I \leq 0.1$ Le coefficient d'activité d'une espèce ionique est calculé par la loi de **Debye-Huckel**

$$-\log \gamma_i = \frac{A Z_i^2 \sqrt{I}}{1 + a_i B \sqrt{I}}$$

Avec :

γ_i : Le coefficient d'activité ionique de l'espèce i

Z_i : la charge de l'espèce ionique i

I : La force ionique de la solution

A, B Sont des constantes qui dépendent de la température :

$$A = 0.485 + 920.10^{-6}$$

$$B = 0.3241 + 162.10^{-6}$$

A différentes température les constantes A, B sont variables : Tableau 63

Tableau 63 constantes A et B

Température °C	A	B
0	0.4883	0.3241
5	0.4921	0.3249
10	0.4960	0.3258
15	0.5000	0.3262
20	0.5042	0.3273
25	0.5085	0.3281
30	0.5130	0.3290
35	0.5175	0.3297
40	0.5221	0.3305
45	0.5271	0.3314
50	0.5319	0.3321

Pour les solutions non diluées $I = 0.5$, Le coefficient d'activité est déterminée par l'équation de **Davies** suivante :

$$\log \gamma_i = -\frac{A z_i^2 \sqrt{I}}{1 + a_i B \sqrt{I}} + 0.3I$$

11-3 Indice de saturation.

L'équilibre d'une solution avec la matrice encaissante est calculé à l'aide de l'indice de saturation (IS) selon la formule suivante :

$$IS = \log \left[\frac{PAI}{K_s} \right]$$

Avec :

PAI : produit d'activité ionique

K_s : produit de solubilité calculé du minéral considéré calculé, déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$\ln K_s = \frac{-\Delta G_0}{RT}$$

ΔG_0 : Enthalpie libre standard (J/mol)

R : La constante des gaz parfait ($1.987 \cdot 10^{-3}$ kcal/mol)

T : la température en Kelvin

Une solution est en équilibre avec une phase minérale lorsque $IS = 0$ donc le flux de dissolution est égale au flux de précipitation.

Si

$IS > 0$: La solution est sursaturée.

$IS < 0$: La solution est sous saturée

11-4 Calcul des indices de saturation des points d'eau.

Le calcul des indices de saturation des points d'eau analyse a été faite à l'aide du logiciel WinPHREEQC 2.8 (David L. Parkhurst, U.S. Geological Survey) qui a donné les résultats qui ont été consignés dans le tableau 64 :

Tableau 64 Indice de saturation

Période		Basse eaux 2006					
		Indice de saturation IS					
Nappe	Points d'eau	Anhydrite CaSO ₄	Aragonite CaCO ₃	Calcite CaCO ₃	Dolomite (Ca,Mg)(CO ₃) ₂	Gypse CaSO ₄ (H ₂ O) ₂	Halite NaCl
argiles sableuses	PKM	-2.11	0.07	0.22	0.10	-1.86	-7.51
	PRL	-2.23	0.06	0.21	0.29	-1.97	-7.10
	PMOA	-2.08	-0.16	0.00	-0.27	-1.83	-7.59
	PAA	-2.31	0.10	0.26	0.45	-2.06	-7.17
	PKS	-1.92	0.64	0.79	1.17	-1.67	-6.82
	PDM	-1.94	0.30	0.46	0.25	-1.69	6.15
	PCB	-1.46	1.24	1.39	2.46	-1.21	-5.25
	PZK	-1.98	2.18	2.33	4.39	-1.73	-6.15
	PBB	-1.54	2.08	2.23	3.48	-1.29	-5.83
	PTOM	-2.04	0.16	0.31	0.81	-1.79	-6.32
Calcaire lacustre	PBM	-2.05	0.66	0.81	1.48	-1.8	-6.75
	PTM	-1.94	0.15	0.30	0.42	-1.70	-6.98
	PKN	-2.19	0.49	0.64	1.21	-1.95	-6.83
	PDK	-1.68	0.17	0.31	0.15	-1.44	-6.93
	PAN	-2.09	0.56	0.71	1.29	-1.84	-6.87
Marno Calcaire Schisteux	PRH	-2.07	-0.34	-0.19	-0.93	-1.82	-7.92
	PMET	-1.16	0.68	0.84	1.04	-0.91	-7.19
	PSS	-1.09	0.84	0.99	0.87	-0.84	-6.86
	PHH	-1.28	0.53	0.68	1.01	-1.04	-7.34
	PRM	-1.33	0.29	0.44	0.61	-1.09	-6.76
Formations carbonates	PDB	-1.60	2.28	2.43	3.81	-1.36	-6.05
	PFM	-1.93	0.71	0.86	1.48	-1.68	-7.47
	PAR	-1.90	-0.29	-0.14	-0.43	-0.43	-7.86
	PHC	-1.17	0.36	0.51	0.36	-0.93	-7.60
	PBA	-1.26	-0.88	-0.73	-2.12	-1.01	-7.51

11-5) Discussions des résultats.

Les anions et les cations susceptibles d'être impliqués dans le processus de précipitation /dissolution sont le Ca⁺⁺, Mg⁺, SO₄⁻, Na⁺. Cl⁻

On constate que les minéraux carbonatés (calcite, aragonite, dolomite) sont à limite de l'équilibre avec une légère saturation.

Pour les éléments évaporitiques nous constatons que les eaux sont sous saturées surtout pour les minéraux évaporitiques.

12)-Evolution du calcium ,des chlorures et les sulfates .

L'ion Chlore et les sulfates, qui peuvent être une source de dégradation du milieu du point de vue évolution de la salinité .D 'où il nécessite un suivit afin de comprendre les mécanismes de leur mise en place la et leurs origines dans la région. Pour les carbonates leur mise en place est due a la dissolution des formations carbonates .

12-1) Les Chlorures.

Les chlorures sont des indicateurs de pollution de surface dans les régions éloignées de la mer .La concentration est plus importante en surface qu'en profondeur pour les différentes nappes de la région d'où l'effet de la nature lithologique, l'écoulement et des aérosols sous forme de précipitations qui favorisent l'augmentation de la concentration.

On peut déterminer la quantité du Chlore qui se précipite sous forme d'aérosols dans les régions humides et semi aride emporté par les nuages de la source principale la mer en applique la relation suivante. (Todd .D.K & Mays.L.W 2005)

$$N = 110e^{-0.0133d}$$

Avec N La concentration annuel du Chlore précipité en Kg/Hectare

d: La distance par rapport à la mer soit 120 km à vol d'oiseau pour la région d'El Eulma .

D'où

$$N = 110e^{-0.0133 \times 120} = 22 \text{ kg/ha/an}$$

Les concentrations en chlorures évoluent avec le sens d'écoulement des eaux souterraines .Elle est faible près des zones d'alimentation ,les formations carbonatés et est plus grande dans le centre de la plaine et au environ de Sebkhath Bazer Fig 81.

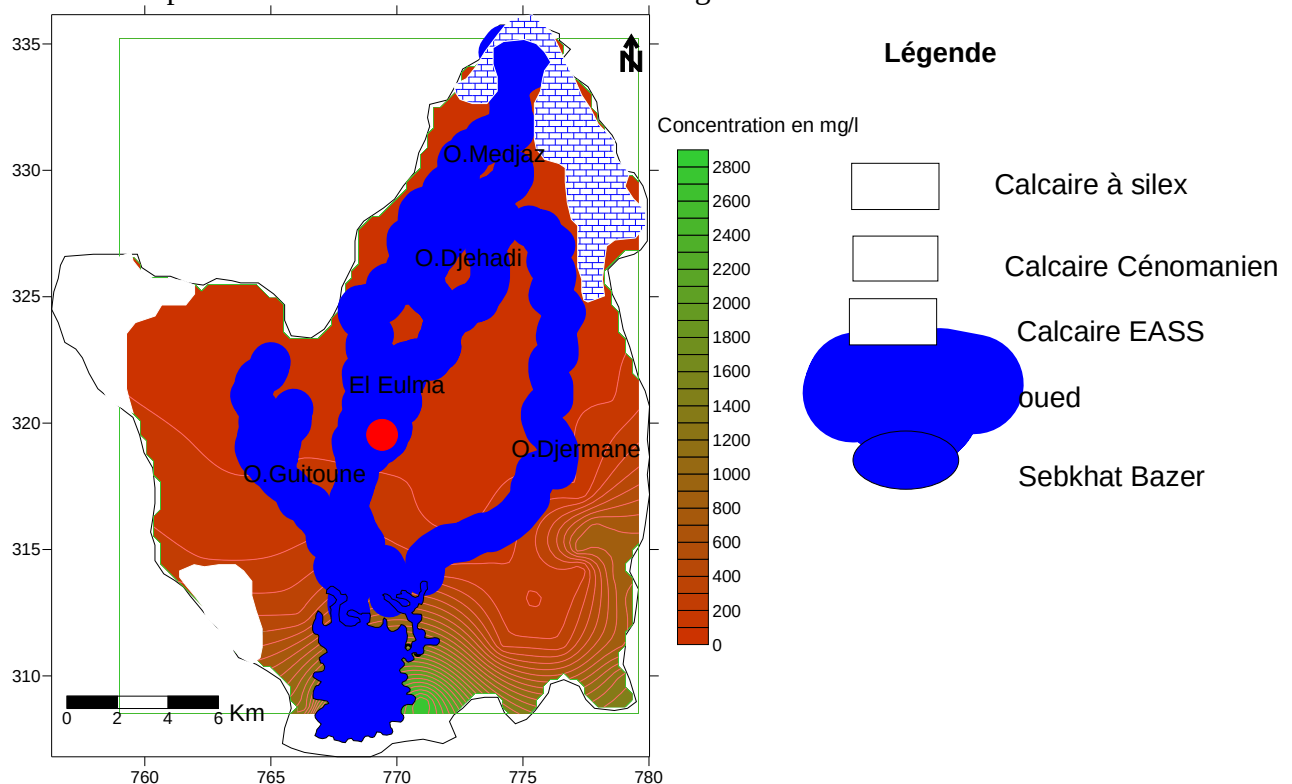
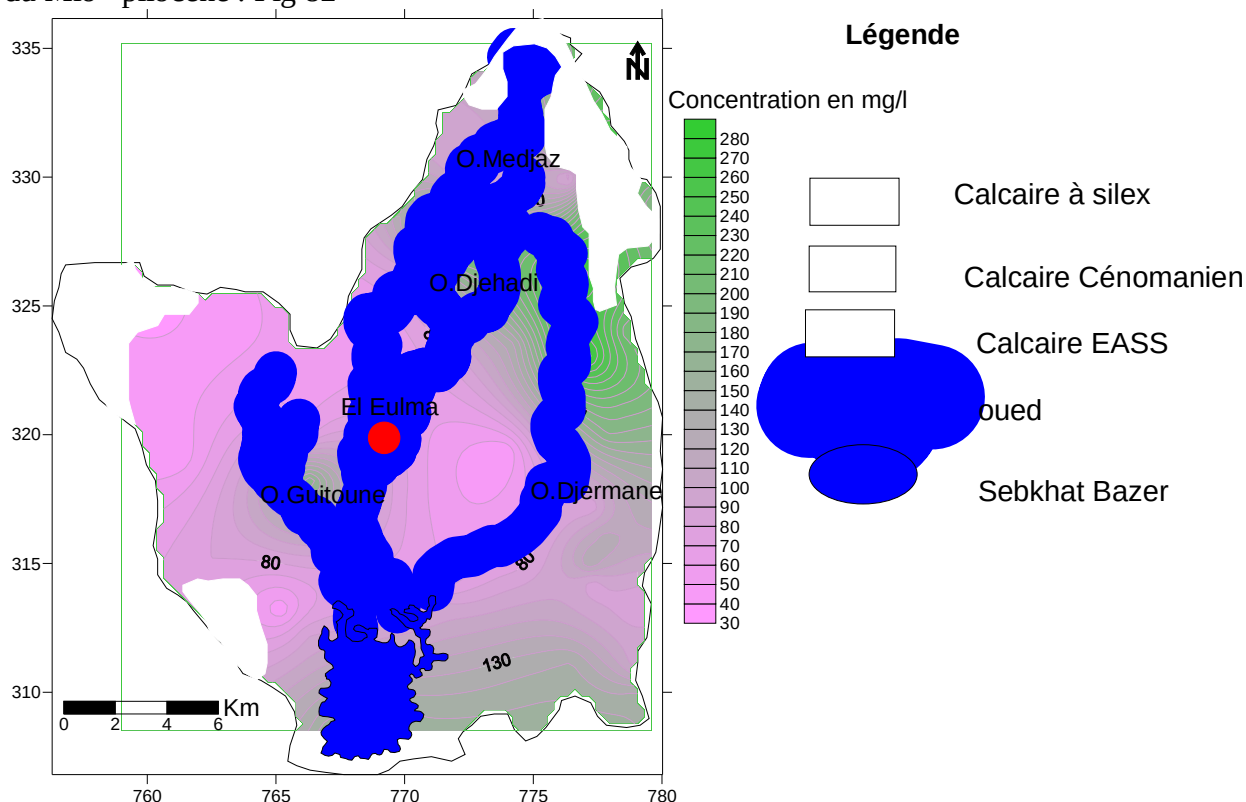


Fig. N° 81: Carte des chlorures basses eaux de la nappe superficiel des argiles sableuses 2006

12-2) Les sulfates.

La variation de la concentration des sulfates varie d'une zone à une autre, généralement liée aux évaporites du Trias et aux crétacé et aux lits gypseuses des argiles qui se trouvent dans les argiles du Mio –pliocène . Fig 82



12-3 Le calcium.

La concentration est élevée dans les zones limitrophes des formations carbonatés , cette est teneur est due au lessivage et la dissolution des calcaires . Fig. 83

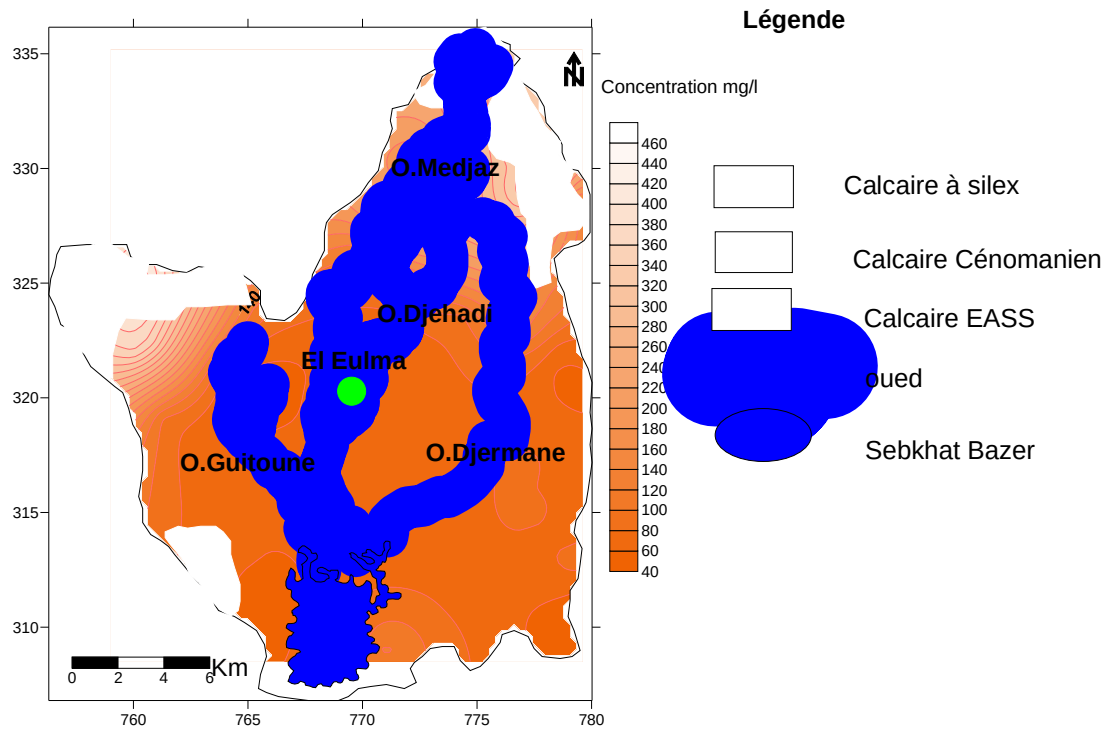
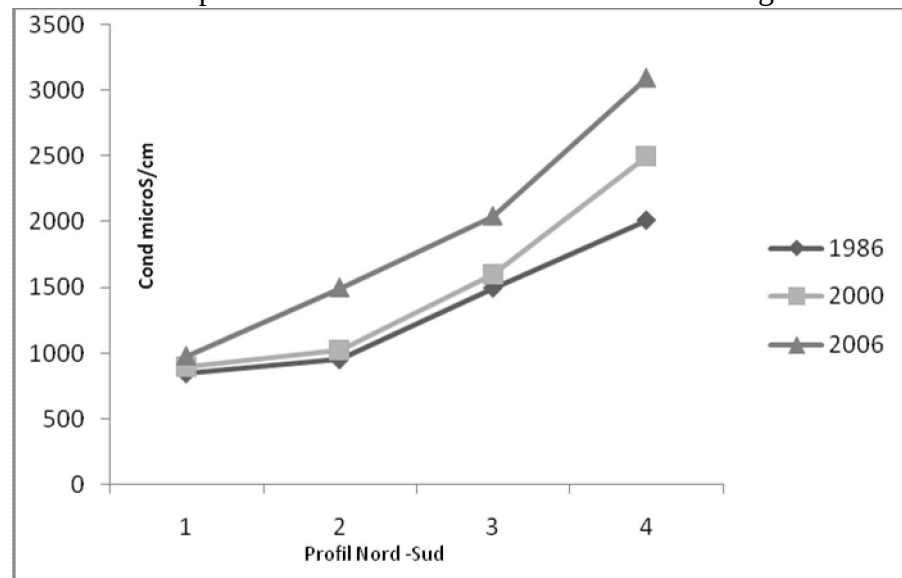


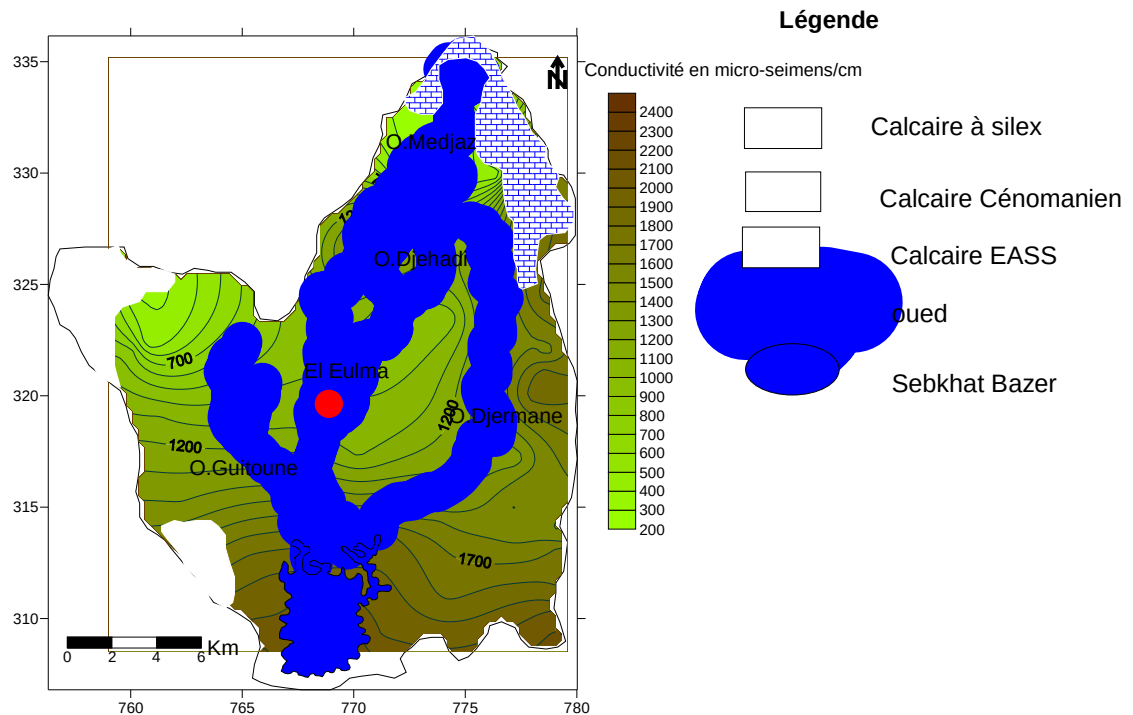
Fig N° 83 : Carte du calcium basses eaux de l'aquifère superficiel des argiles sableuses 2006

13. Etude de la conductivité électrique de l'eau .

La conductivité électrique est généralement liée à la minéralisation, les valeurs mesurées sur le terrain durant la période 2006 montre qu'elle est très élevée au Sud et à l'Est. Ce qui explique que l'augmentation de la minéralisation du Nord au Sud suit le sens d'écoulement. Dans la partie Est, cette minéralisation est liée aux formations gypseuses du Mio –Pliocène alors que ceux du Sud sont liés à la concentration par écoulement et à l'effet de la Sebkhate. Fig 84 et 85



FigN° 84 : Evolution de la conductivité électrique de l'eau selon un profil Nord –Sud entre 1986 – 2000- 2006



14) Le strontium.

Le strontium est un élément lié aux évaporites faiblement intégré dans les carbonates et est peu absorbé par les argiles. C'est un élément trace utilisé pour l'étude des eaux souterraines (Meybek, 1974 ; Bakalowicz 1988). La forte teneur en Sr^{++} dans les eaux s'explique par la dissolution de la célestine (SrSO_4), minérale associée au gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Dans la structure cristalline des carbonates, il remplace le calcium parce que les deux éléments possèdent un rayon ionique voisin. Le rapport ionique en concentrations molaires $\text{Sr}^{++}/\text{Ca}^{++}$ est caractéristique d'une origine évaporitique est supérieur à 1‰ (M. Bakalowicz 1988).

Meybeck, (1974) distingue des ensembles d'évaporites en fonction de la valeur du rapport $\text{Sr}^{++}/\text{Ca}^{++}$:

- Evaporites du trias Alpin sont caractérisés par un rapport molaire de : 10‰.
- Evaporites du trias Pyrénéen sont caractérisées par un rapport molaire de : (3 à 5) ‰
- Evaporites du Crétacé sont caractérisées par un rapport molaire de : (1 à 2) ‰

Le strontium est un indicateur de l'origine du soufre dans les eaux sulfatées, car l'oxydation des composés soufrés libère du soufre mais ne s'accompagne pas d'une mobilisation du strontium (Bakalovicz 1994).

L'utilisation de ce rapport est d'un intérêt important pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes souterrains

14-1) Cartographie du Strontium.

Les fortes concentrations en strontium sont localisées au Nord à Est et au Sud dont l'origine est liée aux formations gypsifères de bordure et à l'effet de la Sebkhât. La répartition du strontium et des sulfates présentent presque la même allure .Fig. 86

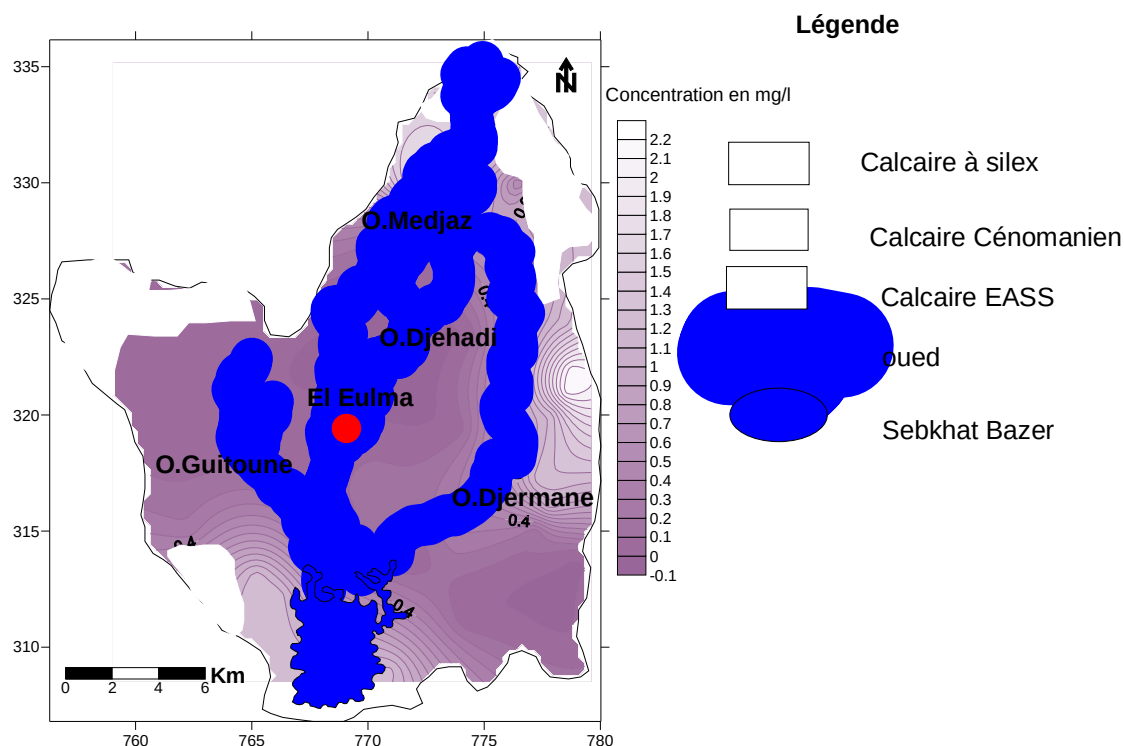


Fig N°85 : Carte du strontium basses eaux de l'aquifère superficiel des argiles sableuses 2006

14-2 Evolution du strontium .

Afin d'examiner l'origine du strontium et son évolution dans l'espace , on tracé une carte de répartition du rapport molaire Sr^{++}/Ca^{++} (Tableau 65). Les plus grandes concentrations sont localisées dans le Nord et à Est et au Sud de la région . Cette répartition est liée à la dissolution des formations évaporitiques . Fig 87

Tableau 65 Rapport molaire

Aquifère	Points d'eau	Sr^{++} mg/l	Ca^{++} mg/l	$Sr^{++}/Ca^{++}\%$
Argiles sableuses	PKM	0.007	100	0.02
	PRL	0.004	63.2	3.16
	PMOA	0.003	92.4	0.01
	PAA	0.057	127.6	0.20
	PKS	0.013	123.4	0.04
	PDM	0.834	157	2.42
	PCB	0.748	263	1.29
	PZK	0.434	144.8	1.24
	PBB	1.674	517.8	1.48
	PTOM	0.018	83.6	0.09
	PBM	0.765	64	5.93
	PTM	0.417	84.4	2.13
	PKN	1.174	80.2	6.73
	PDK	0.064	111	5.55
	PAN	1.217	96.4	5.78

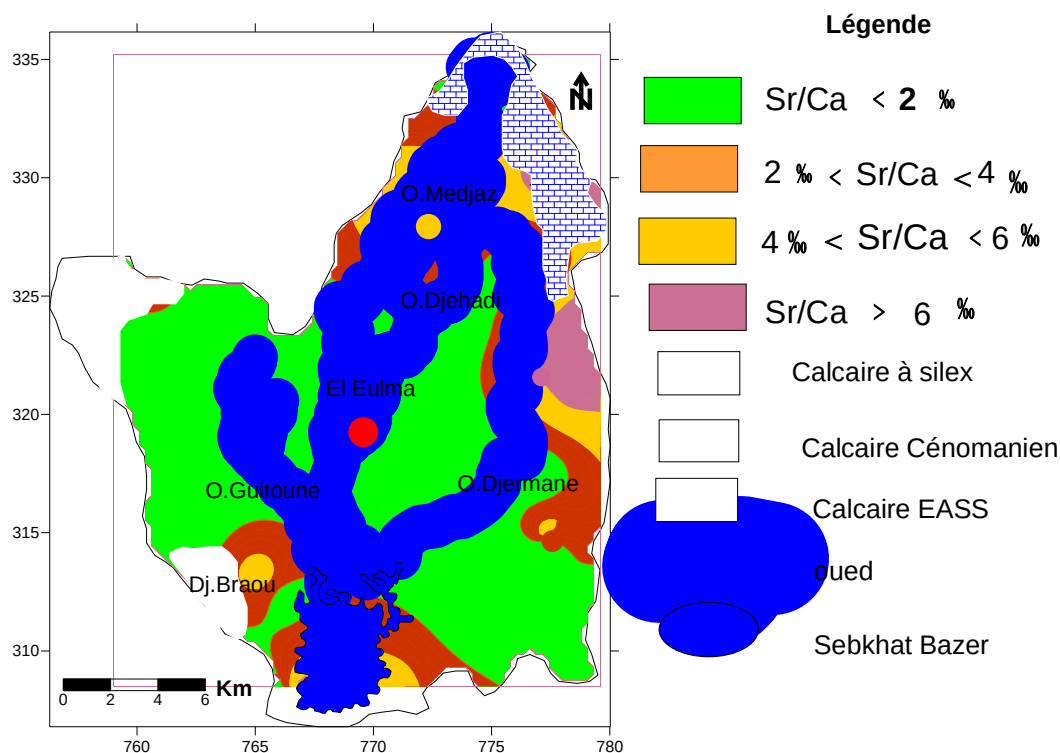


Fig N° 87 : Carte des rapports molaires ($\text{Sr}^{++}/\text{Ca}^{++}$) de l'aquifère superficielle des argiles sableuses 2006

15 Analyse en composantes principales.

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur un tableau de 8 variables (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{+} , K^{+} , Cl^{-} , SO_4^{--} , HCO_3^{-} , NO_3^{-}) et de 59 individus dont les statistiques simple des anions et des cations de la nappe superficielle des sables argileux sont été donnée dans le tableau 66.

L'analyse a été poussée jusqu'à 3 facteurs et 74% de la variance ont pu être exprimés tableau 67 .

Tableau 66 Statistique simple des anions et cations

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca (mg/l)	25,800	785,500	134,296	114,190
Mg (mg/l)	15,000	110,000	39,036	16,692
Na (mg/l)	12,000	1604,600	117,734	109,756
K (mg/l)	1,000	135,000	16,052	14,084
HCO3 mg/l	100,600	695,000	334,185	226,345
Cl (mg/l)	17,800	2750,420	217,047	172,600
SO4 (mg/l)	34,090	292,010	72,610	40,254
NO3 (mg/l)	5,040	175,170	48,814	39,865

Tableau 67 valeurs propres et variance

	F1	F2	F3
Valeur propre	3,775	1,187	1,008
Variabilité (%)	47,192	14,833	12,604
% cumulé	47,192	62,024	74,629

15-1 Matrice de corrélation.

Plusieurs corrélations significatives ont été mises en évidence ainsi ,par 59 couples et à 5% d'erreurs ,le coefficient de corrélation intrique $r_c=0.477$ d'où une liaison significative entre Ca^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4 (tableau 68). Ces différentes liaisons indiquent l'origine évaporitique de ces éléments dans les eaux souterraines comme

$NaCl$, $CaSO_4(H_2O)_2$, KCl

Tableau 68 Matrice des corrélations

Variables	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO ₃ mg/l	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
Ca (mg/l)	1							
Mg (mg/l)	0,297	1						
Na (mg/l)	0,665	0,400	1					
K (mg/l)	0,487	0,229	0,688	1				
HCO ₃ mg/l	0,326	0,138	0,105	-0,008	1			
Cl (mg/l)	0,825	0,492	0,930	0,639	0,076	1		
SO ₄ (mg/l)	0,450	0,270	0,581	0,467	-0,078	0,519	1	
NO ₃ (mg/l)	-0,024	0,010	-0,027	0,117	-0,084	0,005	-0,085	1

15-2 Étude des plans factoriels.

La projection des variables sur les plans factoriels F_1/F_2 explique 62% de la variance avec 47% pour le facteur F_1 et 15% pour le facteur F_2 Fig. 88. Le facteur F_1 est déterminé par deux sous groupes ; Le premier groupe ou évaporitique est représenté par les éléments (Ca^{++} , Mg^{++}) donc carbonaté ou évaporitique alors que le deuxième groupe est représenté par les éléments Na^+ , Cl^- , SO_4 et K^+ donc d'origine évaporitique .L'analyse globale de ces éléments montre une origine salifère ce qui permet de dire que le facteur 1 est le facteur de la minéralisation liée à l'origine salifère .

Le facteur F_2 oppose deux éléments , HCO_3 et NO_3 d'où deux origines possibles des eaux .Une origine superficielle en liaison avec l'activité agricole et une origine profonde en liaison avec les limites à flux imposé entrant à partir des formations carbonatées soit de la nappe de Djemila au Nord ,soit de l'EASS du Sud .

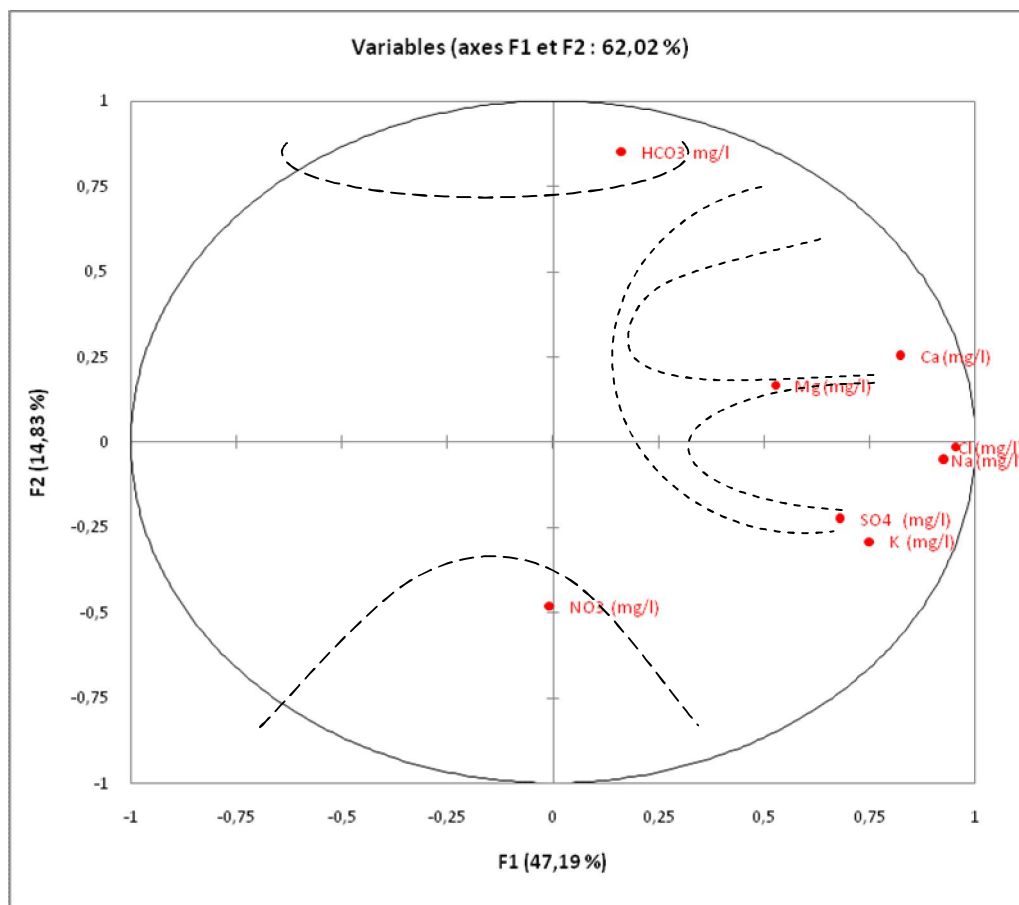


Fig N°88 :Espace des Variables selon le plan F₁/F₂

L'examen du tableau factoriel F₁/F₃ (tableau 69) montre que les nitrates sont bien liées au facteur 3 et donc ce facteur et également celui de la pollution agricole uniquement .Mais la représentation factorielle F₁/F₂ est beaucoup plus parlante que la représentation F₁/F₃ à cause de l'apparition de l'opposition entre les eaux d'origine profonde chose que le facteur 3 permet pas de voir.

Tableau 69 coordonnées des variables

Coordonnées des variables :			
	F1	F2	F3
Ca (mg/l)	0,823	0,251	0,098
Mg (mg/l)	0,527	0,166	0,142
Na (mg/l)	0,927	-0,053	-0,045
K (mg/l)	0,751	-0,292	0,061
HCO ₃ mg/l	0,163	0,851	0,353
Cl (mg/l)	0,953	-0,014	0,024
SO ₄ (mg/l)	0,679	-0,227	-0,345
NO ₃ (mg/l)	-0,007	-0,481	0,854

16 Conclusion.

L'étude hydrochimique des eaux souterraines nous a permis de mettre en évidence les faciès bicarbonatés calciques ,chlorurés calciques ,sulfatés calciques et chloruré sodique ces faciès et cette minéralisation sont liés aux formations gypseuses du Mio-pliocène et à la Sebkha. L'analyse en composantes principales mis en évidence deux origines, l'une superficielle et l'autre profonde.

3^{ème} Partie

Les sources de pollution

1 Introduction :

L'expansion et l'intensification de l'activité humaine sont à l'origine de l'accroissement de la pollution dans les milieux naturels .Cette dispersion peut s'effectuer dans l'atmosphère sous forme d'aérosols et de fumées susceptibles de retomber avec les précipitations atmosphériques pour s'infiltrer à partir du sol avec les lixiviats des déchets en surface ou souterraines .L'épandage des fertilisants et des pesticides en agriculture constituent une source de pollution non négligeable. Toutes ces sources de pollution constituent une menace pour l'environnement d'une manière général et les eaux souterraines en particuliers. La pollution dans la région d'El Eulma, constitue un danger pour la santé humaine, animale et végétal, à cause du développment industriel, l'accroissent de l'activité agricole et le développement de l'urbanisation qui ont abouti à la dégradation de l'environnement.

2 La pollution industrielle.

La pollution industrielle peut être schématisée de la manière suivante Fig 89

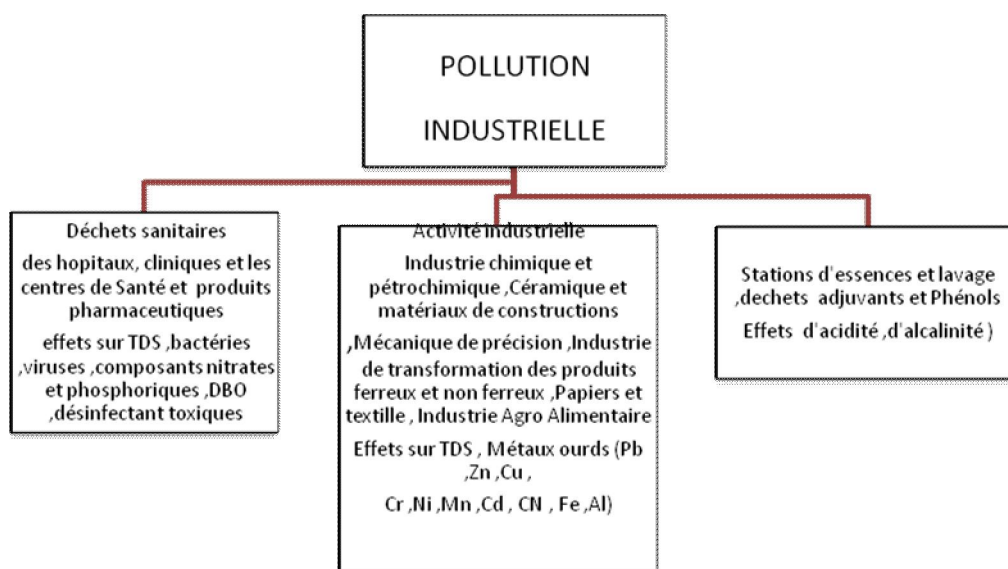


Fig 89 : Sources de la pollution industrielle.

Les rejets des unités industrielles se font directement dans Oued Melah, l'activité du trafic routier, l'utilisation des produits finis des baguettes de soudures, de la peinture, des matériaux de constructions, le plastique, les aérosols et le tabagisme peuvent donner un taux élevé de métaux lourds dans l'environnement. La concentrations en métaux lourds varie d'un éléments a un autre dont les plus importants sont : le Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Fe, Cd. Les métaux lourds ont été analysées afin de mettre en évidence la présence ou non d'une pollution d'origine industrielle. Dont les analyses représentées a l'aide d'un Scattergrams qui montre la variation de la concentration dans les 100 échantillons analysés. Fig. 90, tableau 70

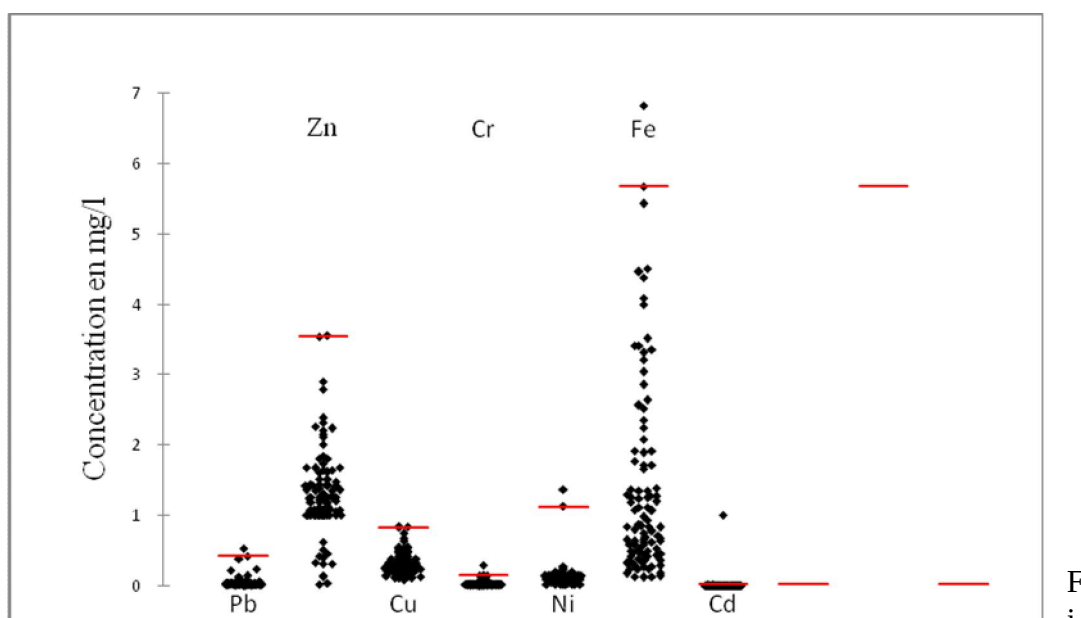


Fig. 90 Scattergrams des métaux lourds

Tableau 70 statistique simple des métaux lourds

Statistiques simples :	mg/l	mg/l	mg/l	
Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Pb	0,004	0,523	0,052	0,036
Zn	0,013	3,562	1,372	0,654
Cu	0,081	0,843	0,324	0,159
Cr	0,002	0,296	0,028	0,019
Ni	0,012	1,375	0,150	0,120
Fe	0,120	6,832	1,394	1,281
Cd	0,001	1,000	0,011	0,008

2-1- Le Plomb .

Le Plomb est un constituant naturel, il est très ré pondu et il est utilisé largement dans l'industrie (Fabrication des batteries). On peut le trouver sous la forme Pb^{++} , $Pb(OH)^+$, $Pb(SO_4)$, $PbCl_n^{2-n}$, $Pb(CO_3)$, $PbBrCl$, $PbBrCl$, $2PbO$, $PbCl_2$, $Pb(OH)Cl$, $PbBr_2$, $PbCl_2$, $2PbO$. Le plomb métallique est thermodynamiquement stable en présence des solutions neutres ou alcalines .On peut le trouver à l'état natif et en solution

acide L'intoxication par le plomb se traduit par les troubles cliniques, des anomalies biologiques et des altérations histopathologiques variés . La carte de répartition du plomb dans la région d'El Eulma montre que les fortes concentrations se trouvent au centre et plus précisément au sud et à l'est de la ville, ainsi qu'au N-W et au Nord de Oued Djermane. Cette distribution est liée à la zone industrielle au trafic routier qui provoque le dégagement des gaz d'échappement qui sont très riche en composés de plomb et à la décharge publique (lixiviats) . Fig 91

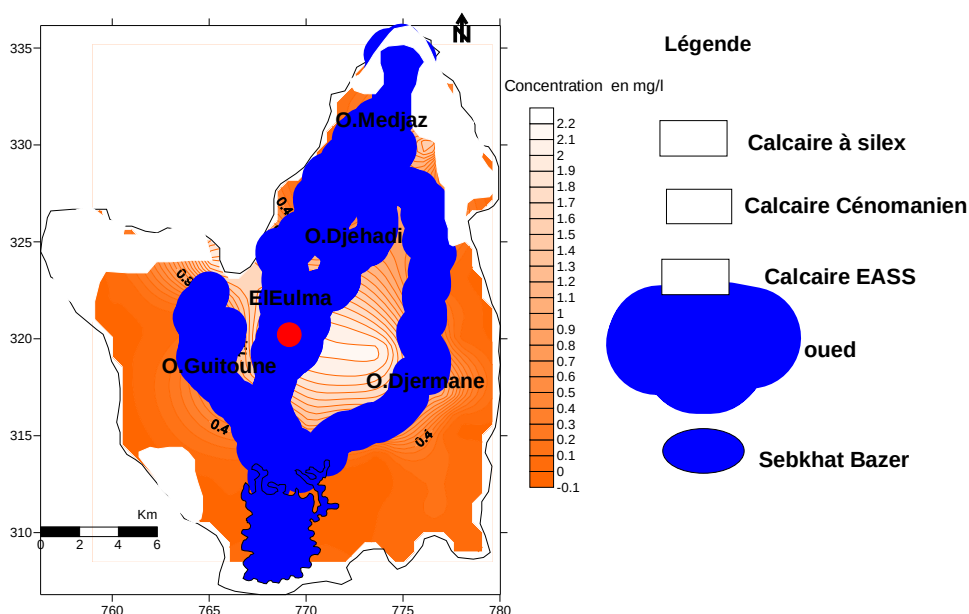


Fig N°91 Carte de répartition du Plomb dans la région d'El Eulma 2006

2--2 Le Zinc

Le Zinc se trouve sous forme de sulfures dont le minéral le plus répandu est le sulfure de Zinc (Blinde) qui est très répandu dans la région sous forme de gisements hydrothermale .le Zinc se trouve sous la forme Zn^{++} , $ZnOH^+$, $ZnSO_4$ et $ZnCO_3$. Se présente comme un métal non noble, n'ayant aucun domaine de stabilité commun avec celui de l'eau .Il se présente très exceptionnellement dans certaines roches. Thermodynamiquement le Zinc est instable en présence d'eau et de solution aqueuses , il tend à se dissoudre avec un dégagement d'hydrogène dans les solutions acides ou neutres ,ou fortement alcalines .Cette réaction souvent extrêmement lente dans le cas ou le est zinc pure. Le Zinc est corrosif pour la peau, irrite le tractus digestif .L'oxyde de zinc (ZnO) peut bloquer les glandes Sébacées et produire un eczéma papulo-pustulaire Le chlorure de Zinc ($ZnCl_2$) exerce une action caustique sur la peau.

Le Zinc est un élément chimique dont la distribution est identique à celle du plomb .Les fortes concentrations se trouvent au centre et au N-W de la région. L'origine du Zinc est probablement due a la présence des unités industrielle qui utilise les bains du Zinc de E.N.A. M.C et Trefisoud, la minéralisation naturelle est très importante dans les formations géologiques de la nappe Djemila confirmée par nos analyses géochimiques. Fig. 92

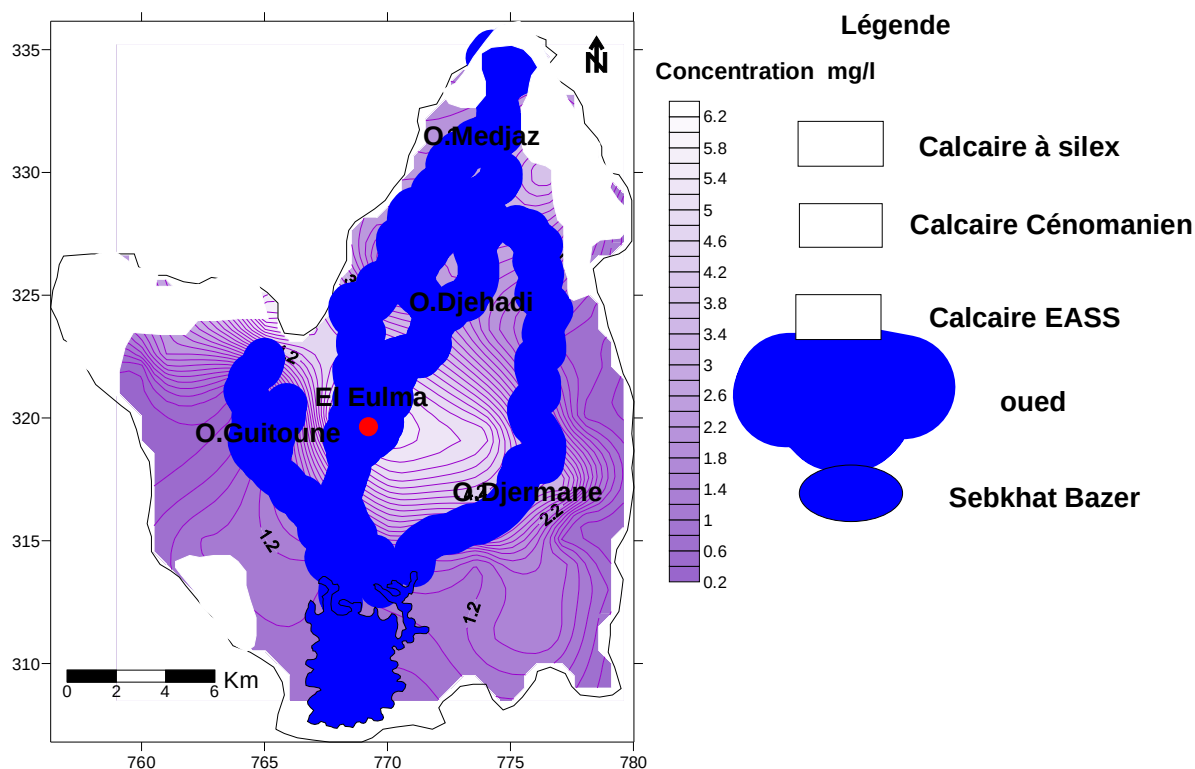


Fig N° 92 Carte de répartition du Zinc dans la région d'El Eulma 2006

2-3 Le Chrome.

Le Chrome est présent en petite quantité dans la nature, il est plus important dans les roches basiques que dans celle de type siliceux .C'est un amphotère qui peut se présenter sous plusieurs formes CrO_4^{2-} , $\text{Cr}(\text{OH})_3$, Cr^{++} , Cr^{3+} , Cr^{6+} .

Le Chrome se présente comme un métal très peu noble, son domaine de stabilité étant situé au –dessous de celui de l'eau et il apparaît moins noble que le Zinc.

Les propriétés chimiques et électrochimiques du chrome montrent que ce métal se comporte comme s'il existait sous deux états nettement différents . L'état actif ou il apparaît comme un métal extrêmement corrodable et un état passif ou il se comporte comme un métal noble .L'état actif est produit par le contact du métal avec les solutions réductrices, avec des solutions de HCl ou de H_2SO_4 , ou par polarisation cathodique .L'état passif est produit par le contact avec les solutions oxydantes et par polarisation anodique en solution non chlorurée. On peut passer d'un état à l'autre par modification des propriétés oxydo-réductrices des solutions ou par inversion de la polarisation dans le sens prévu par les conditions de formations. Dans les diagrammes d'équilibre, les composés du Chrome trivalent sont très stables . L'ion chromique (Cr^{+++}) , de couleur verte ,est réductible en ion chromeux (Cr^{++}) bleu vert et oxydable en acide chromique orangé .En solution acide ,cette oxydation est réalisable par ébullition des solutions chromique avec l'acide nitrique ou avec le chlorate de potassium .En milieu faiblement acide ou neutre ,elle est réalisable par ébullition avec le bioxyde de manganèse fraîchement précipité ,ou avec le permanganate de potassium .L'anhydrite chromique CrO_3 , cristallisant en aiguilles rouges rhombiques, est très soluble dans l'eau. Ses solutions présentent un pouvoir oxydant énergétique. Dans les diagrammes d'équilibre la réduction de l'acide chromique ou des chromates peut conduire, selon le pH des solutions, à la formation des sels chromiques.

Les bains utilisés dans le chromage sont généralement à base d'acide chromique (ou le chrome est hexa valent) et d'acide sulfurique .Le Chrome peut être obtenu électrolytiquement à partir de solution acide de chromates. Dans la nature ,le chrome on le trouve dans les roches magmatiques ultrabasiques pauvre en silice sous forme de (Chromite, de picatite et de serpentine) on peut trouver d'autres minéraux en traces comme le pyroxène, l'épidote, la chlorite et le grenat (Rapporté par Debieche 2002).

Le chrome est présent dans la région d'El Eulma avec des concentrations élevées, au centre de la région là où l'activité industrielle est très importante .On peut trouver dans cette région de la galvanoplastie, des aérosols, l'industrie de la peinture, la présence de tannerie, le trafic routier et la décharge publique sauvage.Fig 93

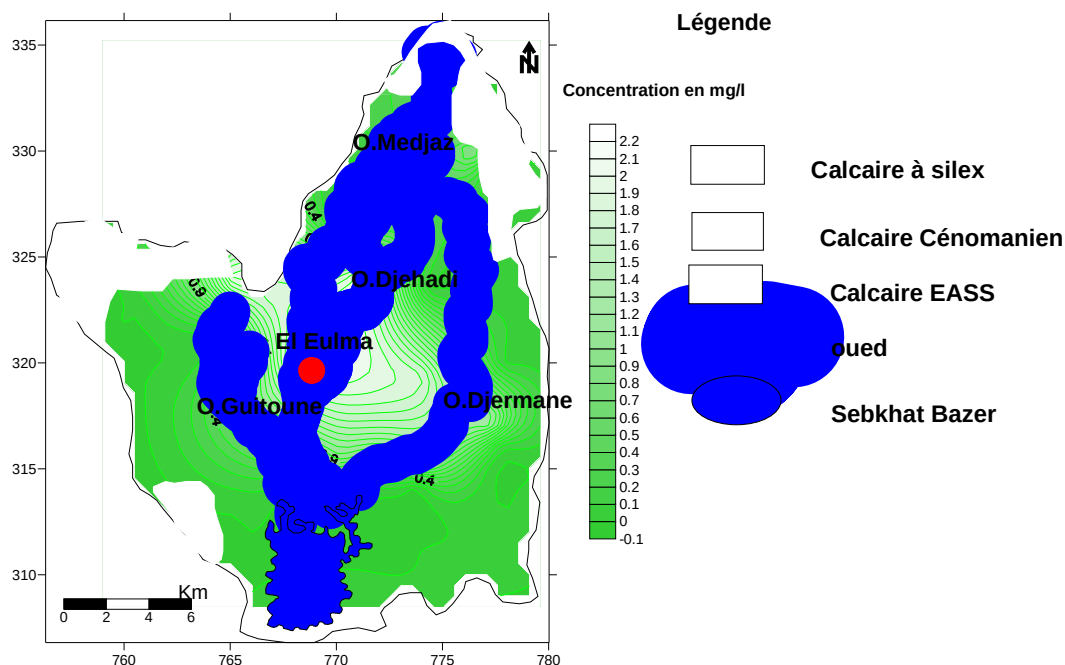


Fig N° 93 Carte de répartition du Chrome dans la région d'El Eulma 2006

2-4 Nickel .

Le nickel est considéré comme un métal légèrement noble. Son domaine de stabilité thermodynamique a une zone commune réduite avec le domaine de stabilité de l'eau. Le nickel se trouve dans les sols pauvres en silice, associé aux silicates hydratés. Dans l'industrie est très utilisé contre la corrosion des pièces métallique et dans le traitement avant le chromage. La concentration en nickel ne dépasse pas 1mg/l. il se présente sous la forme Ni^{++} et $NiSO_4$. L'emploi des sels de nickel dans l'industrie provoque une dermite, il est cancérogène surtout dans les fosses nasales et les poumons par inhalation.

La répartition du nickel dans la région d'El Eulma est identique à celle des autres éléments traces. Les fortes concentrations sont localisée dans le zone N-W plus précisément dans la décharge public est ses environs suite à la lixiviation des déchets qui sont très riche en Nickel et au centre de la plaine Fig. 94 .

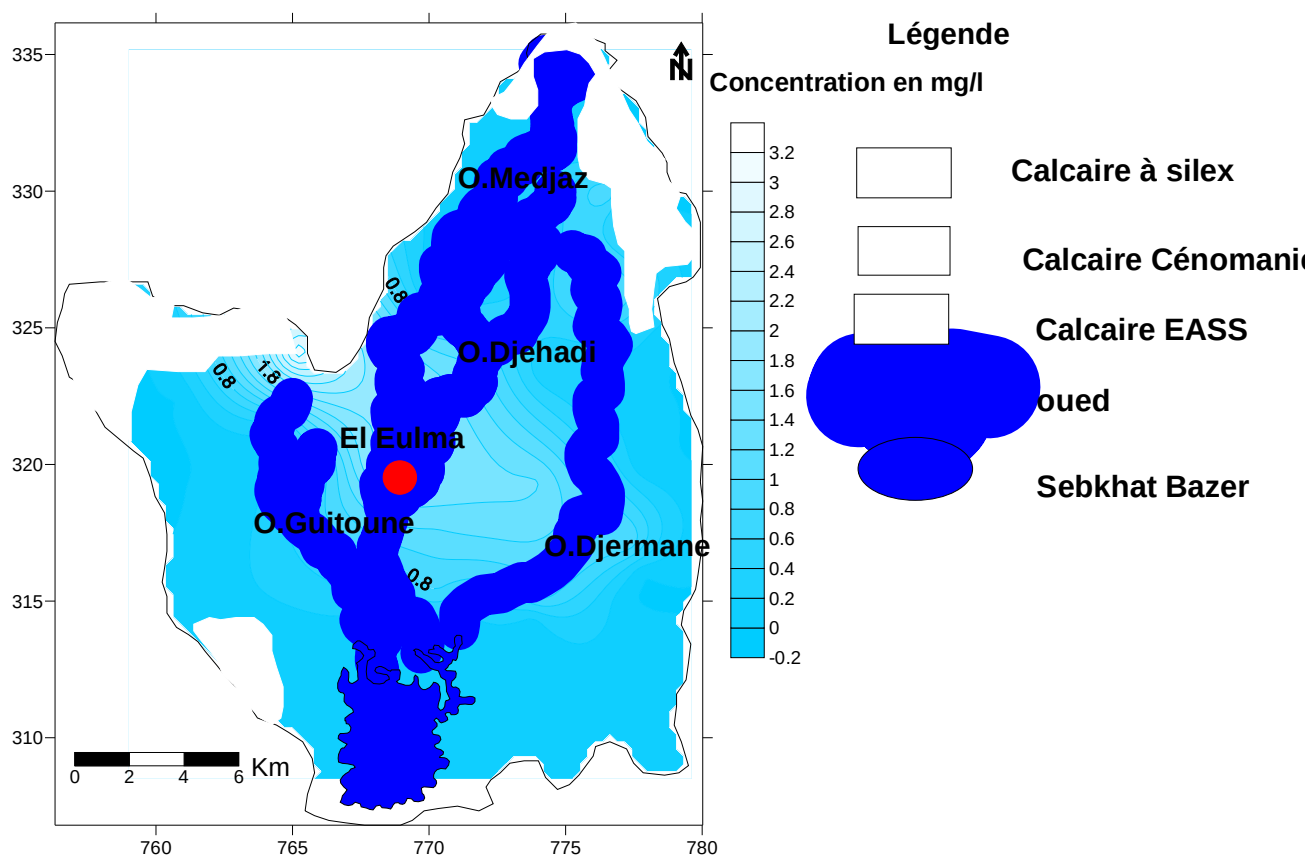


Fig N ° 94 Carte de répartition du Nickel dans la région d'El Eulma 2006

2-5 Le Cadmium.

Le Cadmium est un métal blanc, ductile, malléable de densité 8.65 dont le point de fusion est de 321°C et le point d'ébullition à 778°C. Ses minerais sont étroitement liés à ceux du zinc et du plomb, il constitue un sous produit de l'industrie du zinc et du plomb. Utilisé dans le cadmiage des métaux (fer, acier, et cuivre), utilisé comme pigments dans la peinture et stabilisant dans l'industrie des matières plastiques, présent dans les engrais phosphatés, dans les aérosols et plus particulièrement dans la fumée des cigarettes. Le domaine de stabilité du cadmium coïncide pratiquement avec la limite inférieure du domaine de stabilité de l'eau sous la pression atmosphérique. L'oxydation du cadmium en milieu acide ou neutre provoque la formation de l'ion bivalent Cd^{++} incolore, lequel se transforme en $Cd(OH)_2$ blancs lors de l'augmentation du pH de la solution. Absorbé par les voies respiratoires et digestives et s'accumule dans les poumons, les reins, le foie, le pancréas, la glande thyroïde, les testicules et les glandes salivaires. Dans le cas des intoxications aiguës, il peut avoir une origine alimentaire ou industrielle surtout dans la fabrication des accumulateurs, des sels de cadmium et chez les ouvriers qui prenaient un repas après avoir manipulé des bâtons de soudure au cadmium. Il survient alors un épisode de gastro-entérite avec crampes épigastriques, vomissements, diarrhées et myalgie. Par inhalation on estime la mortalité dans le cas d'intoxication aiguë par les fumées d'oxydes de cadmium et une irritation pulmonaire avec dyspnée, cyanose et toux. Dans le cas des intoxications chroniques les dents jaunes cadmiques constituent un signe

clinique très caractéristique pour la dentition chez les fumeurs .Les troubles respiratoires entraînent une diminution de l'odorat, l'apparition de rhinites et de bronchites. Lors des troubles rénaux il apparaît dans l'urine des protéines de faible concentration qui précèdent les troubles respiratoires et osseux. Dans le cas d'une intoxication très avancée, il apparaît une ostéomalacie avec une douleur dans le bassin et les membres inférieurs. Le cadmium provoque également le cancer de la prostate. La distribution du cadmium dans la région d'El Eulma est caractérisée par une concentration élevée dans le centre et dans les zones limitrophes de la ville et au alentour de la décharge publique . Cette concentration est due au nombre de véhicules qui transitent la ville , aux matériaux de constructions , a l'utilisation du plastique , à la présence des unités de production des détergents de peinture , d'aérosols et à la fertilisation par les engrais Fig. 95

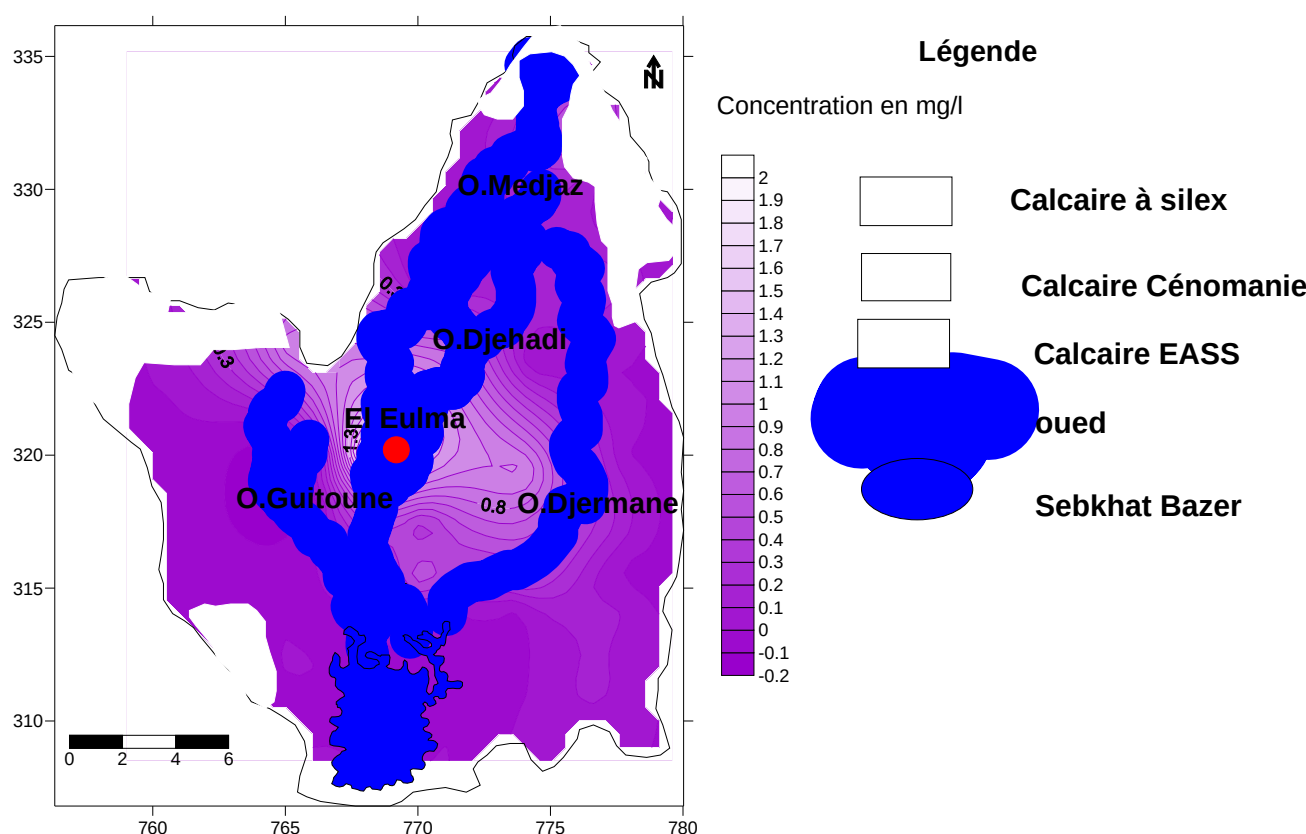


Fig N ° 95 Carte de répartition du Cadmium dans la région d'El Eulma 2006

2-6 Le Fer.

Très répandu, le fer se classe au 4^{ème} rang des éléments de la croûte terrestre, il est utilisé en métallurgie comme est le cas de TREFISOUD, AMC El Eulma. A l'état ferreux, il est soluble dans l'eau et il précipite à la suite du départ de l'anhydrite carbonique et par oxydation à l'air .il est stable thermodynamiquement à 25°C et sous la pression atmosphérique. Il n'a aucune partie commune avec le domaine de stabilité de l'eau. Instable en présence de l'eau et de nombreuses solutions aqueuses non oxydantes, le fer se corrode avec un dégagement d'hydrogène .La toxicologie du fer est liée à l'absorption des sulfates de fer chez l'enfant. Les fortes concentrations du fer dans les eaux souterraines sont localisées dans le centre de la région et à W et au Nord du bassin versant de la région. Les fortes concentrations sont probablement liées à la zone industrielle et la décharge publique au N-W de la ville El Eulma

.On peut expliquer cette concentration élevée par le nombre élevée du trafic routier et des aérosols .Dans le nord de la région la présence du fer dans les eaux est expliqué par la présence de la minéralisation de la pyrite ,goethite et hématite confirmé par nos analyses géochimique . Le drainage superficiele peut entrainer le fer en surface avec l'enrichissement du sol . Fig. 96

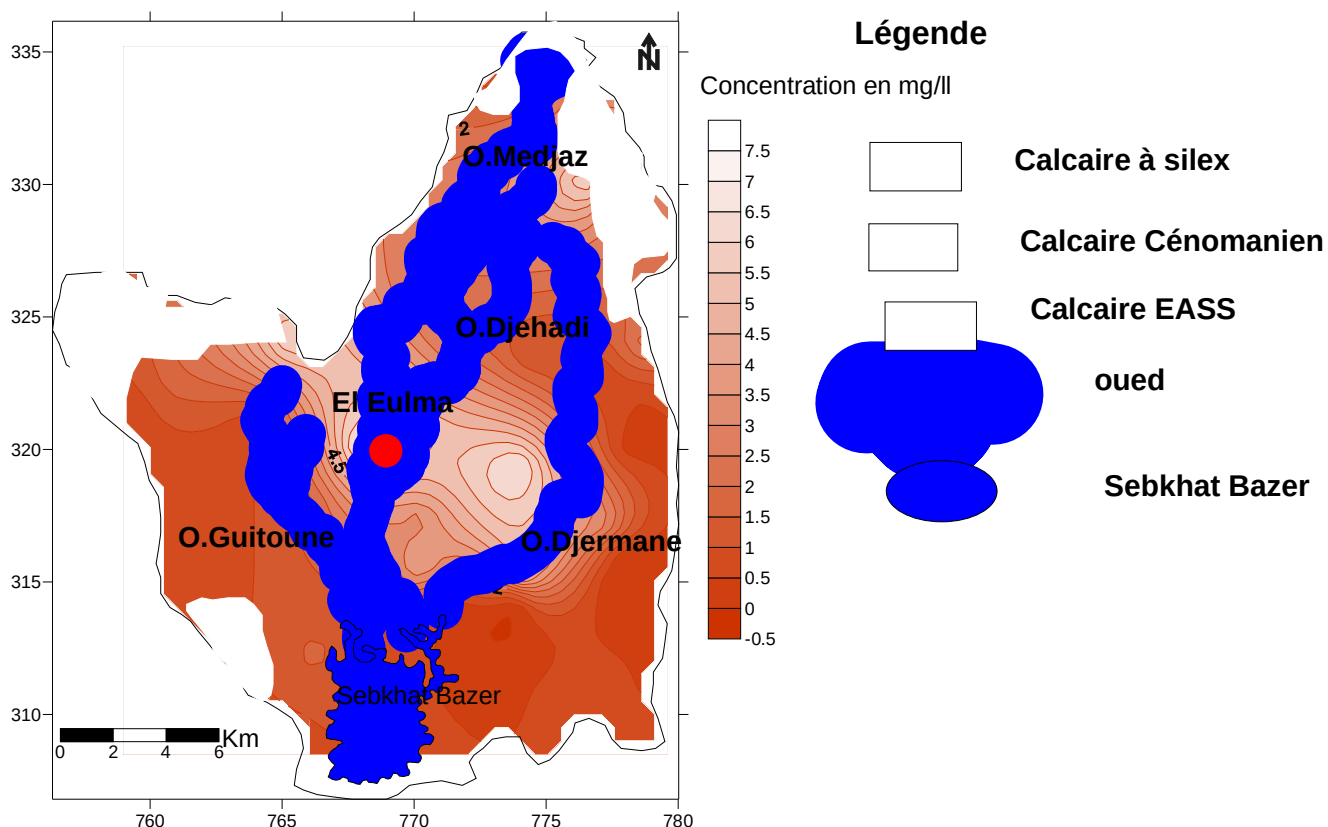


Fig N° 96 Carte de répartition du Fer dans la région D'El Eulma 2006

2-7 Le cuivre.

Le cuivre est présent dans la nature sous forme de minerai de cuivre natif, d'oxydes ou de sulfures .Il peut se présenter sous les formes suivantes : Cu^{++} , CuCl^+ , CuSO_4 , CuOH^+ , CuCO_3 . L'ingestion des sels de cuivre (CuSO_4) induit une inflammation intense du tractus gastro intestinale accompagné de douleurs, de vomissements ,de diarrhées, des convulsions, de nécrose hépatique et rénale .L'inhalation des sels de cuivre engendre une irritation des voix respiratoires. Les fortes concentrations du cuivre sont localisées au centre de la région en liaison avec l'activité industrielle le trafic routier et les aérosols .Fig. 97

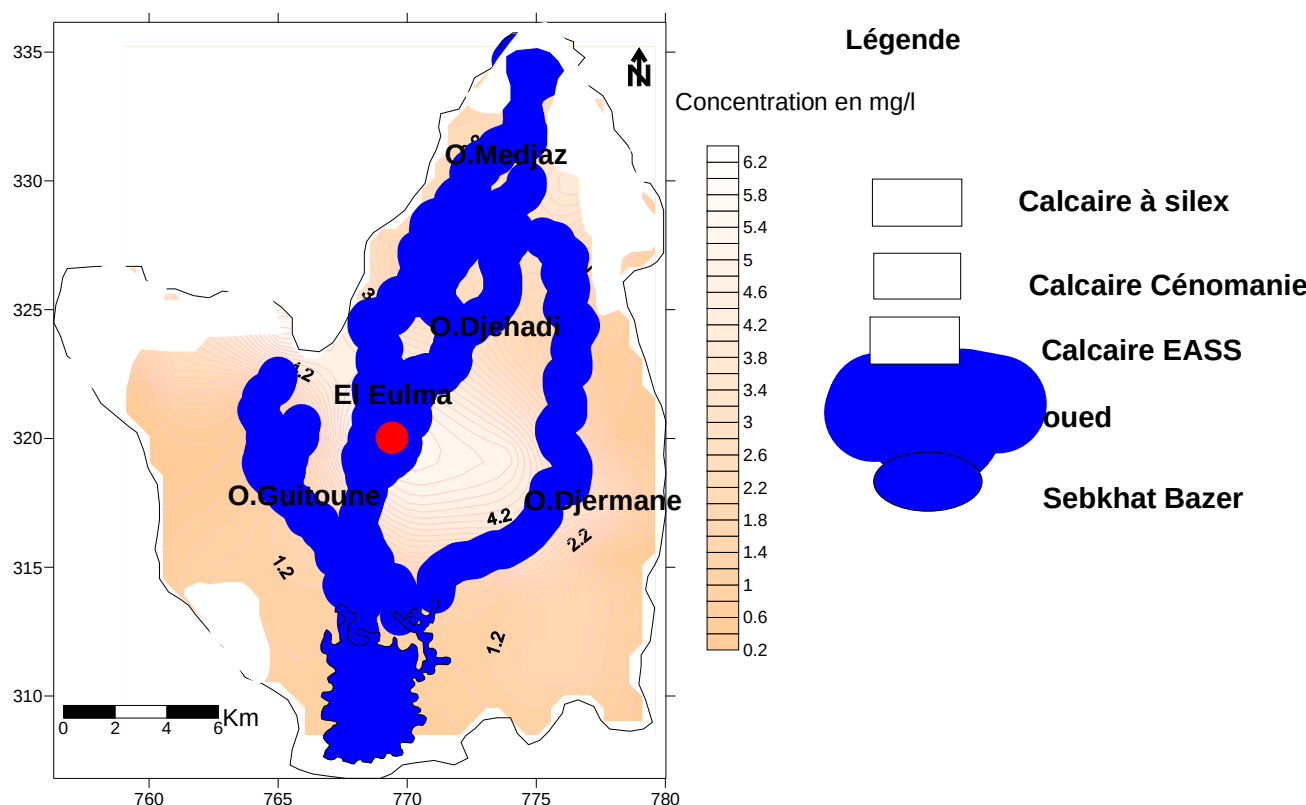


Fig N ° 97 Carte de répartition du Cuivre dans la région d'El Eulma 2006

2-8 Les phénols .

Les phénols est un ensemble de composés hydroxylés de benzène ses dérivés sont :le pyrocatérol ,le résircinol , l'hydroquinol .Ils ont pour origine les rejets industriels ,les stations de lavage ,des stations d'essences et la dégradation de la matière organique . Les phénols provoquent des intoxications aigue et chroniques avec des troubles digestifs ,respiratoire ,nerveux ,rénale , hépatique ,cutanée ,oculaire et l'ochronose. La concentration des phénols est très élevé dans les eaux de surfaces le long des oueds Goutali et Medjaz .Dans les eaux souterraines la concentration est élevée dans les zones ou il ya rejets des eaux des stations de lavage au centre ville et à ouest de la ville d'El Eulma .Fig. 98

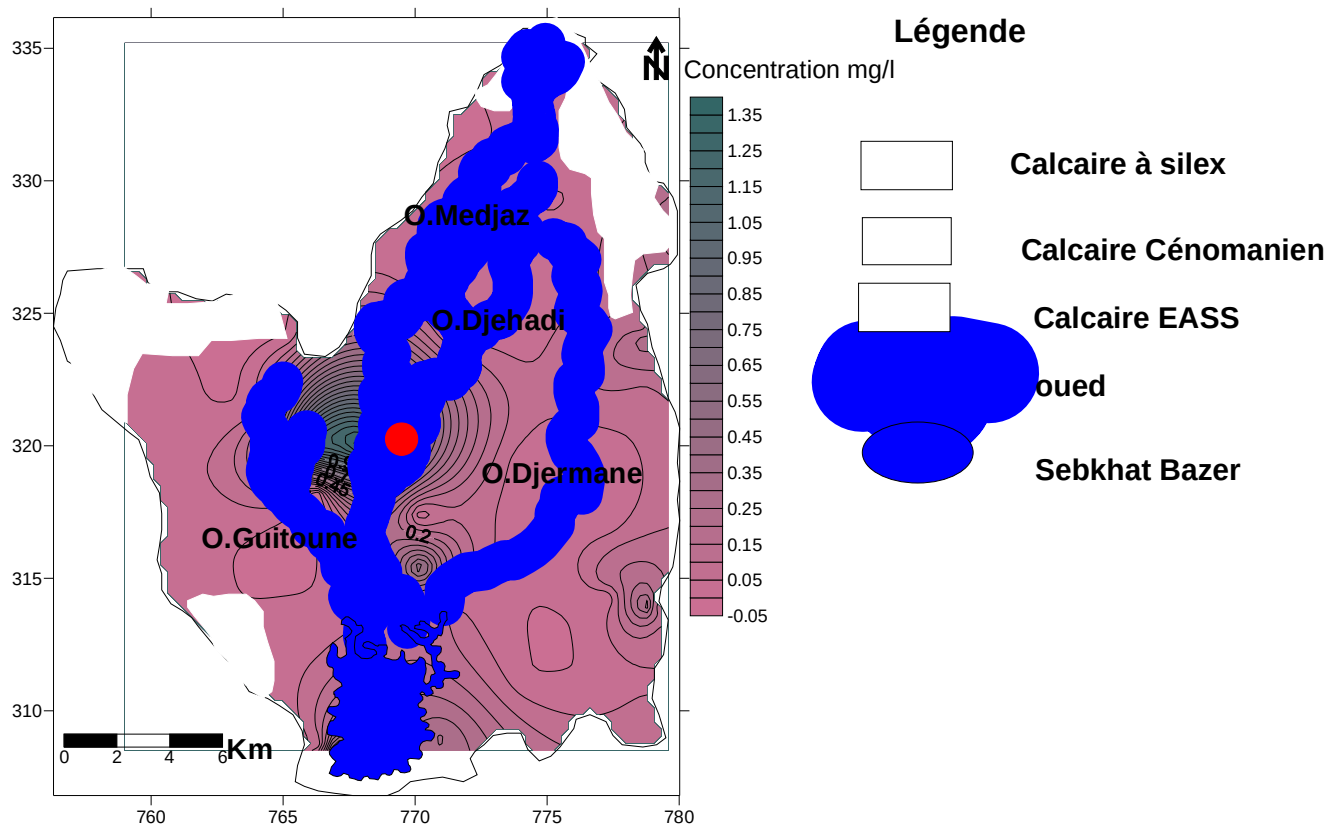


Fig 98 Carte de répartition des phénols dans la région d'El Eulma 2006.

2-9 Le Manganèse.

La présence du manganèse dans la croûte terrestre est au environ de 0.1% , présent avec les silicates et l'oxyde de fer .Transporté facilement par l'eau souterraines riche en acide carbonique soufré et humique .Le manganèse se présente sous forme de Mn^{++} , $MnSO_4$, $Mn(OH)_3$.Le manganèse s'accumule dans le foie ,se fixe dans le cerveau et les reins .C'est un oligo élément indispensable à l'organisme et la photosynthèse des plantes .La concentration élevé du manganèse est localisée dans le centre de la plaine et au N -W en relation avec la zone industrielle et la décharge public Fig. 99 .

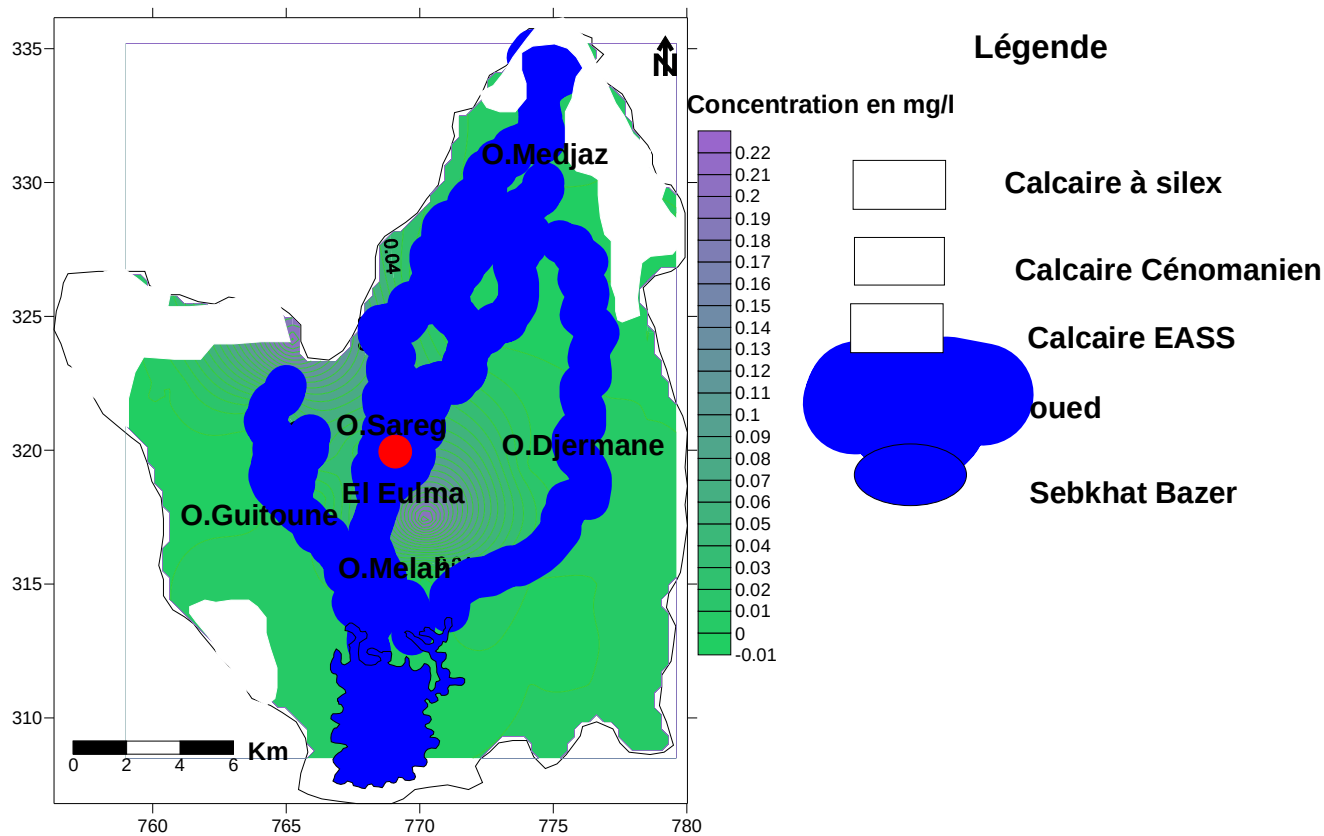


Fig. 99 Carte de répartition du manganèse dans la région d'El Eulma 2006

3 Trajet des métaux lourds dans l'environnement

Après avoir traité les métaux lourds les plus importants et leur répartition spatial dans la région d'El Eulma on présente .Leur trajet dans l'environnement qui est caractérisé par un piégeage dans le sol sous formes éléments métalliques traces puis véhiculé vers les eaux souterraines (Fig. 100). Elles peuvent être assimilées par les plantes .Lorsque les teneurs en métaux lourds augmentent dans le sol, les teneurs augmentent aussi dans les plantes .Le transfert des métaux lourds des sols aux plantes peut s'évaluer à l'aide du facteur de transfert (F), définie comme le rapport de la concentration des métaux lourds dans les plantes sur la concentration des métaux lourds dans le sol (les deux concentrations étant relatives à la masse sèche).

$$F = \frac{\text{Concentration du métal dans la plante}}{\text{Concentration du métal dans le sol}}$$

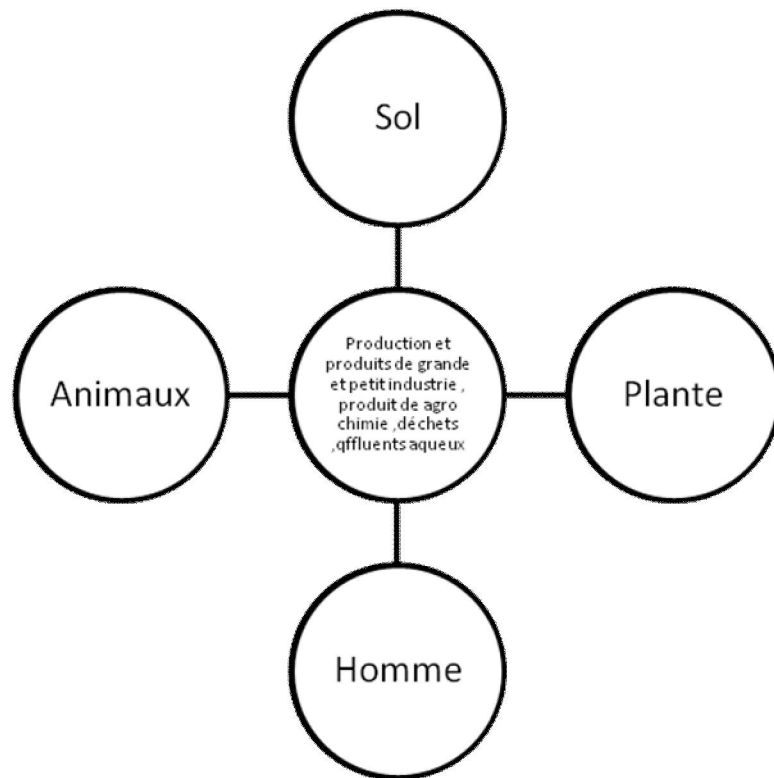


Fig N°100 Trajet des métaux lourds dans l'environnement

4 Pollution agricole.

4-1-Introduction

Activité agricole permet la production des produits alimentaires, pour la survie des animaux et des humains. Or l'intensification et l'amélioration de la production pousse les agriculteurs à utiliser plus d'engrais azoté et plus de produits phytosanitaires (Pesticides, Insecticides, Fongicides).

En plus des composants naturels des sols, les produits phytosanitaires contribuent à fertiliser le sol afin d'aboutir à une meilleure production. L'interaction sol-eau d'irrigation ou de précipitation, véhicule les composants des fertilisants vers la nappes via le sol. L'azote et le phosphore circulent dans la biosphère entre le milieu abiotique et les organismes vivants, qui les retournent au sol. Réalisant un cycle appelées cycles biogéochimique qui se divise en deux sous cycles : l'un de type gazeux dont l'atmosphère constitue un grand réservoir et l'autre de type sédimentaire dont les roches minéralisées constituent le plus grand réservoir.

4-2- Le Cycle de l'azote :

Le cycle de l'azote est un processus de transformation de l'azote atmosphérique (N_2), un gaz inerte, en une forme assimilable pour les systèmes biologiques qui les restitueront à l'atmosphère sous forme de (N_2). Le cycle de l'azote est unique, car, même si l'azote constitue 80% de l'atmosphère terrestre, il se trouve surtout

sous forme gazeuse (N_2) qui ne peut être utilisée telle quelle par la grande majorité des organismes. Dans l'atmosphère, l'azote existe principalement sous forme d'azote gazeux, d'oxydes d'azote (N_2O , NO , NO_2) et d'ammoniac (NH_3). L'azote gazeux peut être produit par la dissociation d'oxyde nitreux (N_2O) et être détruit par suite de sa conversion en monoxyde d'azote (NO) par les décharges électriques lors des orages. L'oxyde nitreux (N_2O) peut également interagir avec un atome hautement réactif d'oxygène pour former NO et le dioxyde d'azote (NO_2). Un excès d'éléments nutritifs dans un écosystème peut entraîner une prolifération de la végétation et des modifications de la biodiversité. De plus, l'ammoniac, les nitrates et les nitrites sont toxiques pour les animaux aquatiques et terrestres, y compris l'homme, lorsque leurs concentrations dépassent les besoins. Ces derniers peuvent à leur tour réagir avec la vapeur d'eau pour former de l'acide nitrique (HNO_3). Une réaction entre deux radicaux ammoniac et hydroxyde ($OH^\cdot$) peut également entraîner la formation d'oxydes d'azote.

Pour que l'azote circule dans le sol et la végétation, il faut que l'azote atmosphérique inerte soit converti en azote réactif. Avant l'industrialisation, il n'existait que deux processus de transformation de l'azote gazeux inerte en azote réactif : la fixation biologique de l'azote et la foudre qui entraîne la production de monoxyde d'azote. L'azote présent dans les sols, dans l'eau ainsi que dans le matériel animal et végétal était restitué à l'atmosphère par dénitrification. L'ammoniac était également libéré par volatilisation à partir de la végétation, des sols et des déchets d'origine animale, sous la forme d'un sous-produit de la décomposition, et par suite de la combustion de biomasse. Les feux de forêts, la combustion du charbon, produits pétroliers et le gaz, les produits d'échappement des voitures et les eaux usées provoquent une pollution des eaux de surface, souterraine, le smog urbain, le réchauffement suite à l'effet de serre et les pluies acides. Fig. 101

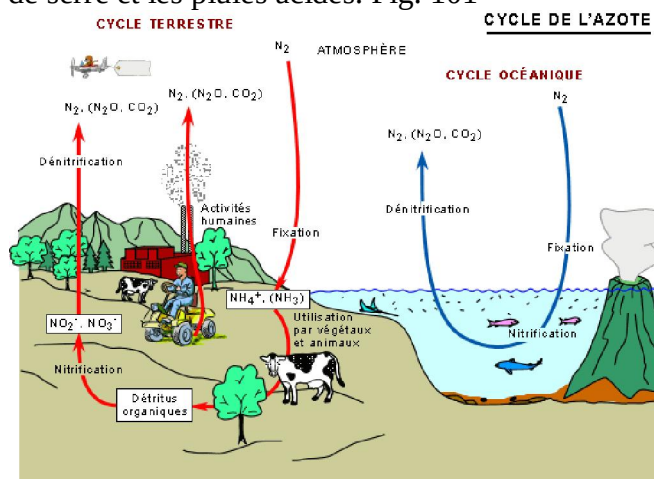


Fig N°101 Le cycle de l'azote dans la nature

4-3 Les formes d'azote dans la nature .

l'azote se présente dans la nature sous forme d'ammoniac non ionisé ,de nitrates ,d'acide nitriques ,de nitrites ,et d'oxydes d'azotes .Il est présent dans l'eau le sol et l'air sous l'états aqueux ou gazeux .(Bliefert . 2003) ,tableau 71

Tableau 71 les formes de l'azote dans l'environnement

Nom de composé	Symbole	Composante de l'environnement	L'état
Ammoniac non ionisé	NH_3	eau, sol, air	aqueux
Ammoniac ionisé	NH_4^+	eau, sol, air	Aqueux, gazeux
Nitrates	NO_3^-	Eau, sol, air	aqueux
Acide nitrique	HNO_3	air	aqueux
Monoxyde azote	NO	air	gazeux
Nitrite	NO_2^-	eau, sol, air	aqueux
Dioxyded'azote	NO_2	air	gazeux
Acide gazeux	N_2	eau, sol, air	gazeux
Oxydes d'azote	$\text{NO}, \text{NO}_2, \text{N}_2\text{O}$	air	gazeux
$\text{NO} + \text{NO}_2$	NO_x	pluie acide, air	gazeux, aqueux
Oxyde nitreux	N_2O	eau, sol, air	gazeux

4-4 Discussion des résultats.

Le suivit des analyse des échantillons des eaux souterraines durant la période allant 2002 -2006 en période de basses et hautes eaux de 100 points d'eau des différentes aquifères de la région d'El Eulma a montre évolution progressive de la concentration des nitrates dans les eaux souterraines de l'année 2002 -2006.

Au mois de mars 2002 , la forte concentration est dans le N-W, au centre est au S-E, cette répartition est due probablement a l'intensification de l'utilisation des engrais , les eaux fosses septique et à l'élevage. Fig. 102

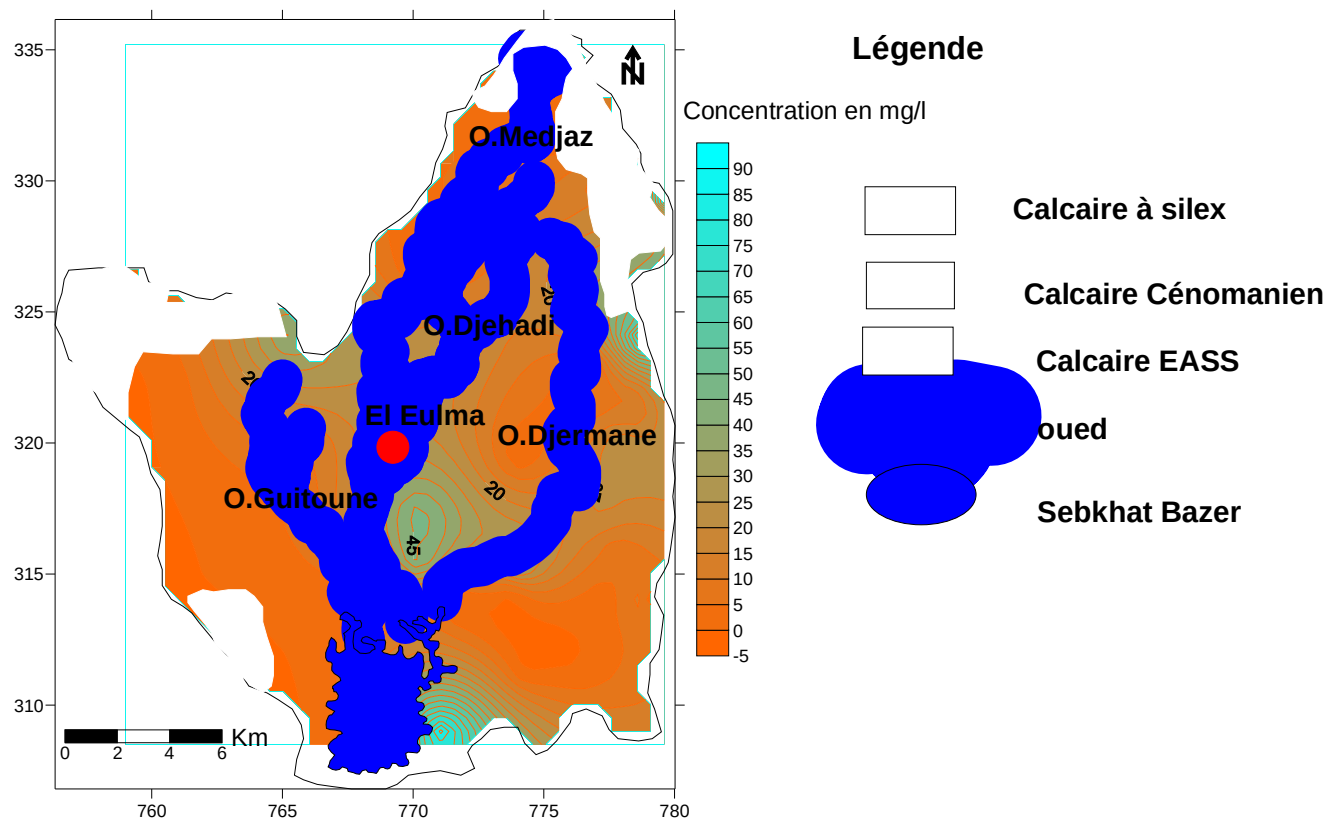


Fig N ° 102 Carte des nitrates 2002

Au mois de mars 2004, on constate l'apparition de forte teneur au sud et à l'approximité de Sebkhath Bazer, cette évolution est due à l'intensification de l'utilisation des engrais et aux rejets des eaux usées de la ville d'El Eulma. Fig. 103 et 104.



Fig 103 Sebkhath Bazer avec rejet des eaux usées

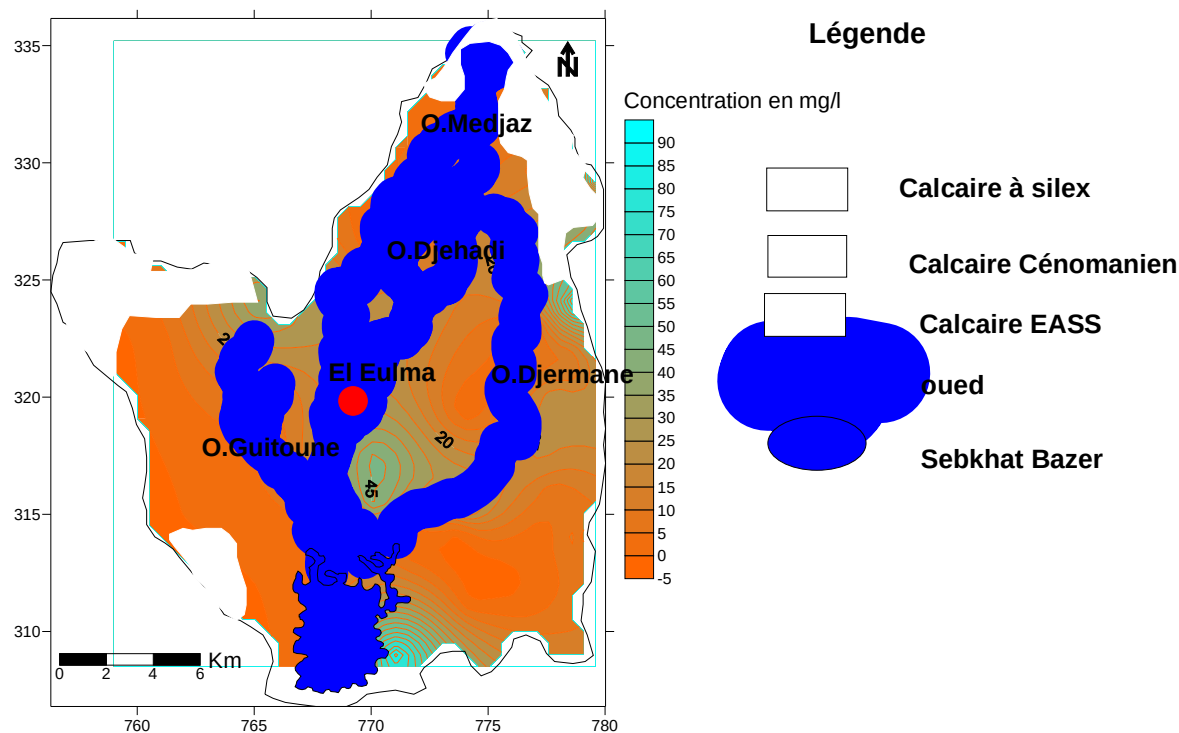


Fig N °104 Carte des nitrates 2004

Au mois de mars 2006 La concentration se développe tout le long de Oued Djermane au Nord est au Sud de la région .Cette augmentation est probablement due à la présence d'une grande cimetière Fig. 105 , le développement de l'élevage des bovins ,des ovins et le volaille, l'intensification de l'utilisation des engrais et les produits phytosanitaires .Fig. 106



Fig 105 Cimetière au Nord de la ville d'El Eulma

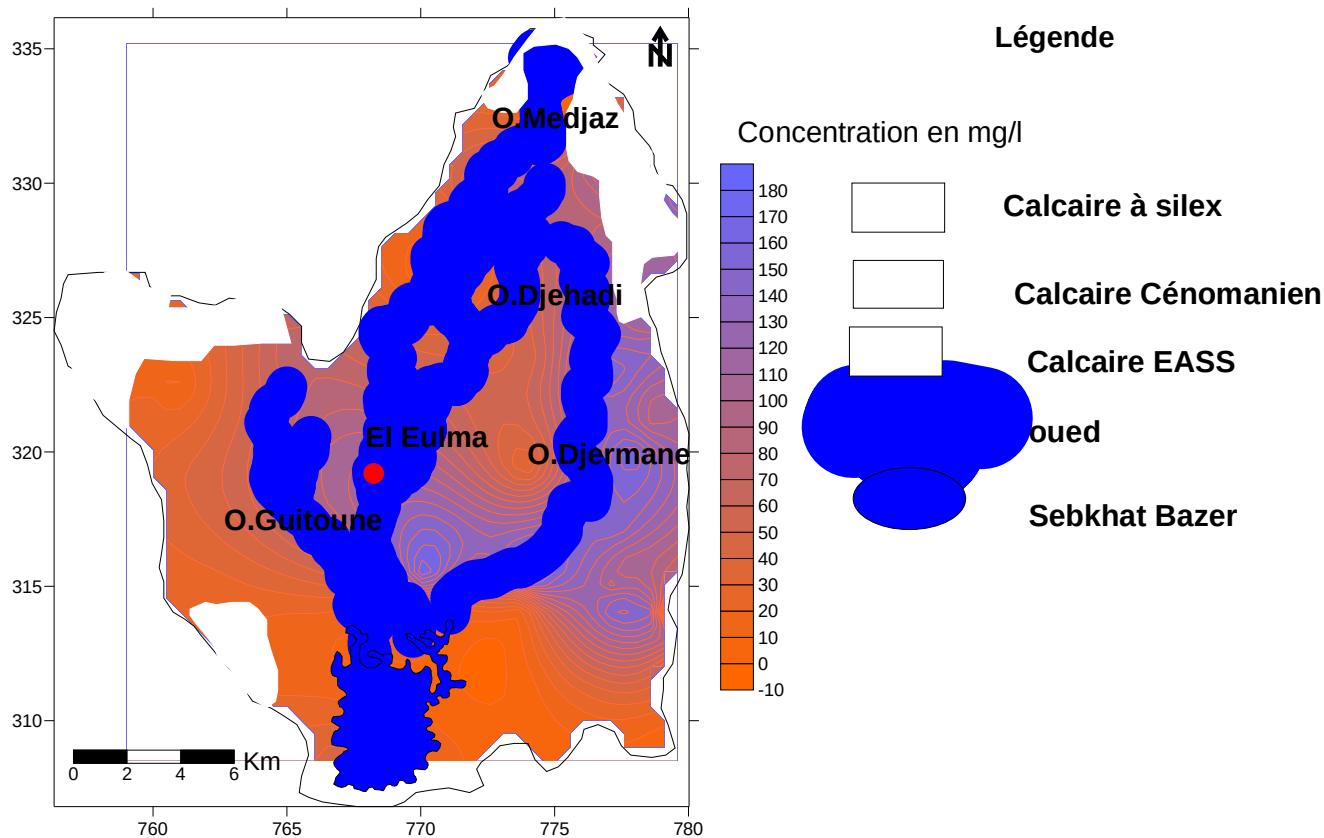


Fig N ° 106 Carte des nitrates 2006

5 Le cycle du phosphore

Contrairement à l'azote, le phosphore ne se trouve pas à l'état libre dans la nature, le phosphore est principalement stocké dans les roches (comme minérale riche en apatite). La totalité du phosphore présent dans l'atmosphère provient de sources terrestres, il se présente dans l'environnement sous la forme réactive l'ortho phosphate (PO_4^{3-}), produits par l'altération du matériau parental. Le phosphore est surtout absorbé par la solution de sol par les systèmes racinaires des plantes ou d'autres cellules. Les animaux broutent la végétation et excrètent dans leur urine et leur fèces le phosphore excédentaire sous forme de sels de phosphore. Le phosphore est directement absorbé ou minéralisé par les bactéries et les champignons qui le transforment en ions phosphatés. La décomposition de la matière organique restitue le phosphore inorganique au sol.

Dans les systèmes terrestres le cycle du phosphore est relativement simple. La source majeure réside dans l'altération de l'apatite et les sédiments fossilisés. Le phosphore minérale se trouve en partie à l'état soluble, essentiellement sous forme d'orthophosphates (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-). Le cycle du phosphore se caractérise par un flux unidirectionnel de phosphore du sol vers les eaux continentales ou marines. Dans la zone pélagique des milieux lacustres ou dans les zones humides, le phosphore total est présent sous forme particulière stocké dans les organismes (bactéries, plantes, animaux) vivant ou mort, ou dans les particules argileuses et minérales. Il est réactif et se lie à de nombreux cations tels que le fer, l'aluminium et le calcium pour former des composés peu solubles. Le phosphore rentre dans la constitution de molécules riches en énergie (ATP, ADP, AMP) ou en informations (acide nucléiques), il intervient dans la composition du squelette.

5-1 Discussion des résultats.

5-1-1 Les penta phosphates P_2O_5

La répartition du P_2O_5 est généralement liée à la minéralisation des formations sédimentaires et biochimiques. Les phosphates ont pour origine les minéraux constitués de phosphate, de fluorure, de carbonate de calcium et d'apatite. Fig. 107

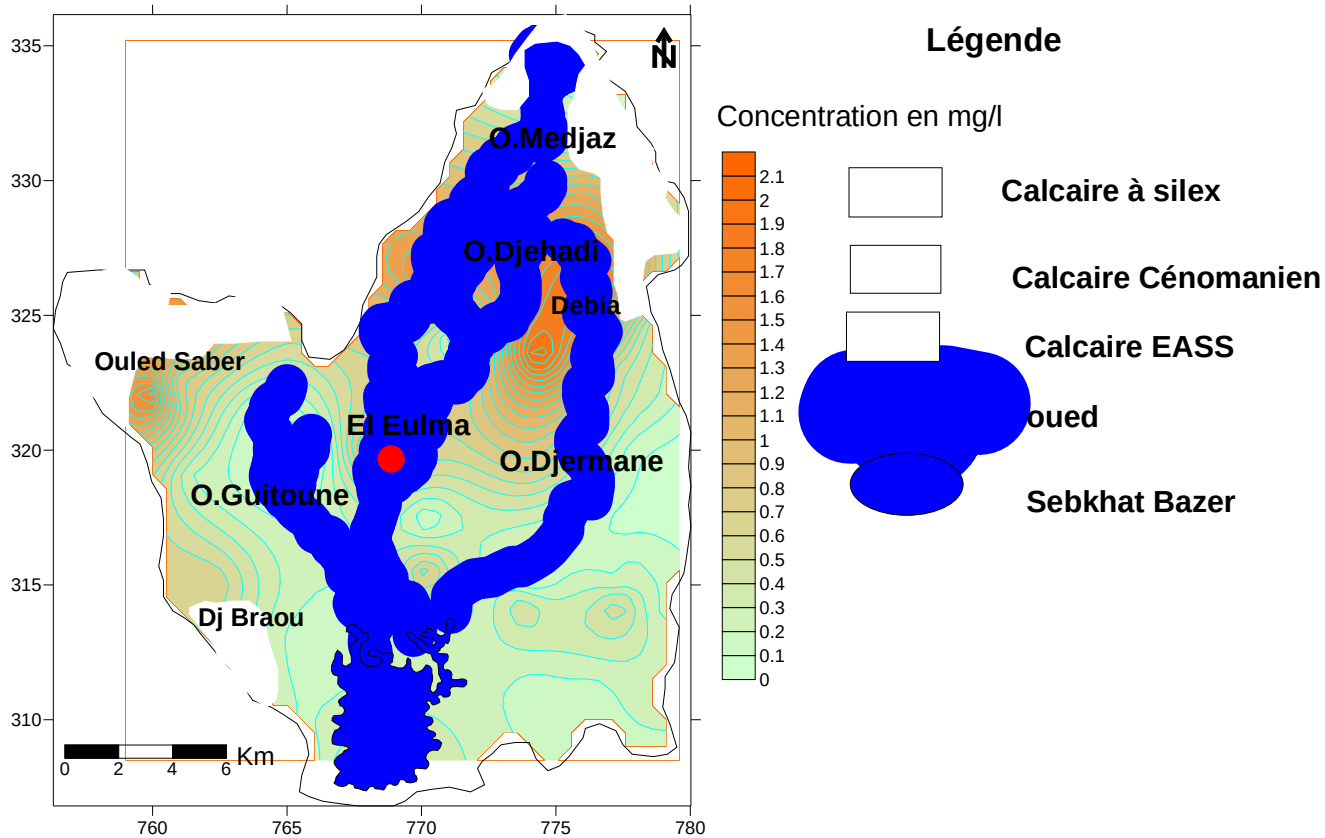


Fig N ° 107 Carte des penta phosphates P_2O_5 dans la région d'El Eulma 2006

5-1-2 Les ortho phosphates PO_4

Les orthophosphates sont élevées dans les terrains agricoles là où l'utilisation des engrais est très importante ce qui confirme la répartition de la concentration du PO_4 est élevée dans les zones interne de Bazer Sakra, Smara, le long de Oued Djermane et mehta Tillaf. La concentration est faible dans les zones externes de la région. Fig 108

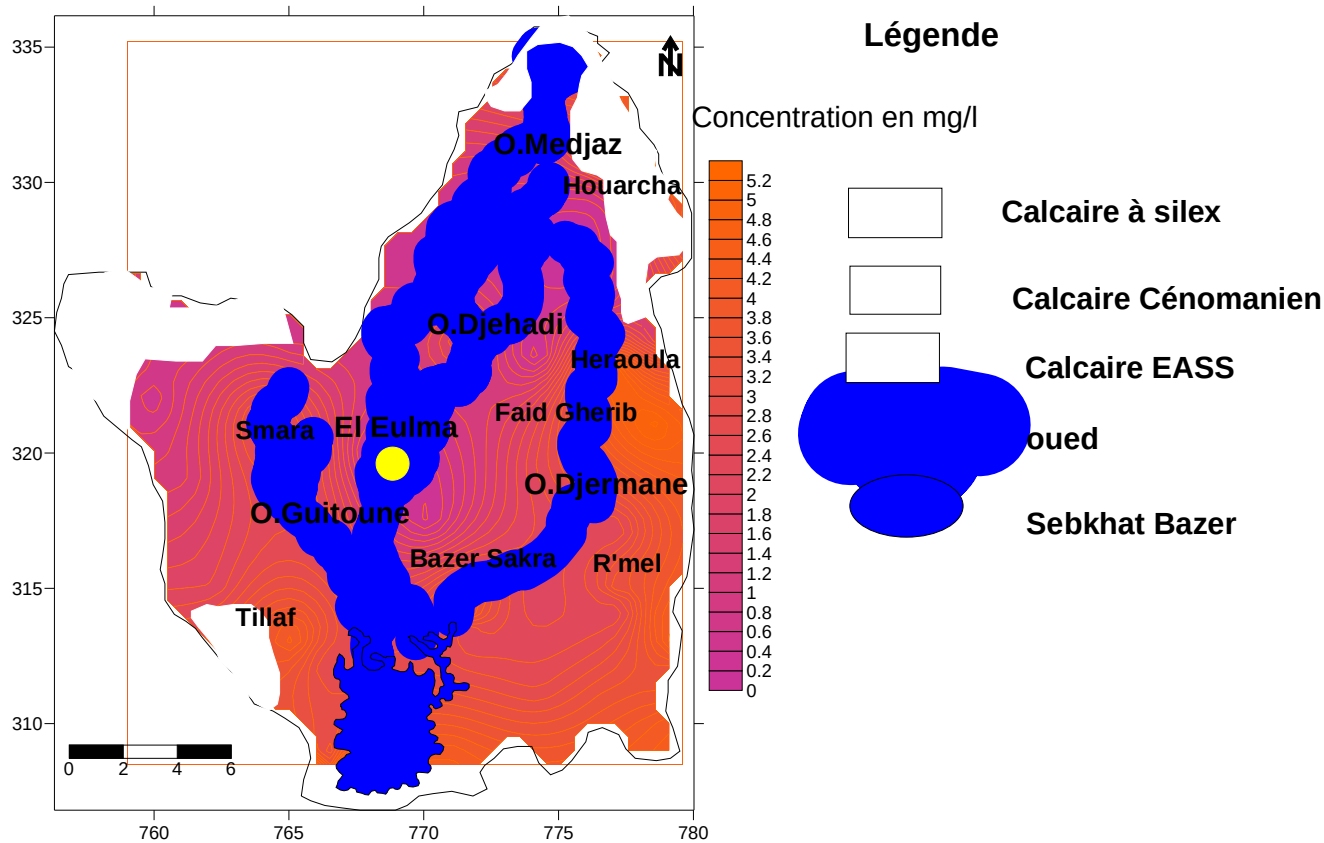


Fig N°108 Carte des orthophosphates PO_4 dans la région d'El Eulma 2006

6- La pollution urbaine

6-1 Introduction

Le développement de la ville El Eulma depuis 1975 a fait d'elle une région à vocation industrielle, agricole et commerciale. Or ce développement a fait accroître l'activité de la population qui s'est concentrée dans le bassin urbain et le bassin rural avec une augmentation du flux entrant vers la ville. Quotidiennement plus de 100 000 voitures rentrent dans la ville ce qui provoque un smog durant la journée, qui rend la respiration difficile avec l'apparition des asthmatiques dont le nombre devient critique. Le tabagisme a un effet sur l'environnement parce que dans $100m^2$ on compte un fumeur.

6-2 Les sources de pollution.

Les sources de pollutions urbaines dans la région d'El Eulma ont pour origine :

Les eaux usées, la décharge publique avec le tonnage quotidiennement qui varie entre 160 - 200 tonnes, la fumée du tabac et les gaz d'échappement des voitures qui constituent avec la poussière des matériaux de constructions et des particules volatiles des aérosols des sources de pollutions dont les composants sont données par l'organisation mondiale de la santé (OMS) Tableau 72.

Tableau 72 Composants de la fumée d'essence et du tabac

Gaz d'échappement des moteurs d'essences		Fumée de tabac	
Composés	%	Composés	%
N ₂	70	N ₂	73
CO ₂	18.1	O ₂	10
H ₂ O	9.2	CO ₂	9.5
O ₂ et gaz rares	0.7	CO	4.2
Méthane	16.7	H ₂	1
éthène	14.5	Gaz rares	0.6
éthyne	14.1	HCN	0.16
propène	6.3	NH ₃	0.03
n-butane	5.3	NO _x	0.02
isopentane	3.7	H ₂ S	Traces
toluène	3.1	Composés organique	Traces
n-pentane	2.5	Al	0.22 µg
benzène	2.4	Cd	0.007-0.0035 µg
xylène	1.9	Cr	0.004-0.0069 µg
éthane	1.8	Cu	0.19 µg
But -1-ène	1.8	Fe	0.042 µg
Pb(C ₂ H ₅) ₄	0.1mg/m ³	Hg	0.004 µg
Zn	00	K	70 µg
Cu	00	Mg	0.07 µg
Cr	00	Na	1.3 µg
Ni	00	Ni	0.0-0.51 µg
Fe	00	Pb	0.017-0.98 µg
Al	00	Sb	0.052 µg
Cd	00	Zn	0.12-1.21 µg
Hg	traces	Monoxyde de carbone, nicotine, acide acétique, acétone, méthanol, oxyde d'azote, acide formique, acide cyanurique, hydroquinone.	

Selon les données de Organisation mondiale de la santé, les composants de la fumée d'échappements d'essence avec celle du tabacs constituent une source de pollution quotidienne si la quantité consommée n'est pas contrôlée, avec une moyenne de 100000 voitures qui transitent la région et 1 fumeur dans chaque 100 m² . Le second problème qui se pose dans la ville d'El Eulma est le réseau assainissement auxquelles il ya dégagement d'une odeur ammoniacale due a activité bactérienne dans les égouts en période estivale. L 'apparition des foyer de contamination par les maladie hydriquement transmissible telle que la typhoïde, le choléra, la méningite et le germe de staphylocoque, dans la ville et ses environs elle est due généralement a la présence des foyers de contamination des fosses septiques et l'interaction eaux usées eau potable dans le réseau d'alimentation en eau potable et dans les puits. L effet de la décharge publique et l'incinération en plaine centre ville sur la santé humaine et animale .en période d'étiage la diminution du volume d'eau dans Sebkhat Bazer et vue que les eaux usées de la ville d'El Eulma sont déversés vers la Sebkhat, une odeur méasabondante se dégage dans la région.

7 Évolution des concentrations des métaux lourds selon la direction Nord -Sud dans la la region d'él eulma

La pollution industrielle touche 75% des puits pollués par contre la pollution agricole ne touche que 25%.La première catégorie coïncide avec la zone industrielle (point 4, Fig. 109,110 et 112) donc dans le centre de la plaine alors que la deuxième catégorie se trouve dans la partie sud de la plaine (point 5 et 6 Fig. 111 et 113) où on a une forte activité agricole caractérisée par l'utilisation des engrais à base de fer et phosphates a cause de la présence sol calcaire qui rend l'absorption du fer difficile par les plantes .

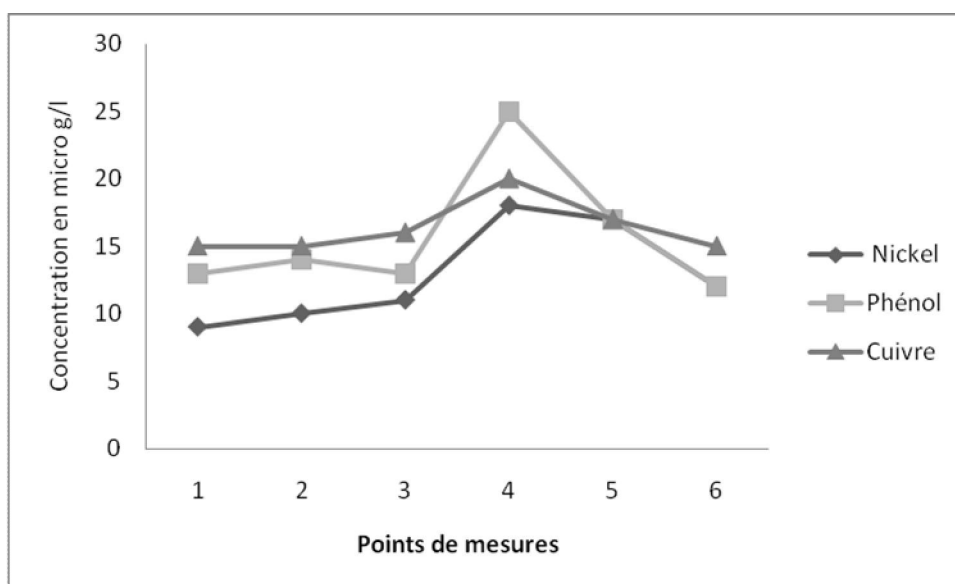


Fig 109 Evolution des concentrations du nickel ,des phénols et du cuivre selon une direction Nord –Sud dans la plaine d'El Eulma . Rq La zone industrielle de la ville se trouve au point 4 .

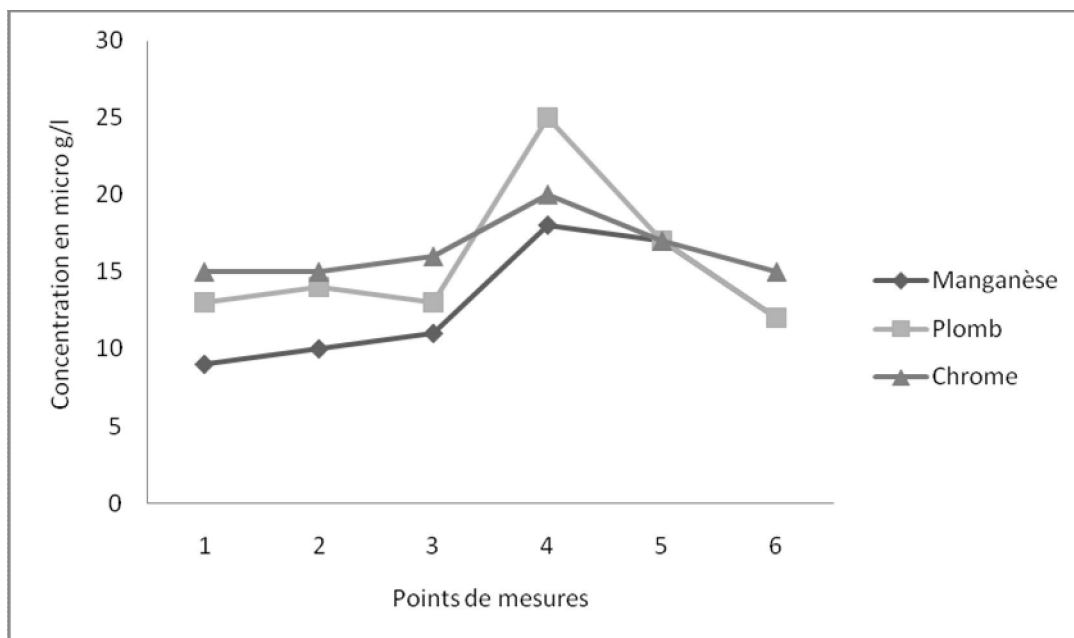


Fig 110 Evolution des concentrations du manganèse, du chrome et du plomb selon une direction Nord -Sud dans la plaine d'El Eulma .Rq La zone industrielle de la ville se trouve au point 4.

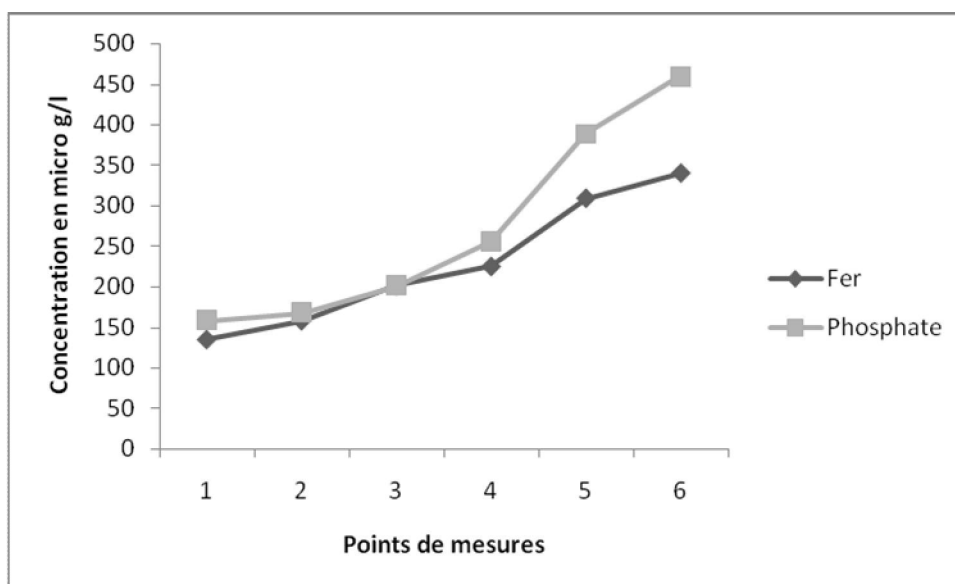


Fig 111 Evolution des concentrations du Fer et des phosphates selon une direction Nord -Sud dans la plaine d'El Eulma . Rq La zone industrielle de la ville se trouve au point 4.

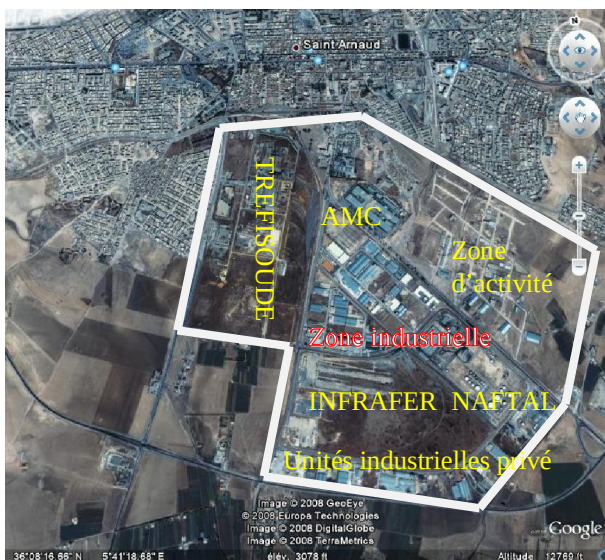


Fig N°112 Zone industrielle de la ville
El Eulma .



Fig 113 Terrains agricole Sud de la plaine
d'El Eulma .

8 Spéciation des métaux lourds dans les eaux souterraines de la région d'El Eulma .

8-1 Les diagrammes potentiel Eh – pH ou diagramme de POURBAIX

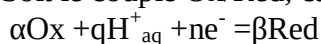
Principe du diagramme potentiel Eh- pH est relatif à divers nombres d'oxydation dans différentes espèces chimiques. Ces diagrammes ont été proposés et établis par le chimiste belge POURBAIX .

On représente, pour les différents couples redox mis en jeu, les variations du potentiel redox E en fonction du pH .

Le diagramme potentiel Eh–pH fait apparaître les différents domaines de prédominance ou d'existence de chaque espèce .La superposition de diagramme relatifs à plusieurs éléments permet, par une méthode graphique simple de prévoir les réactions mises en jeu et leur sens d'évolution pour les concentrations initiales fixées des différents produits.

15-1 Interprétation graphique .

Soit le couple Ox/Red, caractérisé par la demi-équation rédox



Dont le potentiel rédox à 25°C est donné par : $E = E^0 - \frac{q}{n}0.06\text{pH} + \frac{0.06}{n} \log \left(\frac{\alpha_{\text{Ox}}}{\alpha_{\text{Red}}} \right)$

Lorsque les activités de Ox et Red sont fixées (arbitrairement), le potentiel E est une fonction du pH ,qui sépare le plan Eh-pH en deux domaines . Fig N° 114

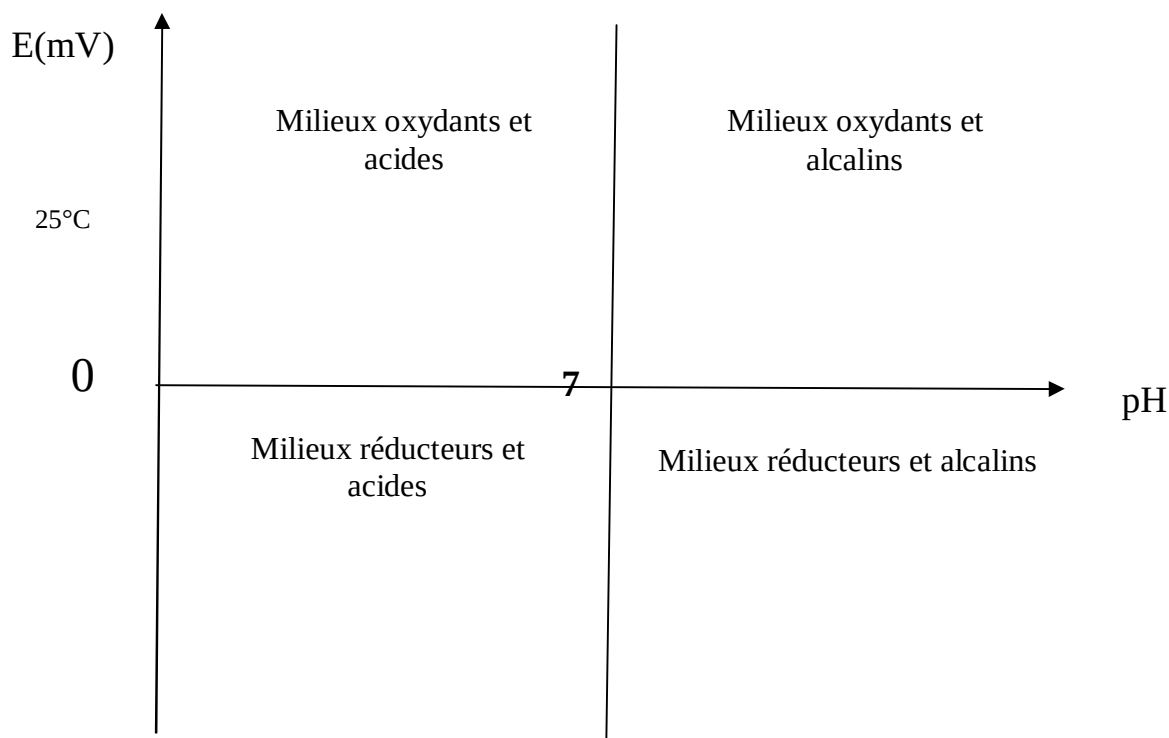


Fig N °114 Organisation générale du diagramme de Pourbaix

8-2 Représentation des mesures du pH –Eh sur les diagrammes d'équilibre .

La représentation des mesures du Eh-pH sur le diagramme d'équilibre du Cadmium, les valeurs présentent trois domaines de stabilité. Le Cd totale avec un pourcentage de 14 %
Le Cd^{++} représente la forme dissoute par 6% .dont le pH varie entre 5.1 et 7 les eaux ont un caractère plus acide .Le domaine de stabilité $\text{Cd}(\text{OH})_2$ avec un pourcentage de 80% Fig 115 et 115-1.

Le plomb présente cinq domaines de stabilité :Le domaine de stabilité PbH et Pb avec un pourcentage de 7% et 6% .Le domaine de stabilité PbO qui représente 12% avec une tendance vers la forme dissoute Pb^{++} qui représente 1%. Le domaine de stabilité PbO_2 représente 74%. Fig°116 et 116-1

Le cuivre se présente dans le domaines de stabilité le Cu avec un pourcentage de 12% ,une tendance vers la forme dissoute Cu^{++} de 1% et le CuO représente 87%. Fig N°117 ET 117-1Le Manganèse se présente dans le domaine de stabilité du Mn avec 10% , la forme dissoute Mn^{++} représente 7%, le MnO_3 2% et MnO_2 81 % . Fig N°118 et 118-1

Le Nickel se présente dans domaine de stabilité : Le domaine de stabilité Ni représente 13% ,Le domaine $\text{Ni}(\text{OH})_2$ représente 7% ,la forme dissoute Ni^{++} représente 12% et la forme complexe NiO_2 représente 68%. Fig N°119 ET 119-1.

Le Zinc présente dans le domaine de stabilité :Le Zn avec 11% , le $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 20% , la forme dissoute Zn^{++} 2% et la forme complexe ZnO_2 67%. Fig 120 et 120-1

Le Fer se présente deux plages de stabilité : Le Fe représente 12% et le $\text{Fe}(\text{OH})_3$ représente 88%.Fig 121et 121-1.

Le Chrome représente la plages de stabilité : Le Cr avec 10% ,le $\text{Cr}(\text{OH})_2$ 1% et le $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 89% Fig 122 et 122-1

L'azote se présente dans les plages de stabilité de NH_4 avec 13% , le NO_2 9% et le NO_3 78%.Fig 124 et 124-1.

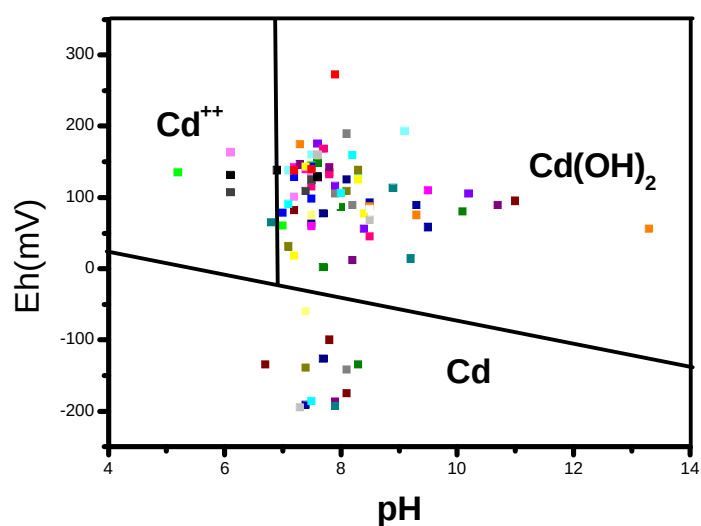


Fig N° 115 Représentation des mesures du pH et Eh sur le diagramme d'équilibre du Cd

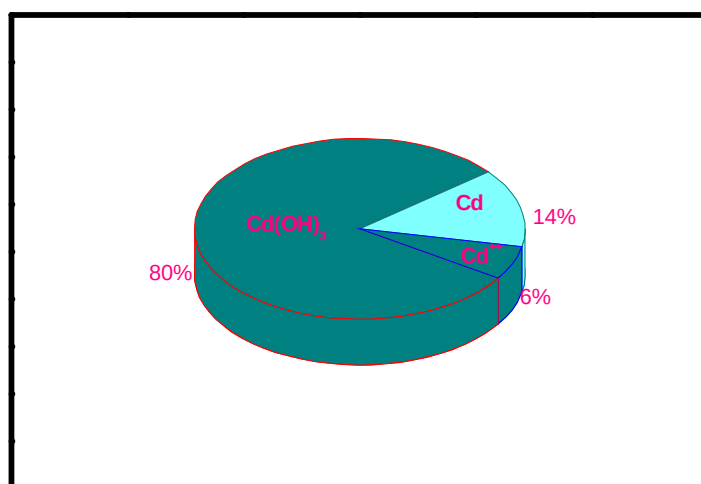


Fig N115-1 Pourcentage du domaine de stabilité du Cd

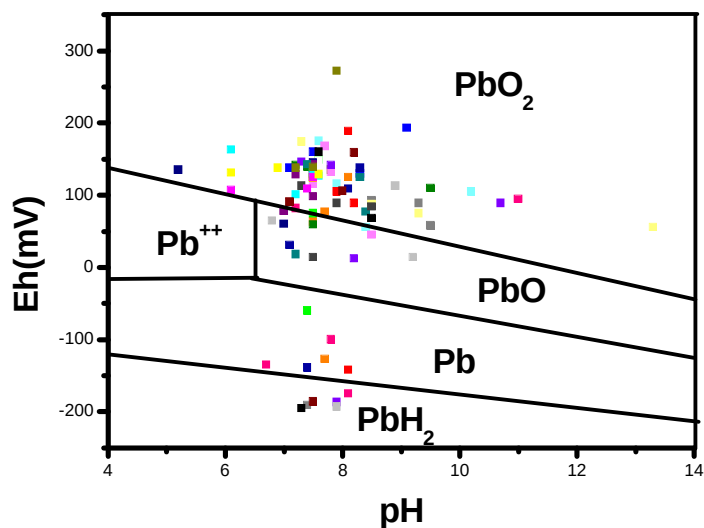


Fig N°116 Représentation des mesures du pH et Eh sur le diagramme d'équilibre du Pb

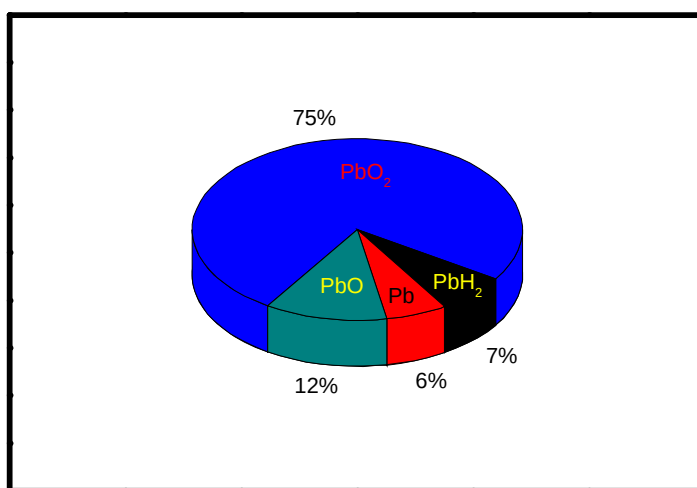


Fig N° 116-1 Pourcentage du domaine de stabilité du Pb

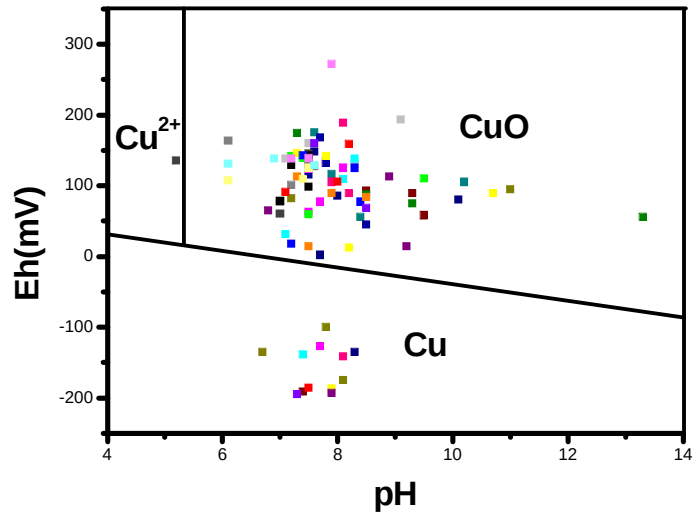


Fig N 117 Représentation des mesures du pH et Eh sur le diagramme d'équilibre du Cu

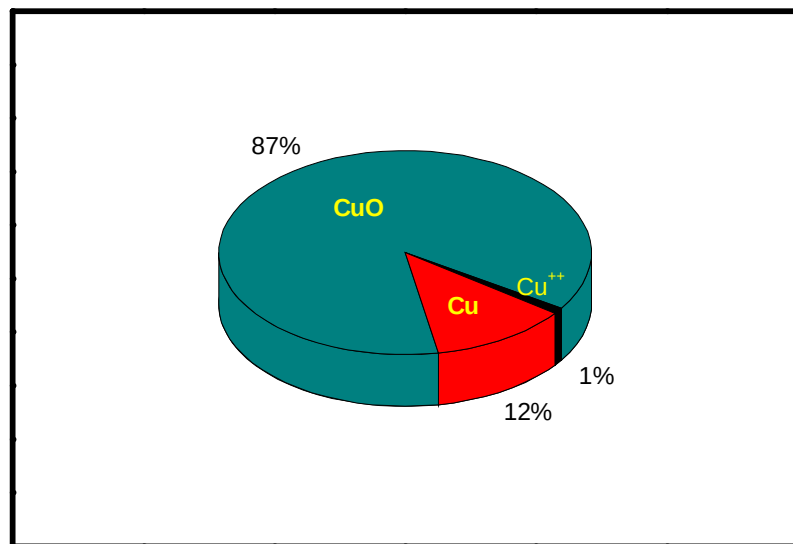


Fig N 117-1 Pourcentage du domaine de stabilité du Cuivre

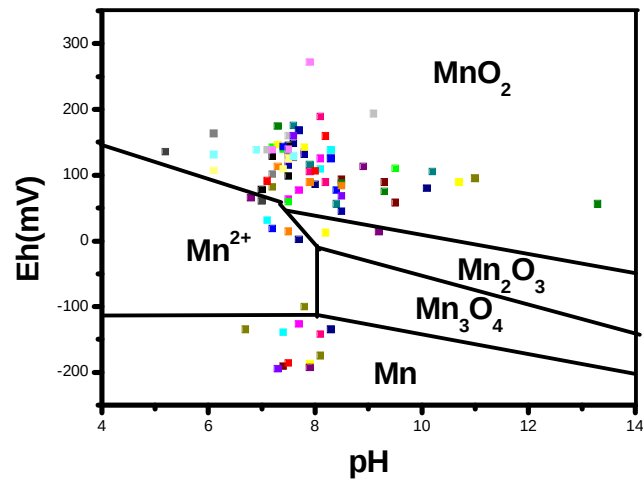


Fig N 118 Représentation des mesures du pH et Eh sur le diagramme d'équilibre du Manganèse.

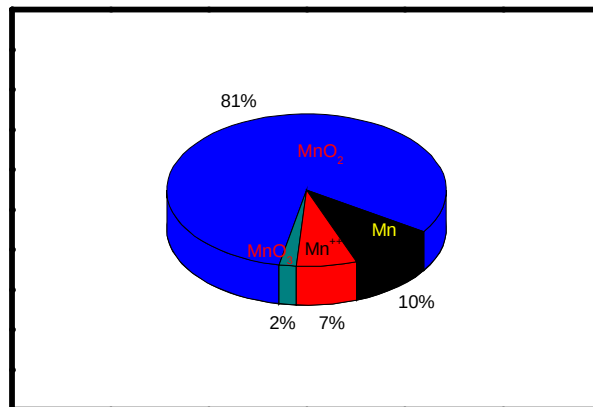


Fig N 118-1 Pourcentage du domaine de stabilité du Manganèse.

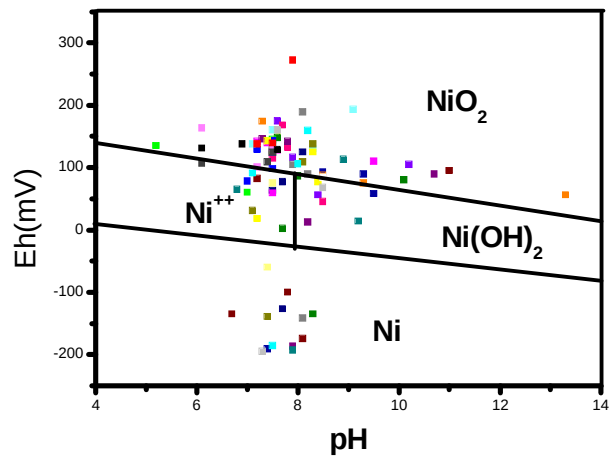


Fig N 119 Représentation des mesures du pH et Eh sur le diagramme d'équilibre du Nickel

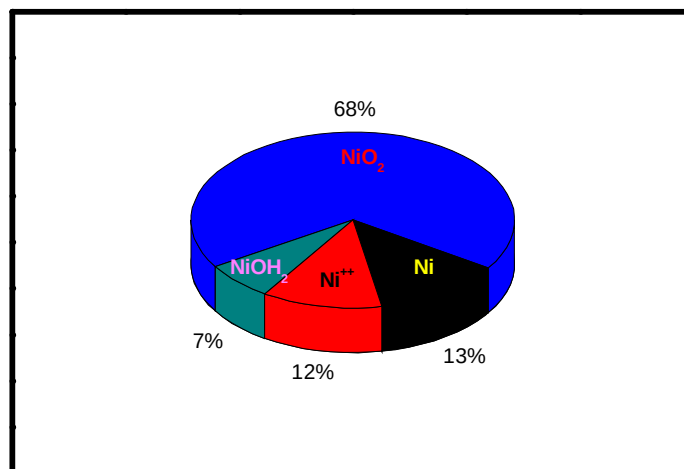


Fig N 119 -1 Pourcentage du domaine de stabilité du Nickel

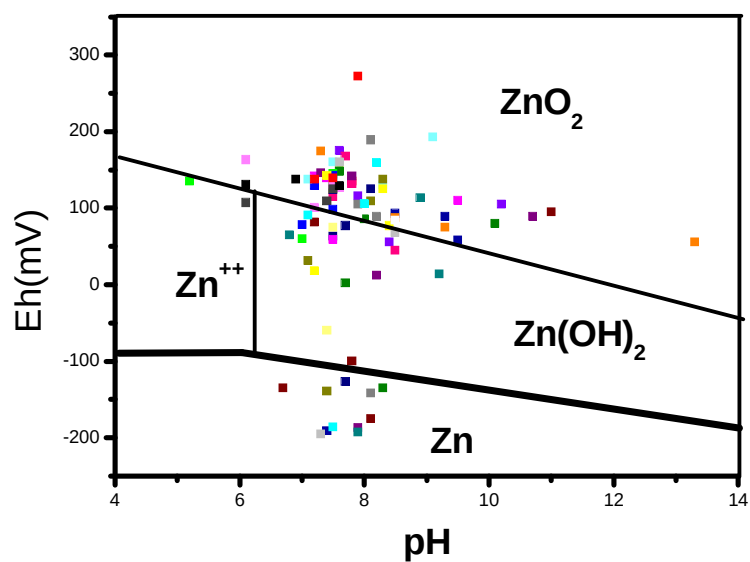


Fig N 120 Représentation des mesures du pH et Eh sur le diagramme d'équilibre du Zinc

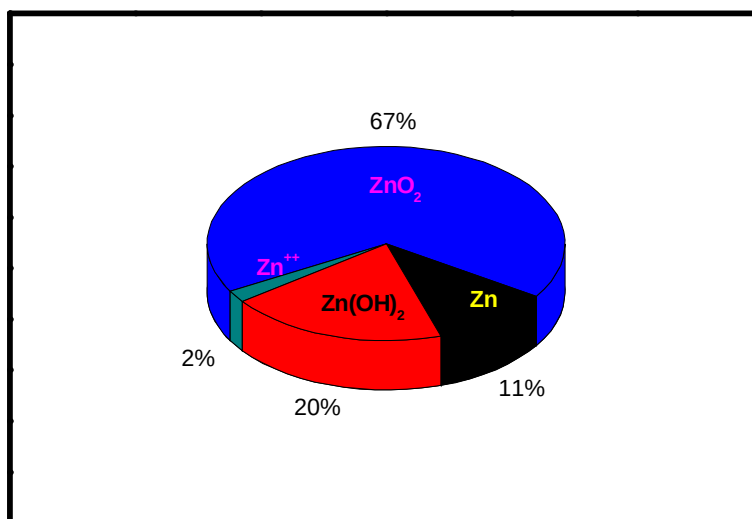


Fig N 120-1 Pourcentage du domaine de stabilité du Zinc

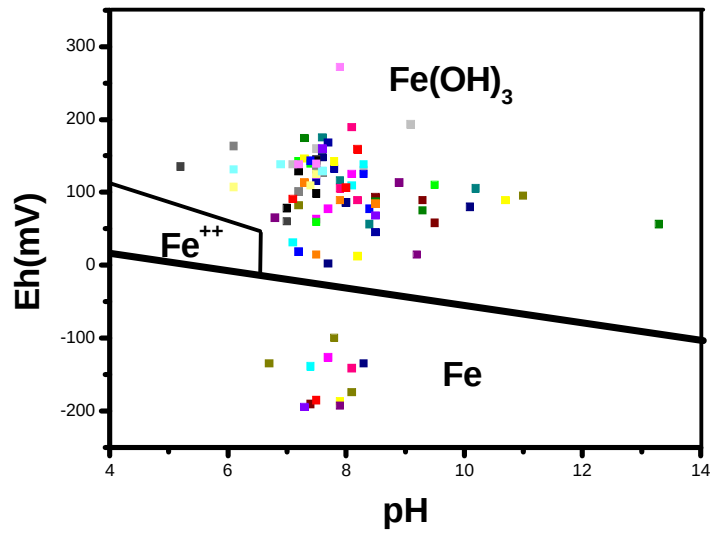


Fig N 121 Représentation des mesures du pH et Eh sur le diagramme d'équilibre du Fer

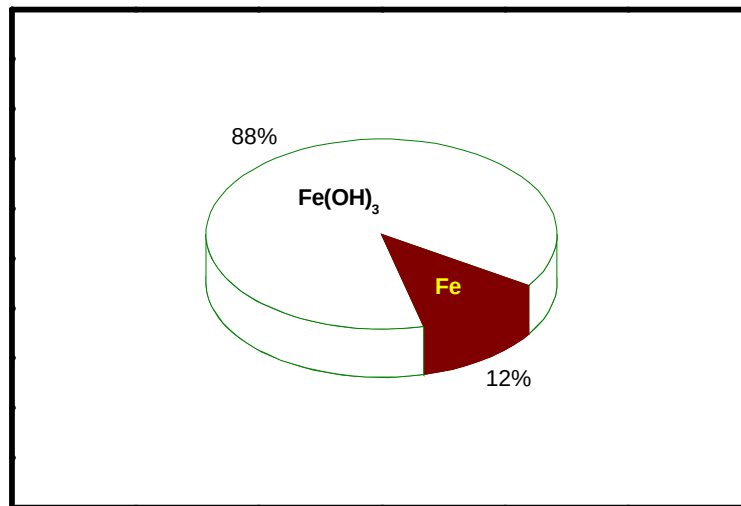


Fig N 121 -1 Pourcentage du domaine de stabilité du Fer

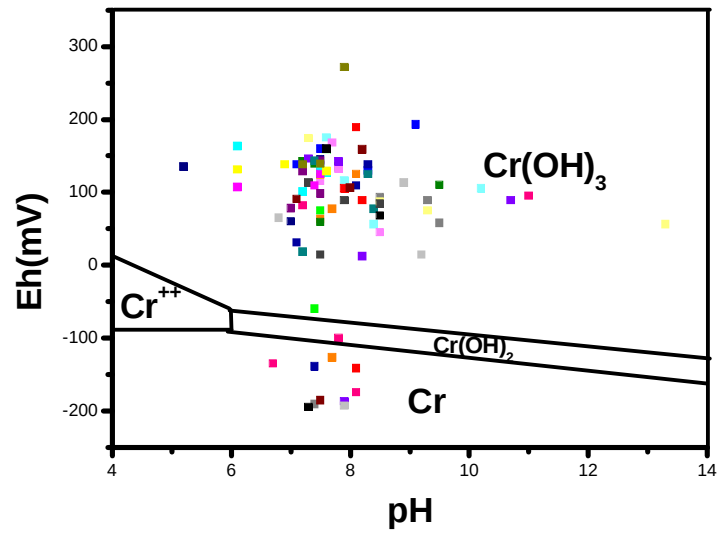


Fig N°122 Représentation des mesures du pH et Eh sur le diagramme d'équilibre du Chrome

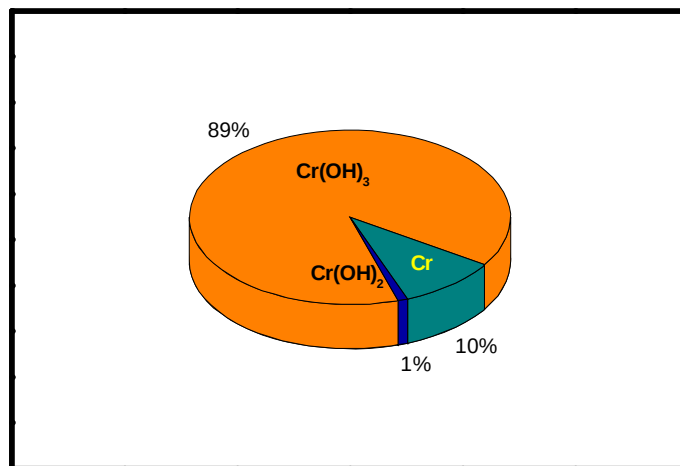


Fig N°122-1 Pourcentage du domaine de stabilité du Chrome

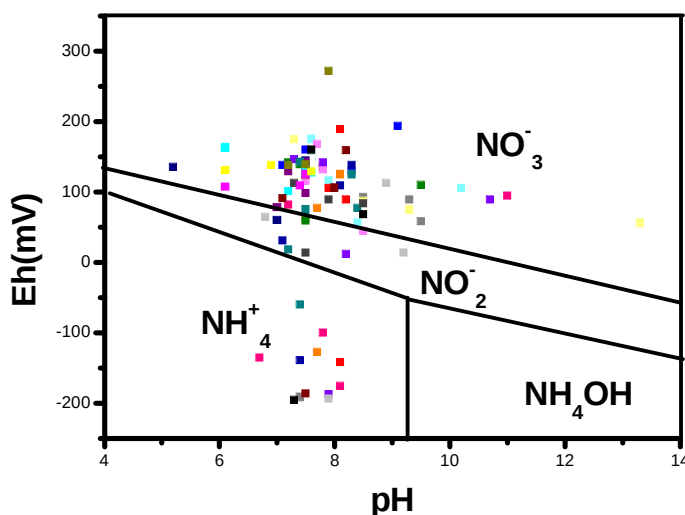


Fig N °123 Représentation des mesures du pH et Eh sur le diagramme d'équilibre du des nitrates

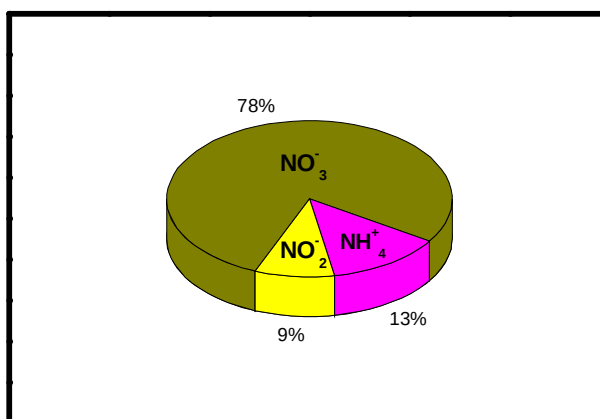


Fig N °123-1 Pourcentage du domaine de stabilité des nitrates

9 Conclusion.

Les sources de pollutions industrielles, agricoles, et urbaines constituent un danger permanent pour la région et l'environnement. La pollution industrielle est caractérisée par la présence du Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Fe, Cd, Mn et le phénol. La pollution industrielle est liée à l'activité du trafic routier aux lixiviats de la décharge publique et aux rejets des eaux industrielles. La pollution agricole est traduite par la présence des nitrates et les ortho phosphates ayant pour origine l'utilisation des engrais et les déchets de l'élevage. La pollution urbaine est due aux eaux usées du périmètres urbain. L'étude de la spéciation du Cadmium, le Plomb, le Zinc, le Cuivre, le Chrome, le Nickel, le Fer, le Manganèse, les nitrates montre le domaine de stabilité de ses éléments chimiques et le caractère de l'eau qui peut être acide ou réduit.

Vulnérabilité

1) Introduction:

La vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine est une notion complexe en raison du nombre de facteurs qu'elle fait intervenir et de l'importance qui peut être attribuée à chacun d'eux. En d'autre terme la vulnérabilité est fonction des caractéristiques du milieu aquifère en occurrence de la couverture du sol et de la zone non saturée qui contrôle la propagation d'une pollution vers la nappe .

Le but de l'élaboration de cette cartographie est de montrer qu'elles sont ,suivant les terrains rencontrés en surface ,les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans le terrain ,de mieux apprécier la fragilité des captages d'eau potable existants, de mieux cerner les zones à risque lors du choix de nouveaux sites de captages, et de prévoir des mesures compensatoires à mettre en œuvre sur les infrastructures existantes ou à créer pour limiter les risques de pollution chronique ou accidentelles ,diffuse ou ponctuelle (Rouabhia,2006).

2) Définition de la vulnérabilité.

Plusieurs définitions ont été données à la vulnérabilité :

Pour une nappe souterraine, la vulnérabilité de la nappe a la pollution chimique est d'être plus ou moins exposée par les conditions naturelles à un risque de pollution (Margat 1968).

La vulnérabilité des nappes correspond à la possibilité de pénétration de la propagation des polluants dans les terrains rencontrés en surface et au niveau des réservoirs dans lequel est contenue la première nappe d'eau souterraine, généralement libre. (Albinet ,1970).

la vulnérabilité des nappes à la pollution comme leur sensibilité aux différents facteurs de contaminations à partir de la surface du sol, c'est l'étude des possibilités de la propagation des polluants dans l'espace souterrain ,lié à l'autoépuration naturelle du sol ,donc à la présence des conditions indispensables à son action ,elle est favorisée par la circulation de l'eau. (Castany .G 1982).

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

On distingue deux types de vulnérabilité. La vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (S.Bézègues et al 2002)

La vulnérabilité intrinsèque Terme utilise pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par l'activité humaine.

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.

3 Les critères de vulnérabilité :

3-1 Les critères de vulnérabilité intrinsèque.

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiple facteurs intervenant soit sur la nature et /ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert .Elle est évaluée en prenant en compte les caractéristiques du sol, de la zone non saturée et de la zone saturée qui contrôle le comportement des polluants.

3-1-1 Critères relatifs au sol.

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

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

3-1-2 Les critères relatifs à la zone non saturée :

- ü **Profondeur de la nappe libre** (ou épaisseur de la zone non saturée) : épaisseur de la zone non saturée (ZNS) conditionnent le temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interaction physico-chimique avec l'encaissant) et donc sa possibilité de dégradation au cours du transfert.
- ü **Amplitude de battement de la nappe** : L'amplitude de battement de la nappe, dans la mesure où elle est significative, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe (Sol + ZNS). De ce fait elle peut devenir un critère de vulnérabilité.
- ü **Perméabilité verticale de la ZNS** :
Elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe.
- ü **Structure de la ZNS** : Les variations de faciès, l'épaisseur des discontinuités de faciès et leur position dans le profil vertical, la texture, la teneur en matière organique et en argile des formations, sont autant de facteurs qui conditionnent la migration de fluide vers la nappe.

3-1-3 Critères relatifs à la zone saturée :

- ü **Type de nappe (libre ou captive)** : L'absence d'horizon imperméable entre la surface et le toit d'une nappe libre lui confère un caractère plus vulnérable qu'une nappe captive protégée par des formations imperméables.
- ü **Paramètres hydrodynamiques** : La transmissivité (T), La perméabilité (K), le coefficient d'emmagasinement (S), le gradient hydraulique (i) déterminent la vitesse de migration des polluants dans la nappe et du temps de résidence dans la zone saturée.
- ü **Piézométrie** : Elle rend compte de la géométrie de la nappe et de son fonctionnement hydrodynamique qui peuvent évoluer au cours d'un cycle hydrologique complet. Entre les périodes de hautes eaux et basses eaux les directions d'écoulement et les relations eaux superficielles / eaux souterraines peuvent s'inverser.
- ü **Direction et sens d'écoulement** : Ils déterminent les espaces susceptibles d'être atteints par un polluant une fois que celui-ci a atteint la nappe.

- ü **Type de système hydrogéologique :** La vulnérabilité d'un système hydrogéologique peut être appréhendée à partir de la connaissance de sa réactivité aux impulsions pluviométriques .Un système au caractère transmissif fort se caractérise par des temps de transfert rapides des eaux depuis la surface vers la zone saturée et par de faibles temps de séjour .Un système au caractère inertiel et /ou capacitif fort se caractérise par des temps de transfert et des temps de séjours longs.
- ü **Relation nappe/cours d'eau :** Les relations entre les eaux superficielles et les eaux souterraines peuvent être de deux types, drainage ou alimentation qui conditionnent la possibilité de contamination des eaux souterraines à partir des eaux superficielles.
- ü **Épaisseur de l'aquifère (quantité de réserve) :** la quantité d'eau stockée dans l'aquifère détermine les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe.
- ü **Présence ou non d'un horizon moins perméable :** Cet horizon va déterminer le caractère libre ou captif de la nappe.
- ü **Fracturation (Direction et densité).** Des discontinuités verticales telles que les failles peuvent, dans certaines conditions, jouer le rôle de drain et augmenter très sensiblement les vitesses d'infiltration depuis la surface vers la nappe.
- ü **Recharge :** Il s'agit de la quantité d'eau atteignant la zone saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette) .Elles dépend de l'infiltration efficace et de sa répartition dans l'espace et dans le temps, donc du climat (ETP, précipitation), mais également de la topographie et de la nature des formations .Elle peut être appréhendée à partir de la représentation de ces différents éléments constitutifs .Elle constitue un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

3.2. Critères de vulnérabilité spécifique.

- ü **Comportement du polluants potentiel (milieu fixe) :** Selon leur nature, les polluants se comportent dans le milieu de manière spécifique .Ce comportement dépend des caractéristiques du milieu, mais également des propriétés physico-chimiques du composé lui-même. Les principaux phénomènes susceptibles d'intervenir sont géochimiques(réactions acides-bases ,d'oxydoréduction , de désorption) , biochimiques(biodégradation ,synthèse cellulaire) , physiques(diffusion, évaporation, filtration) , ou biophysiques (Transport de germe , ADN).

Capacité dispersive et épuratoire des sols : Faces à un polluant donné, les sols ont des propriétés épuratoires plus ou moins développées et spécifiques de ce polluants.

Qualité du réseau hydrographique: Dans le cas où le réseau hydrographique alimente les eaux souterraines, et selon son extension, sa vulnérabilité et la qualité de ses eaux, le réseau hydrographique peut être vecteur de contaminations vers les eaux souterraines.

Typologie de l'occupation du sol : L'occupation du sol conditionne les volumes et la nature des polluants potentiels. Elle peut être de type naturelle (forêt, nature) ou agricole (culture, élevage) ou urbain (habitat, tissus industriel). De ces sites, de par l'activité à risque qui est pratiquée, la vulnérabilité de la nappe est augmentée significativement. Ce sont les surfaces agricoles, les décharges, les rejets des établissements classés et les voies de circulations.

4 Évaluation de la vulnérabilité :

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physique, chimique, et biologique dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité.

4-1 Les méthodes de cartographie à index : Cette méthode est basée sur les combinaisons de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères.

Les méthodes de cartographie à index comportent deux types d'approches : les systèmes hiérarchisés et les systèmes paramétrés.

La méthode des systèmes hiérarchisés est basée sur la comparaison d'une zone donnée avec les critères représentant les conditions de vulnérabilité d'autres zones. Elle est généralement utilisée pour évaluer la vulnérabilité des contextes hydrogéologiques variés à moyen et à grande échelle.

La méthode des systèmes paramétrés repose sur la sélection de paramètres considérés comme représentatifs pour estimer la vulnérabilité d'une eau souterraine. Chaque critère a une gamme de variation définie qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Un index est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré de sensibilité relative à une contamination. Les systèmes paramétrés peuvent être classés en trois principaux groupes :

- a) Système matriciel.
- b) Système indexé.
- c) Méthode de pondération et indexation de paramètres.

4-2 Les modèles de simulation : Ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants. Ils donnent une image de vulnérabilité spécifique de la nappe.

5 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

5-1 Méthode Risk .

Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique. Le risk est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte :

Roche, aquifère, Infiltration, Sol, Karstification.

La combinaison des 5 cartes correspondant à la transcription des 5 critères RISK permet de calculer l'indice global de vulnérabilité (Ig) en chaque maille de la zone d'étude. Le choix de la taille de la maille se fait également en fonction du pas du modèle numérique de terrain ou de la densité de l'information disponible. À chaque maille correspond une valeur de l'indice de chacun des critères. La compilation des cinq cartes élémentaires se fait en introduisant un facteur de pondération entre les critères traduisant l'importance relative qui leur est attribuée. Cette étape est largement facilitée par l'utilisation du S.I.G

Le calcul de l'indice globale de vulnérabilité I_g se fait selon la formule suivante :

$$I_g = \alpha R_i + \beta I_j + \delta K_l + \varepsilon E_m$$

$\alpha, \beta, \delta, \varepsilon$: Poids des critères RISK .

i, j, k, l, m : indice des critères RISK.

Toutes les alternatives des critères sont classées en 5 catégories indexées de 0 à 4, du moins au plus vulnérable .Dans la même logique, indice global de vulnérabilité (I_g) obtenue en chaque pixel de la zone d'étude est divisé en 5 classes égales (0 à 4) allant du moins au plus vulnérable.

La carte finale de vulnérabilité représente donc les zones appartenant à une même classe de vulnérabilité par le même code couleur

5-2 Méthode EPIK .

C'est une méthode appliquée au aquifères Karstiques, elle a été développée dans le but de délimiter les périmètres de protection des captages .Un des avantages de cette méthode est de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis-à-vis de tout type de contaminant.

La méthode est systématique puisqu' elle propose une analyse détaillée du bassin d'alimentation des sources karstiques. Elle est basée sur quatre critères :

- ü Epikarst,
- ü Protective Cover (couverture protectrice : (sol) ;
- ü Infiltration Condition (Conditions d'infiltration) ;
- ü Karst Network développement (développement du réseau Karstique).

Ces critères correspondent à quatre aspects spécifiques déterminant l'organisation des écoulements en milieu Karstique .Chaque paramètre est divisé en classes traduisant des degrés d'impact vis-à-vis d'une pollution .Un coefficient multiplicateur (facteur de pondération) est appliqué à chaque paramètre afin de traduire son importance relative par rapport aux autres.

L'indice final de vulnérabilité est calculé en chaque maille du système selon la formule :

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \varepsilon K_l$$

$\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$: Coefficients de pondération des critères ;

E_i, P_j, I_k, K_l : Valeur de chacun des critères indexés.

La gamme de variation du facteur de protection est divisée en quatre classes correspondant à des zones de protection visant à répondre aux impératifs des normes internationales en matière de protection des points d' eau pour l'alimentation en eau potable Fig 124

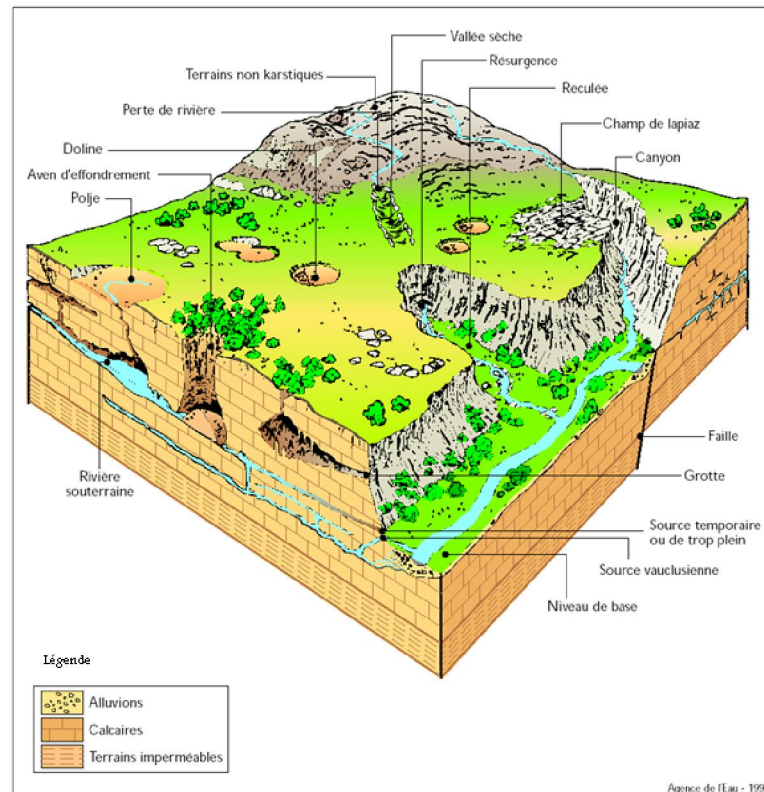


Fig N° 124 Modèle karstique

5-3 Méthode GOD (Groundwater Overell Depth) :

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

Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères

- ü Type de nappe (Groundwater occurrence) ;
- ü Type de l'aquifère en terme de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ;
- ü Profondeur de la nappe (Depth to groundwater table).

5-4 La méthode DRASTIC

La méthode **Drastic** a été développée par l'association **NWWA** (Water well association) Pour le compte de **US EPA** (US Environmental protection Agency 1993), dans le but d'offrir une base pour l'évaluation du potentiel des eaux souterraines. Cette méthode est basée sur un système de cotation numérique qui permet l'établissement d'une carte de vulnérabilité qui est la synthèse des connaissances lithologiques, pédologiques, et hydrogéologiques d'une région.

Son application nécessite la vérification de certaines conditions d'application

- ü La source de pollution ponctuelle est localisée à la surface du sol
- ü Les pollutions qui sont entraînées depuis la surface du sol jusqu'à la nappe par infiltration.
- ü Sans le cas ou la source de pollution est située en profondeur dans le sol (exemple réservoir souterrain), la méthode demeure valable en modifiant les paramètres affectés par la position de la source de pollution.

5-4-1 Les paramètres DRASTIC

L'indice DRASTIC est basé sur l'évaluation des sept (7) paramètres. Chaque paramètre est assigné d'un poids relatif fixe dont les valeurs sont comprises entre 1 et 5. Correspondant à son importance dans le processus d'atténuation des substances contaminants. Tableau 73.

Tableau 73 Paramètre DRASTIC.

Symboles	Paramètres		Poids
D	Depth to water	Profondeur de la nappe	5
R	Net recharge	Recharge nette	4
A	Aquifère media	Matériaux de l'aquifère	3
S	Soil media	Matériau du sol	2
T	Topography	Topographie (pente)	1
I	Impact of vadose zone media	Impact de la zone non saturé	5
C	hydraulic conductivity	Perméabilité de l'aquifère	3

5-4-2 Calcul de l'indice DRASTIC.

L'indice DRASTIC est estimé à partir des 7 paramètres suscités. Chaque paramètre est assigné d'un poids relatif dont la valeur est comprise entre 1 et 5, puis assigné d'une cote pouvant varier de 1 à 10. Un indice DRASTIC partiel à chaque paramètre est alors calculé en multipliant sa cote par son poids relatif.

$$\text{Indice partiel} = \text{Poids} \times \text{Cote}$$

L'équation utilisée pour déterminer l'indice DRASTIC général est la suivante :

$$I_R = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W$$

5-4-3 Interprétation de l'indice DRASTIC.

L'appréciation de l'indice DRASTIC, n'est possible que par l'analyse comparative entre différents sites. A cet effet, un système de représentation offrant à l'utilisateur une visualisation immédiate du degré de vulnérabilité. Le principe de cette représentation regroupe les indices de vulnérabilité en cinq (5) classes. Tableau 74

Tableau 74 Les indices de vulnérabilité

0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100%
T.Faible		Faible		Moyen		Élevée		T. Élevée		
23		84 114		145		175		226		

L'application de ce tableau consiste à diviser la valeur indicielle de chaque zone par la valeur maximum 266, en multipliant ensuite par 100 afin d'exprimer la vulnérabilité en pourcentage. Les cartes 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'indice. Les notations générale accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentés dans le tableau 75.

Tableau 75 Cotation des paramètres utilisés dans la méthode DRASTIC

D : Profondeur de la nappe (m)		R : Recharge annuelles (cm)	
Intervalle	Cote	Intervalle	Cote
00 - 15	10	25.5	9
15-4 .5	9	17.5-25	8
4.5- 9	7	10-17.5	6
9-15	5	5-10	3
15-23	3	0-5	1
23-31	2		
31 +	1		
Poids Pesticides 3	Poids 5	Poids Pesticides 4	Poids 4
A : Milieu aquifère		S : Type de sol	
Nature du milieu aquifère	cote	Nature du sol	cote
Calcaire Karstique	10	Sol mince	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sable	9
Calcaire massif	6	Argile Fissuré	7
Grés massif	6	Terre grasse Sableuse	6
Calcaire massif	6	Terre Grasse	5
Roche Métamorphique altérées	4	Terre Grasse Limoneuse	4
Roche métamorphique	3	Terre grasse argileuse	3
Shale massif	2	Argile non fissurée	1
Poids Pesticides : 3	Poids 3	Poids Pesticides 5	Poids 2
T : Topographie		I : Nature de la Zone non Saturé	
Intervalle	Cote	Intervalle	Cote
00-02	10	Calcaire Karstique	10
02-06	9	Sable et gravier	9
06-12	5	Sable et gravier avec silt et argile	8
12-18	3	Grés	06
18+	1	Calcaire	06
			10
Poids Pesticides:3	Poids 3	Poids Pesticides: 2	Poids 2
C : Conductivité			
Conductivité hydraulique		Cote	
9.4×10^{-4} m/s		10	
4.7×10^{-4} - 9.4×10^{-4} m/s		8	
32.9×10^{-5} - 4.7×10^{-4} m/s		6	
14.7×10^{-5} - 32.9×10^{-5} m/s		4	
4.7×10^{-5} - 14.7×10^{-5} m/s		2	
4.7×10^{-7} - 4.70×10^{-5} m/s		1	
Poids Pesticides : 4		Poids : 5	

5-4-4 Condition d'utilisation de la méthode Drastic.

Les conditions d'utilisation de la méthode sont :

- Le contaminant est introduit à la surface du sol.
- Arrive aux eaux souterraines par infiltration.
- A la mobilité de l'eau.
- La zone à évaluer est d'au moins 0.4 km²

6 Vulnérabilité de la région d'El Eulma.

Le choix de la méthode DRASTIC pour l'évaluation de la vulnérabilité sur la base de la diversification des paramètres qui se basent sur les informations géologiques, pédologiques, hydrogéologiques et les sources de pollutions. Pour chaque paramètre, on a réalisé des cartes thématiques sur lesquelles sont délimitées des zones caractérisées par un indice de Vulnérabilité partiel du paramètre correspond cet indice est égal au poids par sa cote.

6-1 Paramètre profondeur de la nappe D

Ce paramètre a été estimé à partir des données de niveau statique en périodes hautes eaux de la nappe en 6 zones

Les indices calculés ont put nous faire sortir la carte des profondeurs dont

L indice le plus élevé 45 est localisé dans la région de Kaouane, ouled Amrane et Medjaz, indices 35 est localisé dans la zone Debia, Indice 25 au centre et au environ de la ville El Eulma, Indice 15 on le trouve a Bazer, Smara, Djemane et au Nord de la ville d'El Eulma, les indices 10 et 15 sont localisées dans les zones externes de la région.

Fig 125

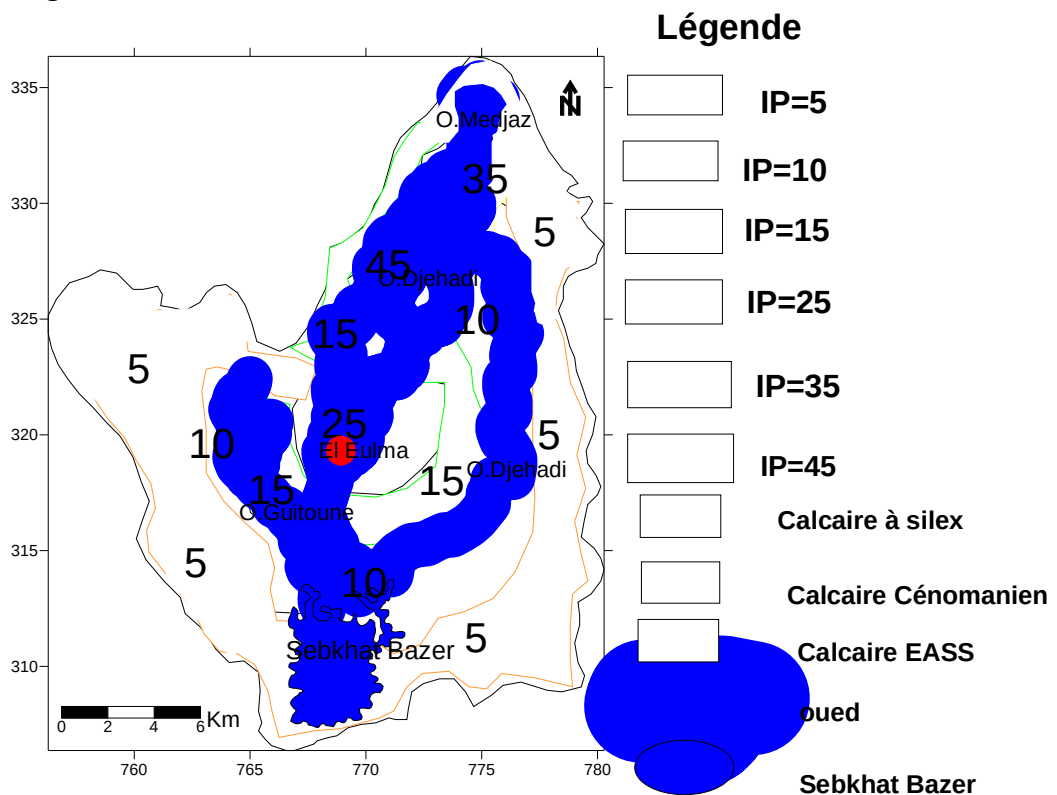


Fig N ° 125 Carte des Indices des profondeurs

6-2 Paramètre de la recharge efficace R

Elle concerne la quantité d'eau qui alimente la nappe lors des précipitations ou par couverture nivale qui tombe dans la région, pour renouveler les stocks d'eau souterraines et entretenir le débit de l'écoulement souterrain, après circulation dans les formations hydrogéologiques du sous-sol.

Pour notre étude, en fonction du bilan hydrologique et la quantification de la recharge qui est estimé a 36 mm sur l'ensemble du bassin versant. Fig 126

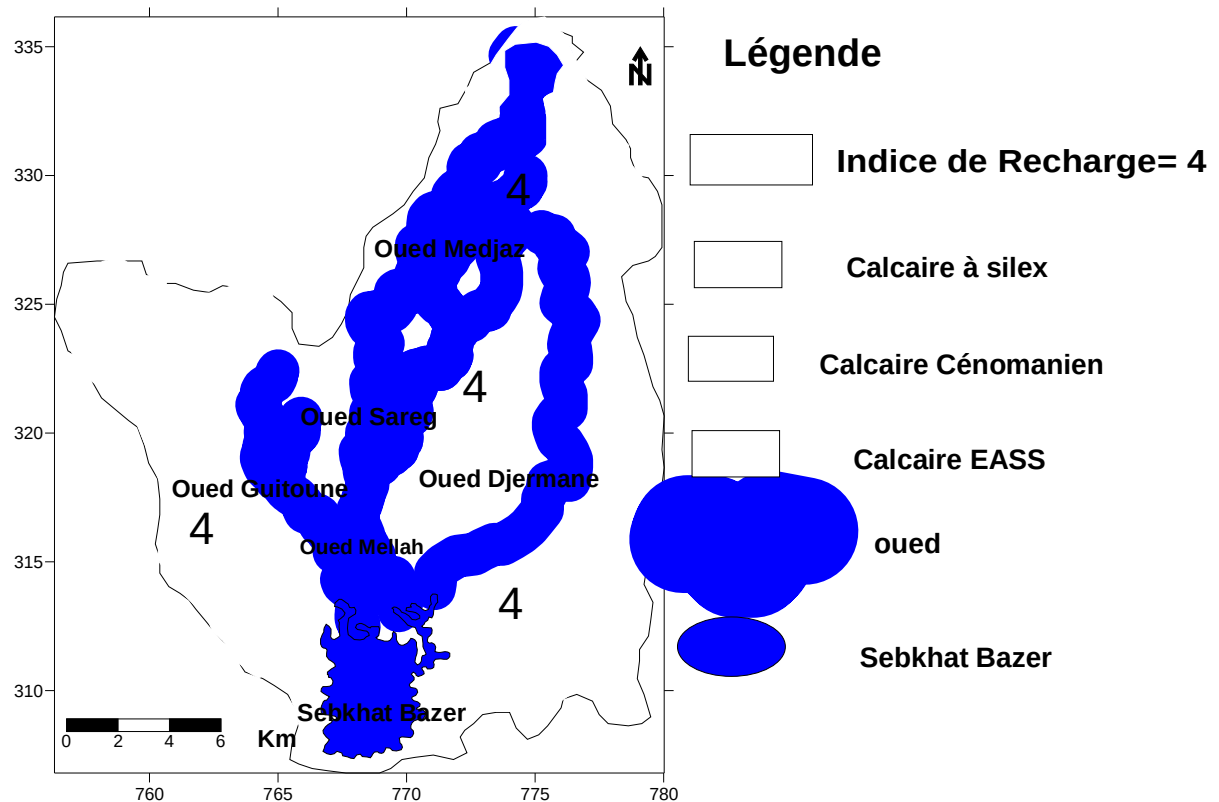


Fig N ° 126 Carte des indices de la recharge

6-3 Paramètres nature du matériel aquifère (A).

Les coupes de puits creusé dans l'aquifère superficielle ainsi que l'étude géophysique ont montré que la région est formée d'alluvions des sables argileux et ce qui correspond a un indice partiel égal à 24 et 18 Fig 127

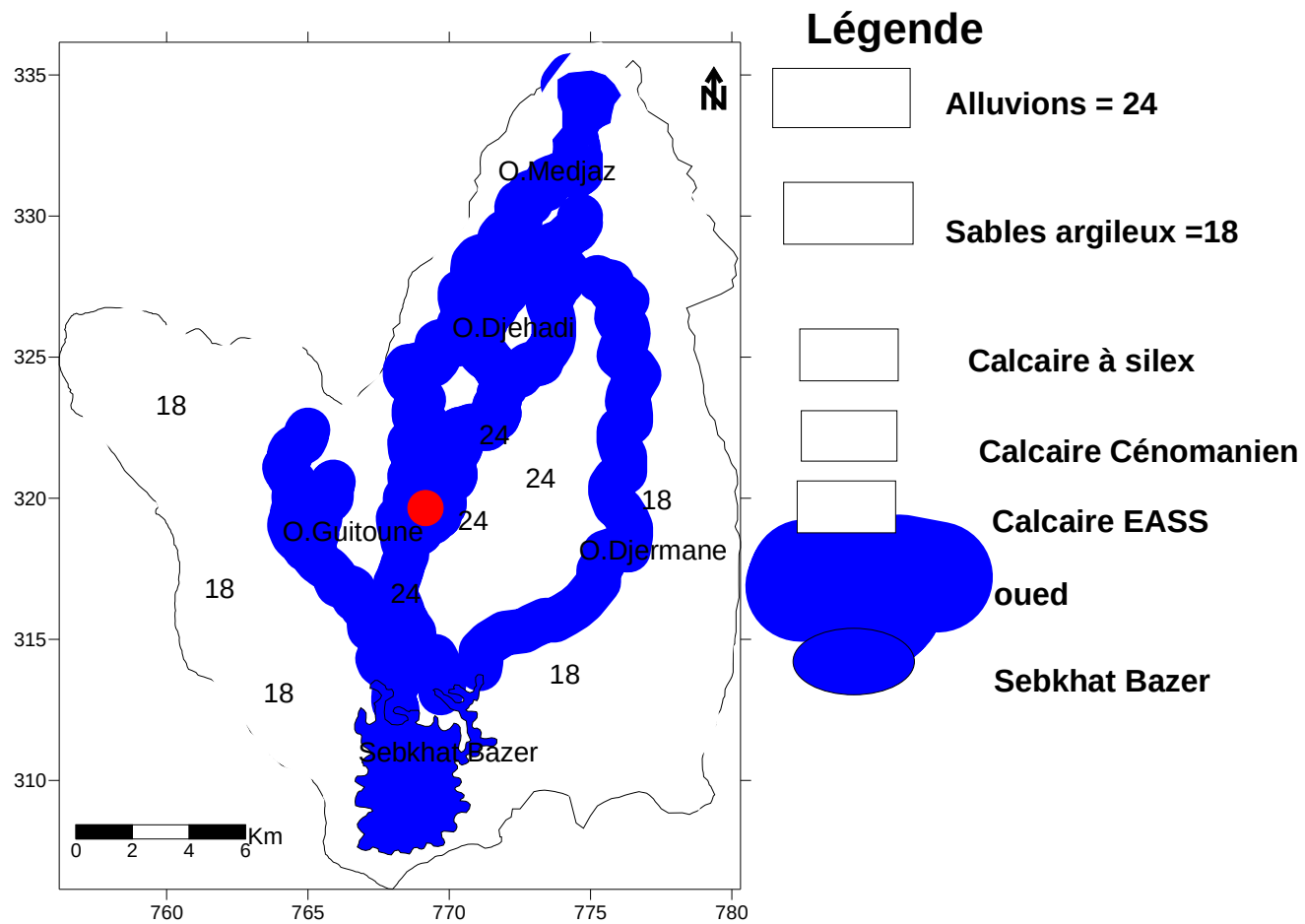


Fig N °127 Carte du matériel aquifère

6-4 Paramètre nature du sol (S)

Les descriptions des profils pédologiques ont montré que le sol a une texture limono argileux donc l'indice partiel pour l'ensemble de la région est de 6 Fig128

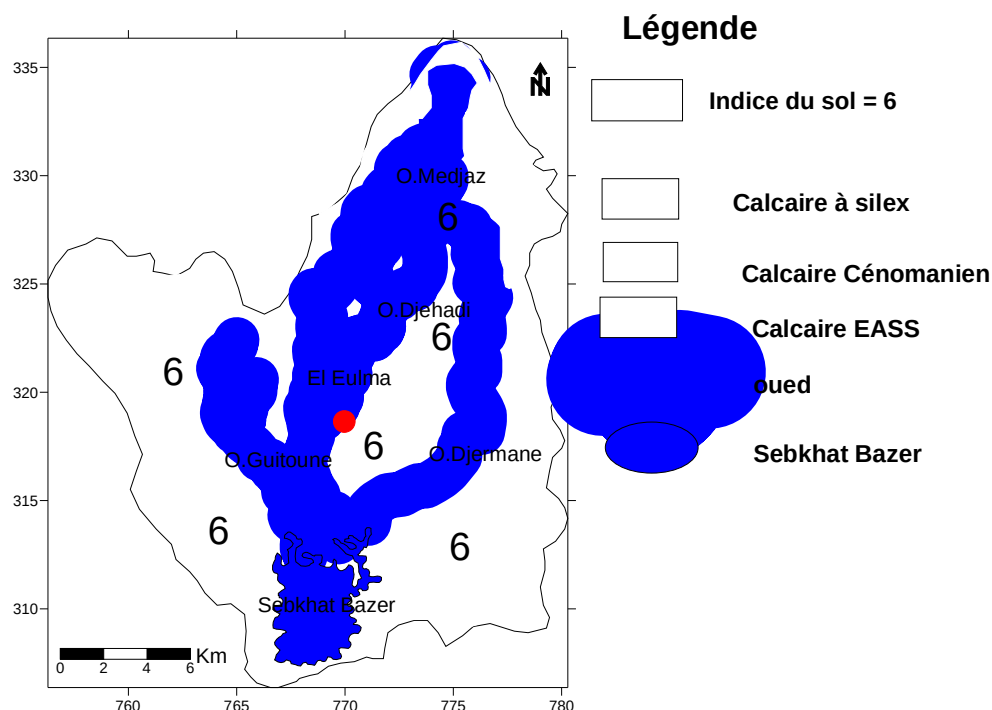


Fig N°128 Carte de la nature du sol

6-5 Paramètre topographie (T).

La pente du terrain influe directement sur le temps de concentration des polluants, elle contrôle l'infiltration. L'examen de la carte topographique de la région fait ressortir deux plages de pentes (0-2)% et (2-6)% Fig 129

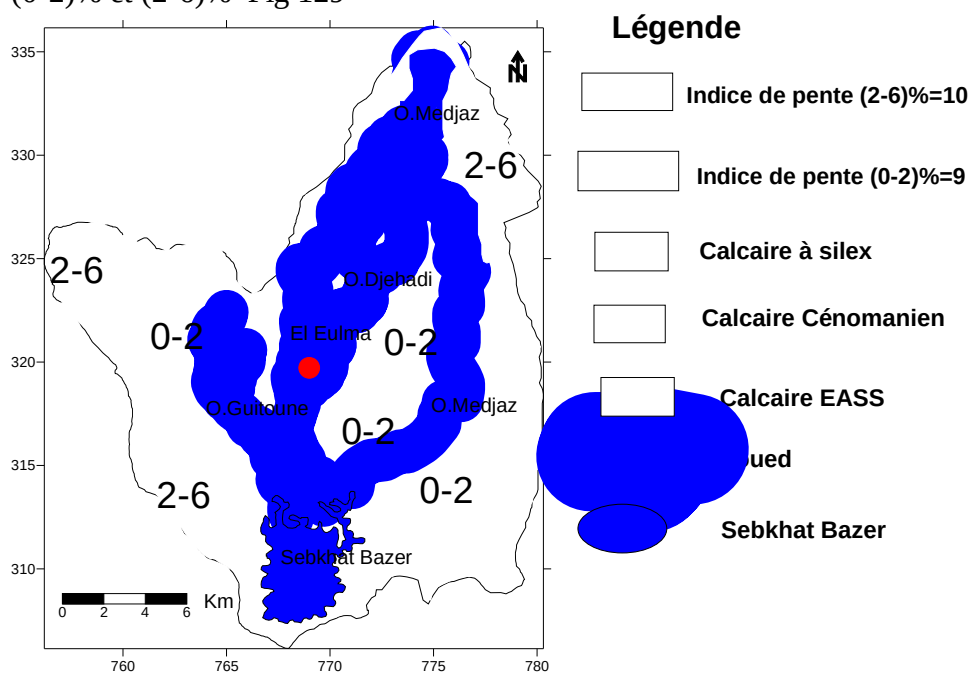


Fig N° 129 Carte des Indices de pente

6-6 Paramètre impact de la zone non saturée (I).

L'impact de la zone non saturée est considérée comme étant un paramètre très important par la méthode DRASTIC .Car la nature et l'épaisseur de la zone comprise entre la surface du sol et l'aquifère, contrôlent la vulnérabilité à la pollution des réservoirs .Généralement composée par deux zones :

Sable et graviers pour la zone 1.

Argiles pour la zone 2.

Les indices partiels sont 30 et 5.Fig 130

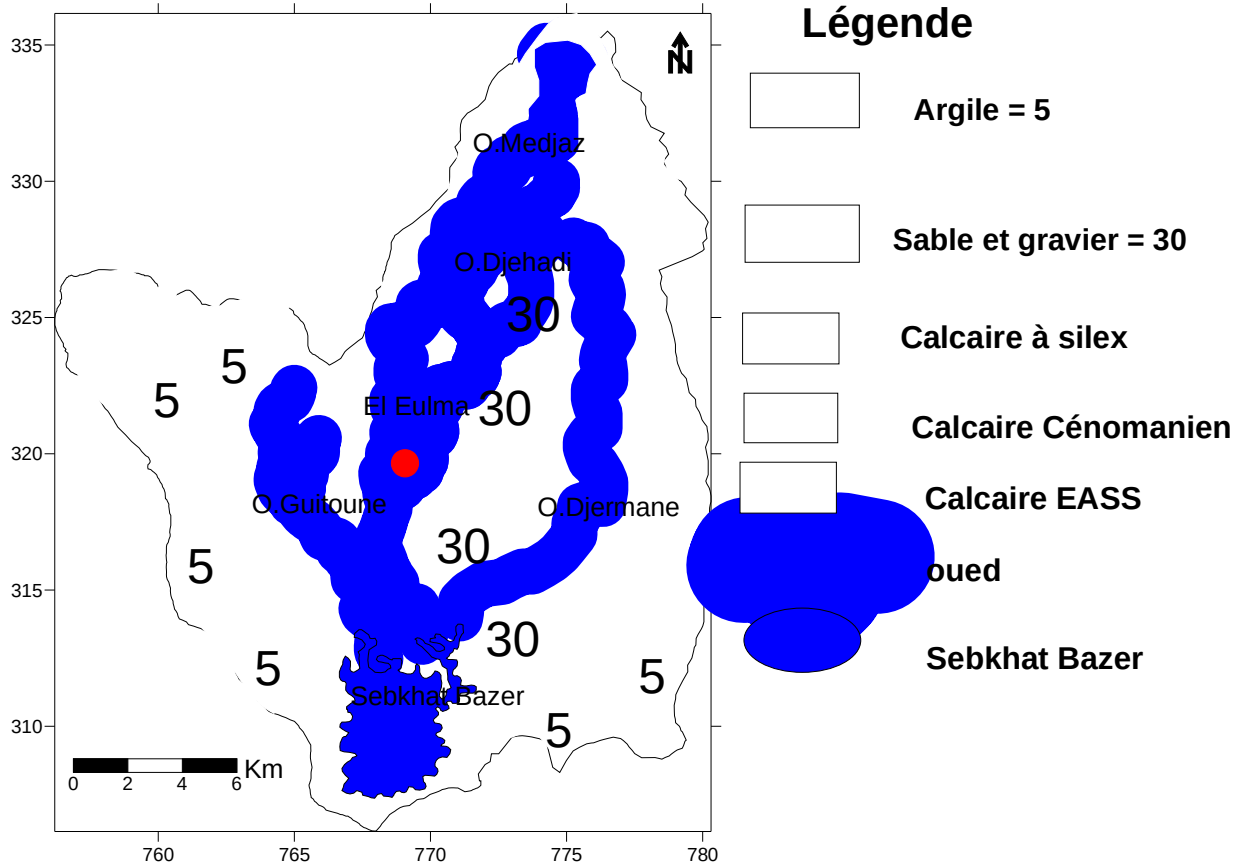


Fig N ° 130 Carte de la zone non saturée

6-7 Paramètre conductivité hydraulique (C).

Ce paramètre a été évalué par l'interprétation des essais de pompage et l'application de la formule de Dessargues(Géophysique) pour déterminer la perméabilité La région est caractérisée par trois zones de perméabilité différentes qui varie entre 10^{-2} ,

10^{-4} , 10^{-5} m/s. Les indices partiels qui résultent de cette perméabilité sont 30, 24,6

Les valeurs Fig 131

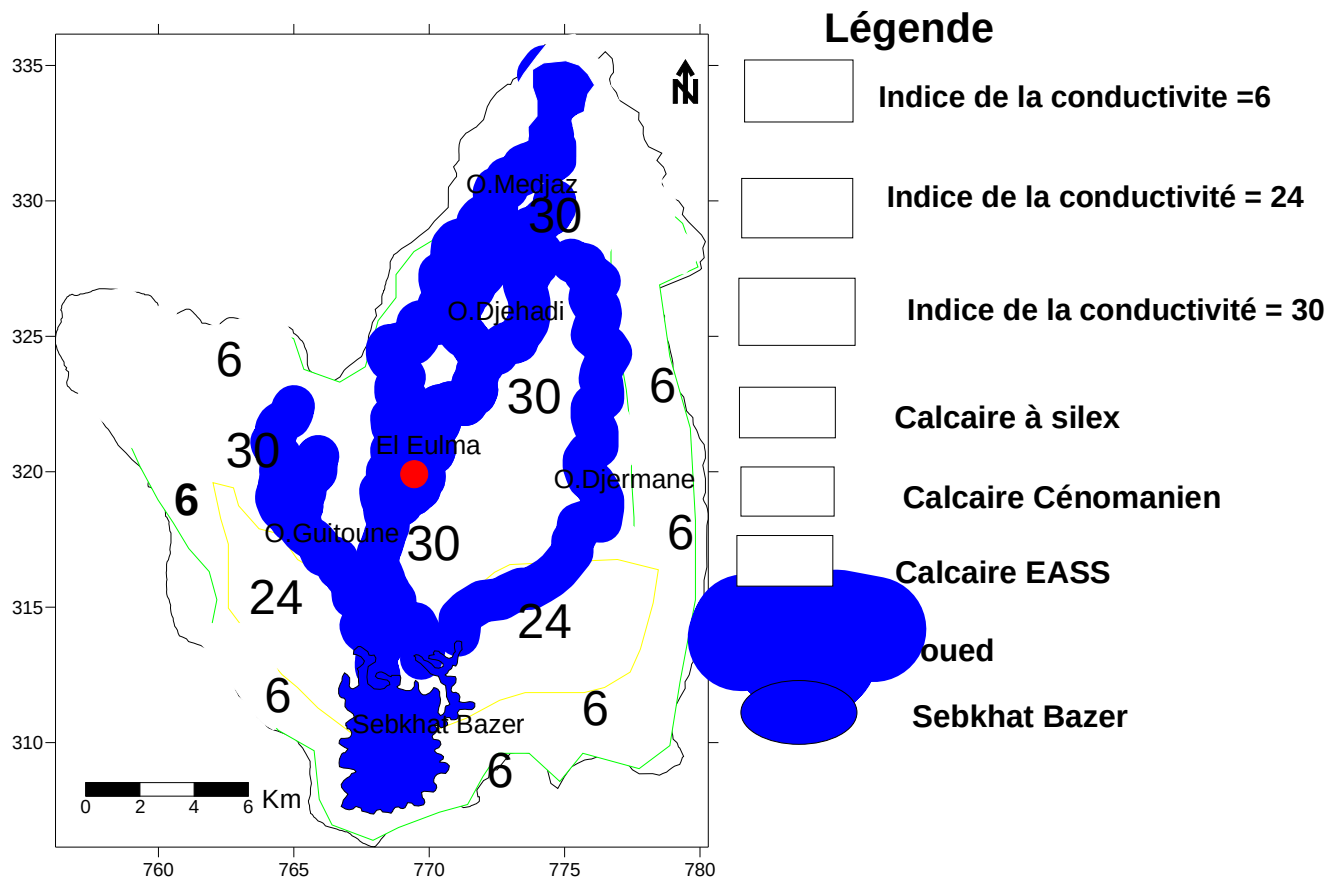


Fig N ° 131 Carte des indices de Conductivité

7 Carte de vulnérabilité

La superposition des sept cartes a permis de tracer la carte finale de vulnérabilité (Fig 132). La relève trois zones de degré de vulnérabilité différentes. Les zones de faible vulnérabilité qui se localise dans le secteur périphérique de la région, la zone de moyenne vulnérabilité localisée à l'est de la ville d'El Eulma entre Oued Djermane et Oued Djehadi et dans la plaine de Bazer Sakra, la zone de forte vulnérabilité coïncide avec les secteurs des cours d'eau et Sebkhats Bazer.

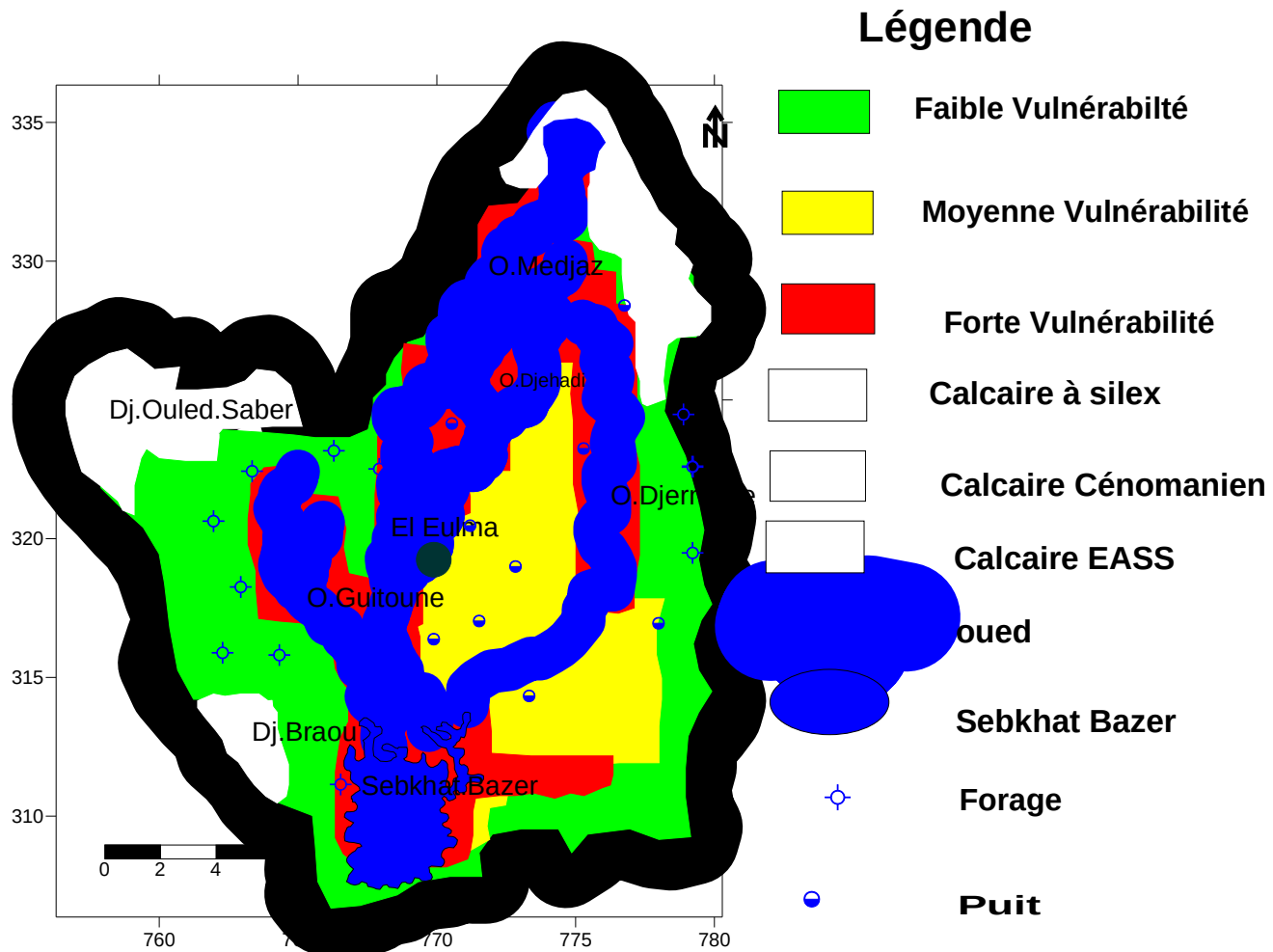


Fig N°132 Carte de vulnérabilité de la région d'El Eulma

8 Conclusion

L'étude de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC nous a permis de mettre en relief la présence de trois zones de vulnérabilité. La zone de faible et moyenne vulnérabilité occupent une superficie de 60% alors que la zone de forte vulnérabilité couvre le reste du terrain .Il est intéressant d'évaluer la vulnérabilité de la région a la pollution chimique à l'aide d' autres méthodes et de les comparer entre eux afin de déterminer avec précision les différentes zones de vulnérabilité .

Modélisation du transport de Polluant en 3D

1 Introduction :

La simulation de la propagation des polluants a été étudiée par plusieurs auteurs, Bear et Verruijt (1987), Bear (2008), Cherry (1984), Ferreira (1988), Freind (1987), Khemmoudj.k (1992, 2002), Konikow et Godd (1998), Konikow et Bredehoeft (1984), Schiang Li et Kyle (2002). Plusieurs modèles mathématiques ont été développés et appliqués afin d'étudier le comportement et la propagation des polluants dans les aquifères pour protéger la ressource en eau. L'objectif de notre travail est l'étude de la simulation de propagation par la méthode des caractéristiques en 3D dans l'aquifère superficiel des argiles sableuses de la plaine El Eulma, suite à un accident sur l'autoroute Est-Ouest au Nord de la ville d'El Eulma afin de mieux connaître le déplacement des contaminants dans l'environnement.

2 Équation de conservation de masse.

La loi de conservation de l'état de masse donnée par la surface A fermée. L'expression mathématique de la loi de conservation de masse est donnée par la relation 1 Fig 133

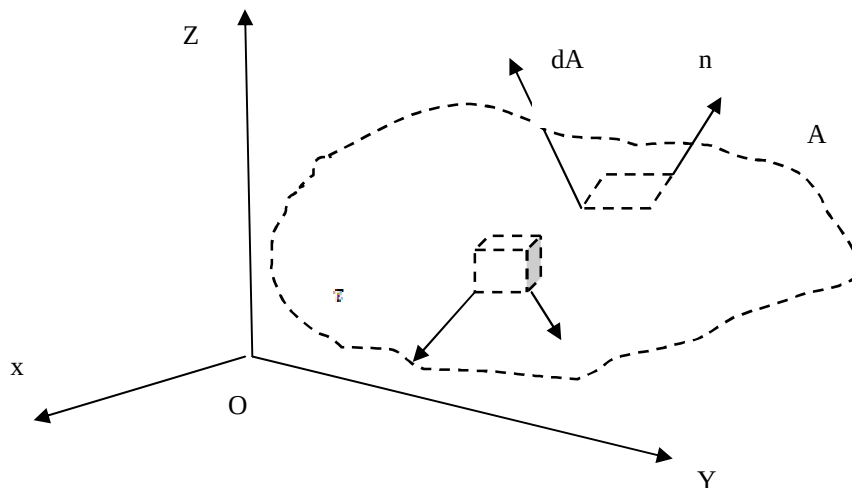


Fig N°133 Présentation de la masse élémentaire

$$-\frac{D}{Dt}(\rho \Delta \tau) = 0 \quad (1)$$

L'équation de continuité peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{D\rho/Dt}{\rho} + \frac{D\Delta\tau/Dt}{\Delta\tau} = 0 \quad (2)$$

Si on considère la masse totale du fluide dans la surface A, l'équation 2 peut s'écrire :

$$\lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum \left[\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} \Delta\tau + \frac{D(\Delta\tau)}{Dt} \right] \quad (3)$$

Le premier terme de l'équation 3 peut s'écrire sous la forme intégrale :

$$\iiint \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{q}) \right] d\tau \quad (4)$$

Le second terme de l'équation 3 représente le débit de changement du volume :

$$\lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum \frac{D}{Dt}(\Delta\tau) = \iiint \nabla \cdot \mathbf{q} d\tau \quad (5)$$

On combine l'équation 4 et 5 on aura l'équation :

$$\iiint_V \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{q}) \right] d\tau = 0 \quad (6)$$

Donc l'équation de continuité est obtenue :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{q}) = 0 \quad (7)$$

L'équation 7 peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{q} \cdot (\nabla \rho) + \rho \nabla \cdot \mathbf{q} = 0$$

Or

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (8)$$

Lorsque $\nabla \cdot \mathbf{q}$ est un fluide compressible est équivalent quand la densité change le fluide devient compressible.

Dans les coordonnées cartésiennes équation 7

s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (9a)$$

Dans le cas d'un fluide incompressible la relation devient

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (9b)$$

C'est-à-dire $\rho = \text{constante}$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

3 Equation de mouvement (Equation de Navier –Stokes).

On considère une masse fluide en mouvement au temps t occupe un volume V limitée par une surface A , $d\tau$ un élément du volume et $\rho d\tau$ la masse élémentaire en mouvement avec une vitesse $\mathbf{q}$ Khemmoudj.A (1987) et Yuan.S (1969)

$-\rho d\tau \left(\frac{D\mathbf{q}}{Dt} \right)$ L'action de la force d'inertie (principe d'Alembert) sur la masse élémentaire.

La résultante de la force d'inertie au temps t change linéairement

$$\mathbf{F}_I = - \iiint_V \frac{D\mathbf{q}}{Dt} \rho d\tau \quad (10)$$

Si l'action de la force par unité de masse sur le volume élémentaire noté par $\mathbf{X}$, avec $\mathbf{X} \rho d\tau$ est la force élémentaire, la résultante de ses forces est donnée par

$$\mathbf{F}_B = \iiint_V \mathbf{X} \rho d\tau \quad (11)$$

Action de la force élémentaire sur la surface élémentaire dA est donnée par l'expression du vecteur

$$\mathbf{F} = i_x f_x + i_y f_y + i_z f_z = i_x (P_x \cdot dA) + i_y (P_y \cdot dA) + i_z (P_z \cdot dA) \quad (12)$$

dA élément de la surface vectoriel, et P_x, P_y, P_z sont données par les expressions :

$$P_x = i\sigma_{xx} + j\sigma_{xy} + k\sigma_{xz}$$

$$P_y = i\sigma_{yx} + j\sigma_{yy} + k\sigma_{yz}$$

$$P_z = i\sigma_{zx} + j\sigma_{zy} + k\sigma_{zz}$$

La résultante des forces de surfaces est donnée par :

$$F_s = i_x \iint P_x dA + i_y \iint P_y dA + i_z \iint P_z dA \quad (12a)$$

On appliqué le théorème de divergence de Gauss pour l'équation (12a) on aura :

$$F_s = i_x \iiint \nabla P_x d\tau + i_y \iiint \nabla P_y d\tau + i_z \iiint \nabla P_z d\tau \quad (12b)$$

La résultante des équations 10 ,11 ,12b donne la relation

$$F_I + F_B + F_s = 0$$

$$\left(- \iiint \frac{D\rho}{Dt} d\tau \right) + \left(\iiint X\rho d\tau \right) + \left(i_x \iiint \nabla P_x d\tau + i_y \iiint \nabla P_y d\tau + i_z \iiint \nabla P_z d\tau \right) = 0 \quad (13)$$

$$\iiint \left\{ -\rho \frac{D\rho}{Dt} + \rho X + [i_x (\nabla P_x) + i_y (\nabla P_y) + i_z (\nabla P_z)] \right\} d\tau = 0 \quad (13a)$$

$$\rho \frac{D\rho}{Dt} = \rho X + i_x (\nabla P_x) + i_y (\nabla P_y) + i_z (\nabla P_z) \quad (13b)$$

On introduit les expressions de P_x, P_y, P_z dans l'équation (13b) on aura ,l'équation de mouvement dans les coordonnées cartésiennes.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho X_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (14a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho X_y + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (14b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho X_z + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (14c)$$

Avec X_x, X_y, X_z sont les composantes de la force du corps par unité de masse selon les directions x, y, z. L'opérateur :

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + q \nabla = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (15)$$

Remarque :

On sait que :

Euler : consiste à considérer un point fixe de l'espace et à étudier, en fonction du temps, ce qui se passe en ce point.

On déterminera en fonction du temps, la vitesse des particules des fluides qui viennent successivement passer par ce point. La vitesse $\vec{V}$ étant déterminée par ses trois composantes u, v, w sur trois axes OX, OY, OZ

On disposera donc les trois équations suivantes :

$$\vec{V} \begin{cases} u = f(x, y, z, t) \\ v = \varphi(x, y, z, t) \\ w = \psi(x, y, z, t) \end{cases}$$

u, v, w sont les variables d'Euler .

Lagrange, consiste à individualiser une particule déterminée du fluide et à la suivre dans ses mouvements.

On procède comme pour la cinématique d'un système matériel, c'est-à-dire qu'on exprime les coordonnées d'un point M de la masse fluide en fonction du temps et de la position.

$$M \begin{cases} x = f(x_0, y_0, z_0, t) \\ y = \varphi(x_0, y_0, z_0, t) \\ z = \psi(x_0, y_0, z_0, t) \end{cases}$$

x, y, z sont les variables de Lagrange.

Les deux méthodes définissent le système de référence pour étudier le mouvement d'un fluide quelconque.

On peut déduire des équations (14a), (14b), (14c) les trois équations **De Navier – Stokes** du mouvement d'un fluide compressible visqueux.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + q \cdot \nabla u \right) = \rho X_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla q) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \quad (17a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + q \cdot \nabla v \right) = \rho X_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} (\nabla q) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \quad (17b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + q \cdot \nabla w \right) = \rho X_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} (\nabla q) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \quad (17c)$$

4 Equation de continuité

En hydrogéologie les équations d'écoulement et de transport, caractérisées par la combinaison :

De l'équation de conservation de masse

Les lois empiriques de Darcy et la loi de Fick's

Quantité de masse entrée – Quantité de masse sortie = masse emmagasinée

q_x = la charge spécifique de direction X (flux de volume par surface) au point X, Y, Z

On considère la masse d'écoulement à travers le plan y-z

$$q_x \rho dy dz$$

L'écoulement d'entrée à travers la direction y-z est :

$$[\rho q_x] dx dz - \frac{\partial}{\partial x} [\rho q_x] \frac{dx}{2} dx dz$$

L'écoulement de sortie à travers la direction y-z est :

$$[\rho q_x] D dx dz + \frac{\partial}{\partial x} [\rho q_x] \frac{dx}{2} dx dz$$

La différence d'écoulement selon la direction x est

$$-\frac{\partial}{\partial x}[\rho q_x]dxdydz$$

L'écoulement a travers la direction y dans le plan dxdz

$$\left[[\rho q_y]dxdz - \frac{\partial}{\partial y}[\rho q_y]\frac{dy}{2}dxdy \right] - \left[[\rho q_y]dxdz + \frac{\partial}{\partial y}[\rho q_x]\frac{dy}{2}dxdz \right] = -\frac{\partial}{\partial y}[\rho q_y]dxdydz$$

Le flux de masse nette dans la direction z

$$-\frac{\partial}{\partial z}[\rho q_z]dxdydz$$

Le flux total sortant du VER est

$$\left[-\frac{\partial[\rho q_x]}{\partial x} - \frac{\partial[\rho q_y]}{\partial y} - \frac{\partial[\rho q_z]}{\partial z} \right]dxdydz$$

On considère la dérivée par rapport au temps = 0 (système permanent)

$$-\left[\frac{\partial[\rho q_x]}{\partial x} + \frac{\partial[\rho q_y]}{\partial y} + \frac{\partial[\rho q_z]}{\partial z} \right]dxdydz = \frac{\partial M}{\partial t} = 0$$

Appliquons la loi de Darcy pour

$$q_x = -K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}, \quad q_z = -K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}$$

Dans le cas anisotrope on aura la tenseur principale de direction :

$$\vec{q} = -K\nabla h$$

A densité constante pour les eaux souterraines, on aura

$$0 = -\rho \left[\frac{\partial[q_x]}{\partial x} + \frac{\partial[q_y]}{\partial y} + \frac{\partial[q_z]}{\partial z} \right]$$

On substitue les expressions de q dans l'équation

$$0 = (-)\rho \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right]$$

Dns le cas d'un milieu homogène est isotrope l'équation s'écrit sous la forme :

$$k \left[\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right]$$

Avec ∇^2 Opérateur Laplacien

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

5 Transport de polluants

Les phénomènes de transport en été étudié afin de comprendre le mécanisme de propagation de polluant dans les aquifères, pour une meilleure compréhension des phénomènes, après description du milieu des résolutions analytiques ont été développée, ainsi que des modèles numériques réalisés .En appliquons la méthode de résolution numérique de l'équation différentielle partiel hyperbolique par la méthode des caractéristiques.

5-1 Rappel de l'équation différentielle (EDP)

L'équation différentielle partielle est de la forme

$$L(u) = f$$

Elles peuvent être classées en équation

Elliptique, Parabolique et Hyperbolique.

L'équation peut s'écrire sous la forme

$$a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2b \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + c \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = F \left(x, y, u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (1)$$

avec a,b,c, sont des fonctions de x et y, si l'équation est linéaire la fonction F est linéaire

ü Si $b^2 - ac > 0$ l'équation 1 est **hyperbolique**

Par transformation de coordonnées $\xi(x, y), \eta = \eta(x, y)$

L'équation hyperbolique est réduite à la forme canonique suivante :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} = G \left(\xi, \eta, u, \frac{\partial u}{\partial \xi}, \frac{\partial u}{\partial \eta} \right)$$

ü Si $b^2 - ac = 0$ l'équation 1 est **parabolique**, la réduction sous forme canonique suivante :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} = G \left(\xi, \eta, u, \frac{\partial u}{\partial \xi}, \frac{\partial u}{\partial \eta} \right)$$

ü Si $b^2 - ac < 0$ l'équation 1 est **elliptique**, la réduction sous forme canonique suivante :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} = G \left(\xi, \eta, u, \frac{\partial u}{\partial \xi}, \frac{\partial u}{\partial \eta} \right)$$

5-2 Méthodes de solutions des équations différentielles.

Après discussion des conditions aux limites et les conditions initiales, on classe les méthodes de résolution des équations différentielles en méthodes analytiques et méthodes numériques tableau 76

Tableau 76 Méthodes de résolution des EDP

EDP	Méthodes analytiques	Méthodes numériques
	Séparations de variables	Méthodes de différences finies
	Solutions similaires	Méthodes des éléments finis
	Techniques de Variables Complexes	Méthodes de collocations
	Transformations de Laplace et Fourier	Méthodes des caractéristiques
	Fonctions de Green's	Méthodes des éléments aux frontières
	Série de Puissance	
	Perturbations singuliers et réguliers	

5-3 Formulation de l'équation du transport :

La loi de conservation de l'équation advective –dispersive, pour le transport de soluté dans un milieu poreux étudié par, Bear (1972 ,1979 ,2008) , Cherry (1985).

La loi de conservation pour le soluté dans un milieu poreux considère, le flux de soluté entrant et sortant dans un volume élémentaire

La masse du soluté transporté dans la direction x par advection et dispersion est donnée par :

La masse transportée par advection est : $\overline{v_x} n C dA$

La masse transporté par dispersion est : $n D_x \frac{\partial C}{\partial x} Da$

$$D_x = \alpha_x \overline{v_x} + D^*$$

L'équation différentielle décrivant le phénomène de transport des contaminants' espèces K en 3D, dans les systèmes d'écoulements transitoires est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\theta v_j C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n$$

Avec

θ = Porosité du milieu souterrain

C^k = Concentration dissout d'espèce K ML⁻³

t = le temps

$x_{i,j}$ Distance de coordonné cartésien

$D_{i,j}$ tenseur de coefficient de dispersion hydrodynamique L²T⁻¹

V_i vitesse d'écoulement des eaux = v_i^t / θ

Q_s débit d'écoulement par unité de volume de l'aquifère

C_s^k concentration d'espèce k ,

$\sum R_n$ Terme de réaction chimique ML⁻³T⁻¹

Le terme

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \theta \frac{\partial C^k}{\partial t} + C^k \frac{\partial \theta}{\partial t} = \theta \frac{\partial C^k}{\partial t} + q'_s C^k$$

$$\sum R_n = -\rho_b \frac{\partial C^k}{\partial t} - \lambda_1 \theta C^k - \lambda_2 \rho_b \overline{C^k}$$

ρ_b = densité du milieu souterrain

$\overline{C^k}$ = Concentration de l'espèce K absorbé par le milieu souterrain

λ_1 = débit de réaction du premier ordre de la phase dissout

λ_2 = débit de réaction de la phase solide

On introduit l'équation 2 et l'équation 3 dans l'équation 3, Donc l'équation (1) s'écrit sous la forme suivante :

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial \overline{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s - q'_s - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \overline{C} \quad (5)$$

L'équation 5, est l'équation d'état d'équilibre de la masse. Le changement d'équilibre de la masse emmagasinée en phases (dissoute ou absorbée) donnée au temps t ,est égale la différence de la masse entrée (Inflow) et la masse sortie (outflow) due à la dispersion ,advection ,entrée /sortie ,au réactions chimiques .

L'équation de transport est en relation avec l'équation d'écoulement par la loi de Darcy

$$v_i = \frac{q_i}{\theta} = -\frac{k_i}{\theta} \frac{\partial h}{\partial x_i}$$

k_i = Composante principale de la tenseur de la perméabilité

h = Le niveau piézométrique.

Avec h est obtenue par la résolution tridimensionnelle de l'équation d'écoulement des eaux souterraines.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad S_s = \text{Coefficient d'emmagasinement}$$

5-4 Advection :

Le terme d'advection dans l'équation du transport $\partial(\theta v_i)/\partial x_i$ décrit le mouvement de transport

d'un contaminant miscible en fonction de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines.

A différentes échelles des problèmes de transport de contaminants, le terme d'advection domine d'autres termes. La mesure du degré de domination d'advection est donnée par le nombre de Peclet, qui est donnée par :

$$P_e = \frac{|v|L}{D}$$

$|v|$ = le module du vecteur vitesse

L = La longueur caractéristique

D = Coefficient de dispersion

Dans les problèmes à domination advective, on s'intéresse à la forme du front, le nombre de Peclet à une grande valeur, or pour les problèmes purement advective le nombre de Peclet est proche à l'infinité. Deux cas peuvent se présenter (cas de l'effet de la dispersion numérique, et l'effet de l'oscillation artificiel) Fig 134

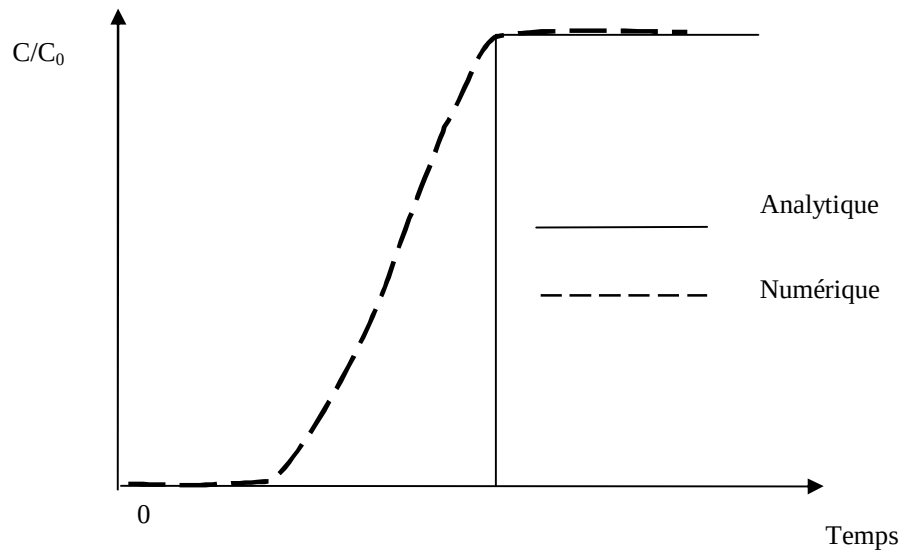


Fig N° 134 Cas de l'effet de la dispersion numérique

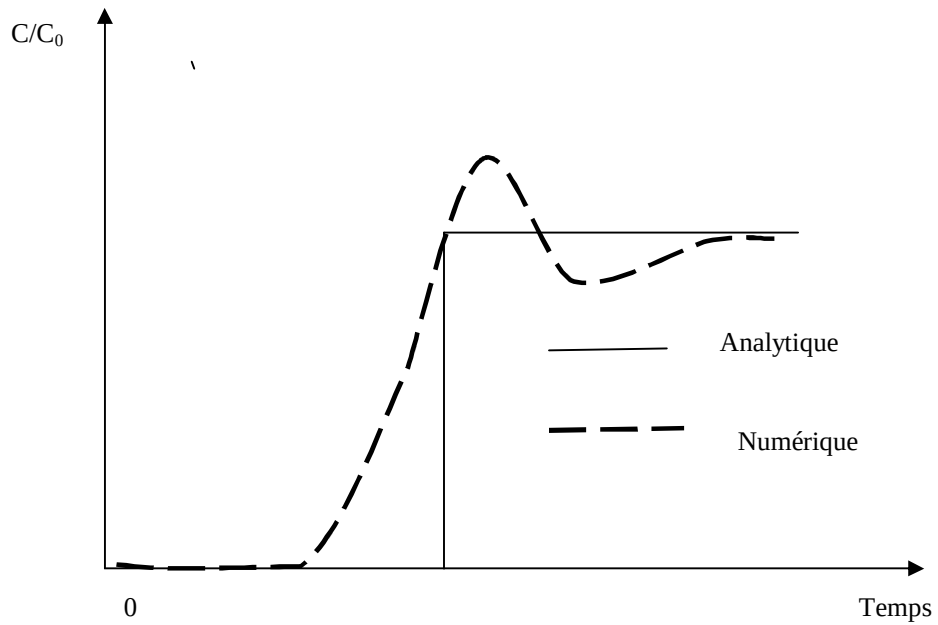


Fig N° 135 Cas de l'effet de l'oscillation artificiel

Rappel

Dans un milieu poreux la variation de la vitesse d'écoulement est due a la variation du profile de la vitesse du fluide Fig 136

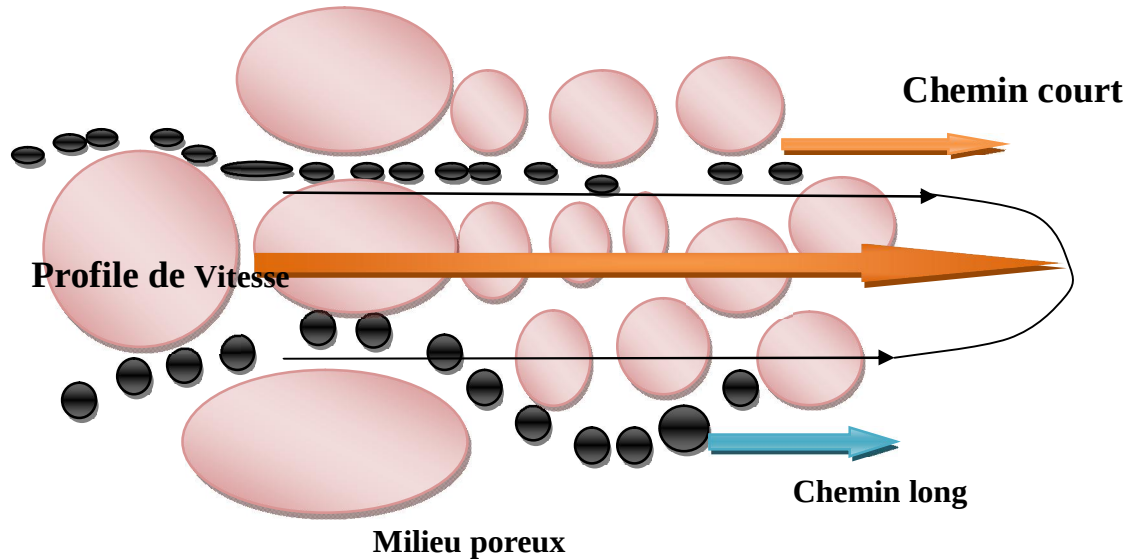


Fig N°136 Présentation du profile de vitesse d'écoulement

5-5 Dispersion Longitudinale

Le changement de la concentration en fonction du temps dans un domaine bidimensionnelle est donnée par

$\frac{\partial c}{\partial t}$ (variation de la concentration) = $\left[D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right]$ (dispersion) - $V_x \frac{\partial c}{\partial x}$ (advection) Fig 137 et 138

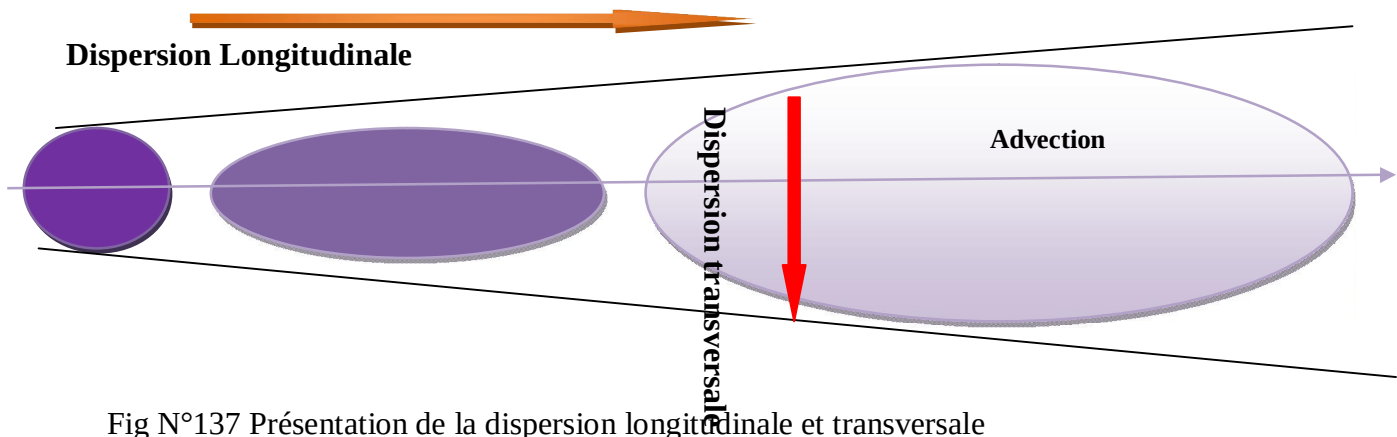


Fig N°137 Présentation de la dispersion longitudinale et transversale

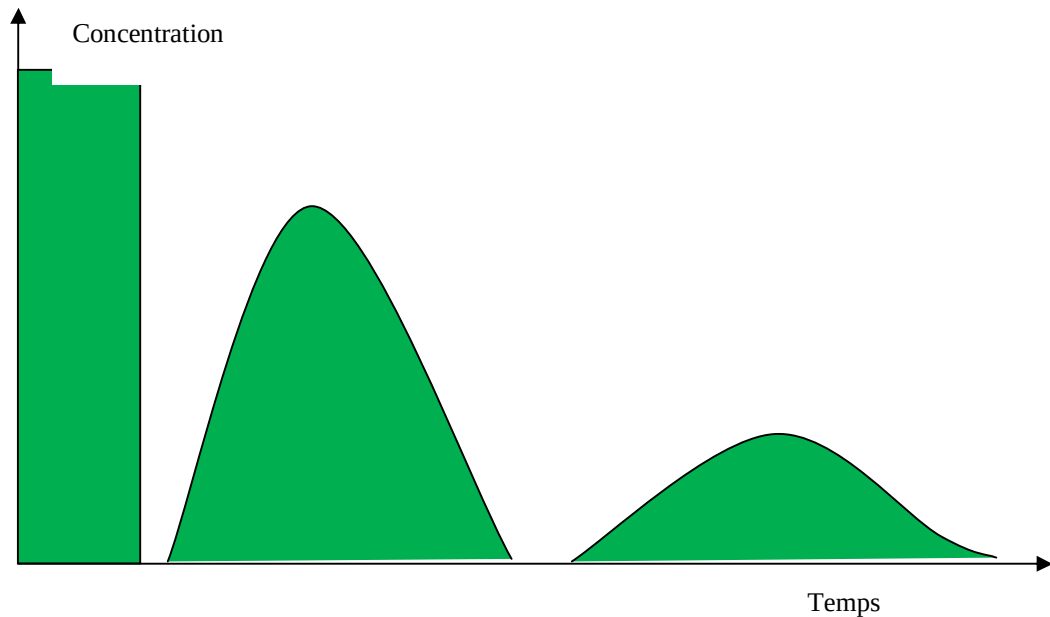


Fig N° 138 Profile de l'évolution de la concentration du polluant

5-6 Le coefficient de dispersion

La tenseur de la dispersion hydrodynamique, D_{ij} , dans un milieu poreux isotrope est définie par Bear (1972, 1979, 2008) par les composantes suivantes

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_z^2}{|v|} + D^* \quad (1)$$

$$D_{yy} = \alpha_L \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_z^2}{|v|} + D^*$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_y^2}{|v|} + D^*$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_x v_y}{|v|}$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_x v_z}{|v|}$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_y v_z}{|v|}$$

Avec

D_{xx}, D_{yy}, D_{zz} = Composantes principale de la tenseur de Dispersion

$D_{xy}, D_{xz}, D_{yx}, D_{yz}, D_{zx}$ = Terme diagonale de la tenseur de dispersion

α_L = Dispersivité longitudinale

α_T = Dispersivité Transversale

D^* = Le coefficient de diffusion moléculaire effective

v_x, v_y, v_z = les composantes du vecteur vitesse le long de x, y, z

$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ = module du vecteur vitesse

Dans le cas d'un milieu isotrope, Frind (1987) a proposé la dispersivité transversale horizontale α_{TH} et la dispersivité transversale verticale α_{TV} .

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^*$$

$$D_{yy} = \alpha_L \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^*$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_y^2}{|v|} + D^*$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_x v_y}{|v|}$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_x v_z}{|v|}$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_y v_z}{|v|}$$

5-7 Les conditions initiale et aux limites :

Les conditions initiales.

On sait que la formulation de l'équation du transport, décrit les changements transitoires de la concentration de soluté dans les eaux souterraine. Or les conditions initiales sont nécessaire pour obtenir la solution de l'équation. En générale les conditions initiales sont données par :

$$C(x, y, z, t) = C_0(x, y, z) \quad \text{dans } \Omega \quad t = 0$$

Les conditions aux limites.

La solution de l'équation de transport, requière la spécification des conditions aux limites. Trois types de conditions aux limites sont considérés

La concentration est connue a travers les limites (Conditions de Dirichlet) :

$$C(x, y, z, t) = C_1(x, y, z, t) \quad \text{sur } \Gamma_1, t \geq 0$$

La concentration est un gradient connue à travers la limite (Conditions de

$$\text{Neumann}) \quad \theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} = f_i(x, y, z, t) \quad \text{sur } \Gamma_2, t \geq 0$$

La combinaison des deux premières (Condition de Cauchy)

$$\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} - q_i C = g_i(x, y, z, t) \quad \text{sur } \Gamma_3, t \geq 0$$

6 Méthode des Caractéristiques. (MOC) Method of Characteristics

Théorie général.

La méthode des caractéristiques (MOC) analyse l'écoulement des eaux souterraines transitoire et le transport de polluant formulé par les équations différentielles hyperbolique (Huyakorn et Pinder 1983) Fig 139

6-1Présentation des équations différentielles hyperbolique du premier ordre .

Soit l'équation quasi linéaire

$$\left\{ \begin{array}{l} a \frac{\partial u}{\partial x} + b \frac{\partial u}{\partial t} = c \quad (1) \\ x, t \text{ variable d'espace et de temps} \\ a, b, c \text{ sont des fonctions de } x, t, u \\ \text{si } b \neq 0 \end{array} \right.$$

Equation (1) peut s'écrire

$$\frac{a}{b} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{c}{b} = 0 \quad (2)$$

La différentiation de l'équation donne

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \frac{\partial u}{\partial x}$$

Or

$$\frac{dx}{dt} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{du}{dt} = 0 \quad (3)$$

On introduit l'équation 3 dans l'équation 2 On obtient

$$\left(\frac{a}{b} - \frac{dx}{dt} \right) \frac{\partial u}{\partial x} - \left(\frac{c}{b} - \frac{du}{dt} \right) = 0 \quad (4)$$

L'équation (4) est réduit a une équation différentielle ordinaire dont la courbe est définie par :

$$\left(\frac{a}{b} \right) - \left(\frac{dx}{dt} \right) = 0 \Rightarrow \frac{dx}{dt} = \frac{a}{b} \quad (5)$$

Cette courbe s'appelle caractéristique, ou courbe simple a caractéristique

Donc l'équation (4) peut s'écrire sous la forme

$$\frac{du}{dt} = \frac{c}{a} \quad (6)$$

La résolution de cette équation se fait analytiquement ou numériquement, les équations (4) et

(5) peut s'écrire par l'égalité suivante :

$$\frac{dx}{a} = \frac{dt}{b} = \frac{du}{c} \quad (7)$$

6-2 Equation hyperbolique du second degré .

La procédure de dérivation caractéristique du premier ordre peut être appliqué aux équations du second ordre .On considère l'équation hyperbolique générale de la forme :

$$a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + c \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + e = 0 \quad (8)$$

Avec a, b, c, et e en général, fonction de x, t et la dérive première de u

En définie p et q par

$$P = \frac{\partial u}{\partial x} \text{ et } q = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (9)$$

$$dp = \frac{\partial u^2}{\partial x^2} dx + \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} dt \quad (10) \quad , \quad dq = \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} dx + \frac{\partial^2}{\partial t^2} dt \quad (11)$$

La résolution des deux équations donne la solution

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{dp}{dx} - \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \frac{dt}{dx} \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{dq}{dt} - \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \frac{dx}{dt} \quad (13)$$

Introduisant les équations 12 et 13 dans l'équation 8 on aura :

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right) \left(-a \frac{dt}{dx} - c \frac{dx}{dt} + b \right) + \left(e + a \frac{dp}{dx} + c \frac{dq}{dt} \right) = 0 \quad (14)$$

On multiplie les termes de l'équation par $-\frac{dt}{dx}$ donc on aura :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \left[a \left(\frac{dt}{dx} \right)^2 + c \frac{dx}{dt} \frac{dt}{dx} - b \frac{dt}{dx} \right] - \left[a \frac{dp}{dx} \frac{dt}{dx} + c \frac{dq}{dt} \frac{dt}{dx} + e \frac{dt}{dx} \right] = 0 \quad (15)$$

On suppose le plan (x, t), la courbe caractéristique et définie par :

$$a \frac{dp}{dx} \frac{dt}{dx} + c \frac{dq}{dx} + e \frac{dt}{dx} = 0 \quad (16)$$

on multiplie les termes par dx on aura :

$$adx \frac{dp}{dx} \frac{dt}{dx} + c dx \frac{dq}{dx} + e dx \frac{dt}{dx} \text{ donc on aura :}$$

$$a \frac{dt}{dx} dp + c dq + e dt = 0 \quad (17)$$

la courbe caractéristique définie par l'équation :

$$a \left(\frac{dt}{dx} \right)^2 - b \left(\frac{dt}{dx} \right) + c \quad (18)$$

sous la forme $AX^2 - bX + C$

$$X = x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \Rightarrow \left(\frac{dt}{dx} \right)_{\mp} = b \pm \sqrt{b^2 - 4ac} / 2a \quad (19)$$

Par convention on pose

$$\left(\frac{dt}{dx} \right)_{+} = f \text{ et } \left(\frac{dt}{dx} \right)_{-} = g$$

Dans le cas simple l'équation (8) est linéaire à coefficients constante

Donc il existe deux courbes caractéristiques de pente : $\left(\frac{dt}{dx} \right)_{+}$ et $\left(\frac{dt}{dx} \right)_{-}$

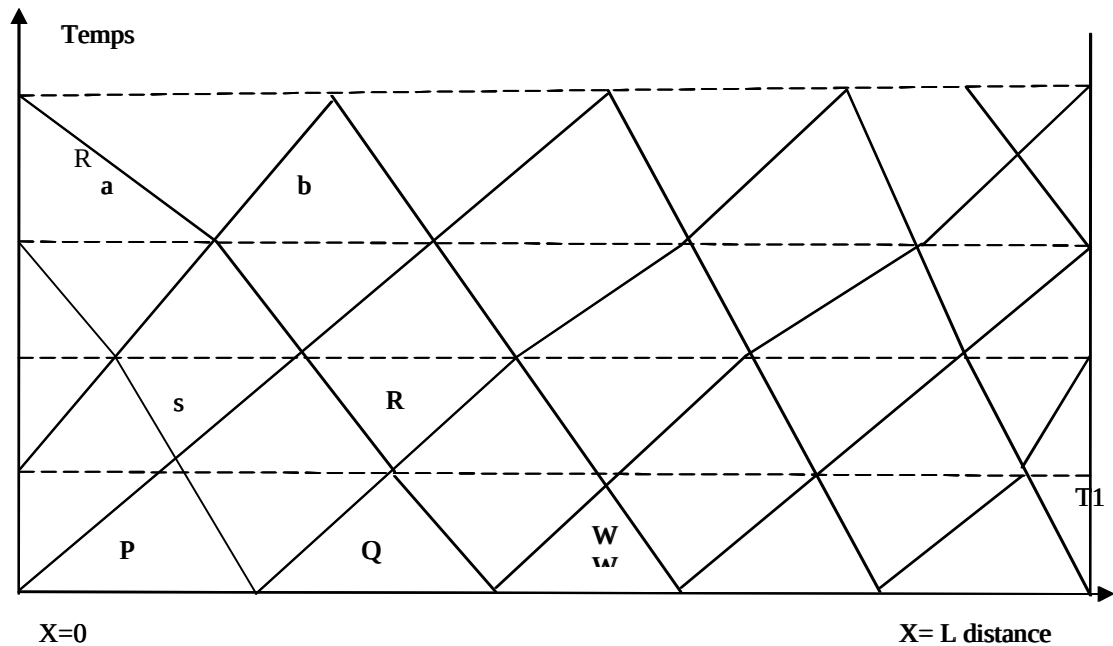


Fig. N° 139 **Discrétisation des mailles de la solution numérique par la méthode des caractéristiques**

$$a = \left(\frac{dt}{dx} \right)_+ = f \quad b = \left(\frac{dt}{dx} \right)_- = g$$

Résolution de l'équation (8)

Par intégration numérique, le long des deux courbes caractéristiques

Le plan (X, T), avec X = L La distance, T le temps.

Les coordonnées du point R dans le domaine (X, T), sont données par

$$\begin{cases} T_R - T_P = f_P(X_R - X_P) & (20a) \\ T_R - T_Q = g_Q(X_R - X_Q) & (20b) \end{cases}$$

$$\text{Avec } f = \left(\frac{dt}{dx} \right)_+ \quad g = \left(\frac{dt}{dx} \right)_-$$

On cherche la solution de X_R et T_R On obtient :

$$X_R = \frac{1}{f_P - g_Q} (f_P X_P - g_Q X_Q + t_Q - t_P) \quad (22a)$$

$$t_R = t_P + f_P (X_R - X_P) \quad (22b)$$

L'équation (17) est écrite sous forme de différence finis est appliqué sur les segments PR et QR

$$\alpha_p f_p(p_R - p_P) + c_p(q_R - q_P) + e_p(t_R - t_P) = 0 \quad (23a)$$

$$\alpha_Q g_Q(p_R - p_Q) + c_Q(q_R - q_Q) + e_Q(t_R - t_Q) = 0 \quad (23b)$$

La solution de p_R et q_R sont données par :

$$p_R = \frac{1}{\alpha_p f_p/c_p - \alpha_Q g_Q/c_Q} \left[\alpha_p f_p p_P/c_p - \alpha_Q g_Q p_Q/c_Q + q_P - q_Q + \left(e_P/c_P - e_Q/c_Q \right) t_R + e_P t_P/c_P - e_Q t_Q/c_Q \right] \quad (23a)$$

$$q_R = e_P (t_P - t_Q)/c_P + \alpha_p f_p (p_P - p_R)/c_P + q_P \quad (23b)$$

La valeur de u au point R est déterminée par l'équation différentielle

$$du = p dx + q dt \quad (25a)$$

On écrit l'équation (25a) sous différence finie, on aura l'approximation pour u_R :

$$u_R = \frac{1}{2} \left[u_P + \frac{1}{2} (p_R - p_P)(x_R - x_P) + \frac{1}{2} (q_R - q_P)(t_R - t_P) + u_Q + \frac{1}{2} (p_R - p_Q)(x_R - x_Q) + \frac{1}{2} (q_R - q_Q)(t_R - t_Q) \right] \quad (25b)$$

Si l'équation différentiel partiel 5 est linéaire le calcul des inconnues au point R est considérée complet, Cependant si l'équation est quasi linéaire l'itération peut être performante : Donc les valeurs de x_R et t_R peuvent être donnée par :

$$t_R - t_P = \frac{1}{2} (f_P - f_R)(x_R - x_R) \quad (26a)$$

$$t_R - t_Q = \frac{1}{2} (f_P - f_Q)(x_R - x_Q) \quad (26b)$$

Les valeurs de p_R et q_R Sont obtenue par les solutions :

$$\overline{\alpha_p f_p}(p_R - p_P) + \overline{c_p}(q_R - q_P) + \overline{e_p}(t_R - t_P) = 0 \quad (27a)$$

$$\overline{\alpha_Q g_Q}(p_R - p_Q) + \overline{c_Q}(q_R - q_Q) + \overline{e_Q}(t_R - t_Q) = 0 \quad (27b)$$

Avec :

$$\overline{\alpha_p} = (\alpha_p - \alpha_R)/2, \quad \overline{c_p} = (c_p - c_R)/2, \quad \overline{e_p} = (e_p - e_R)/2$$

$$\overline{\alpha_Q} = (\alpha_Q - \alpha_R)/2, \quad \overline{c_Q} = (c_Q - c_R)/2, \quad \overline{e_Q} = (e_Q - e_R)/2$$

Le point Q ferme le point P, le nombre d'itération est très petit. les étapes de calcule au temps $T = 1-3$ se répètent au point S qui est l'intersection des lignes caractéristiques entre le point Q et un autre point initiale W. La procédure de la solution continue de manière à évaluer la fonction u dans le domaine (x, t)

7 Application de la méthode des caractéristiques pour la résolution de l'équation de transport de polluants.

Comme en a mentionné ci-dessus ,que la méthode des caractéristiques (MOC) ,originalelement elle est appliquée pour la résolution des phénomènes de transport dans le milieu poreux ,par Garder ,Peacemann ,Pozzi (1964) pour la simulation des déplacements miscible dans les réservoirs .Elle devient très populaire chez US Geological Survey des modèles de transport à 2D (Konikow ,Bredehoeft 1978) .

La MOC utilise conventionnellement la technique de transport de particule pour la résolution du terme advective, c'est-à-dire chercher la concentration et la position dans un système de coordonnées cartésiennes Fig N° 140

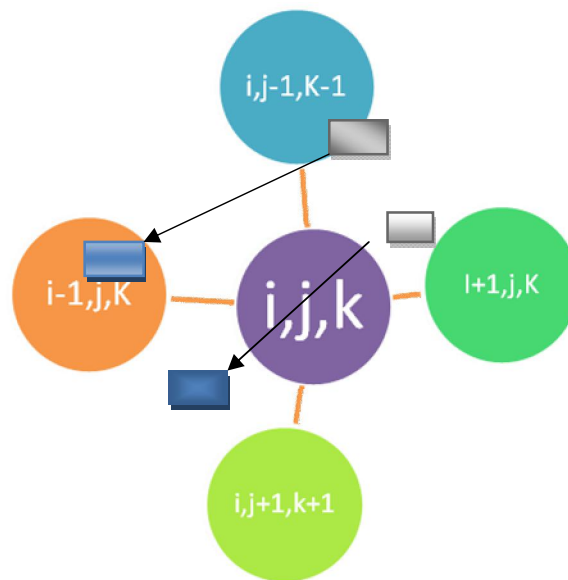


Fig N° 140 Discretisation de la méthode des caractéristiques

La concentration intermédiaire dans la maille (i,j,k) ,due a l'advection est donnée par l'expression C_m^n .

L'algorithme de La moyenne arithmétique utilisé pour la concentration intermédiaire est donnée par l'expression suivante

$$C_m^n = \frac{1}{NP_m} \sum_{p=1}^{NP_m} C_p^n \quad \text{si } NP_m > 0$$

Avec

NP_m = Nombre de particule dans la maille m

C_p^n = La concentration de la particule P^{in} du temps précédent de niveau (n)

Zeng (1993) présente un algorithme moyen basé sur le volume de la maille

$$C_m^{n*} = \frac{\sum_{p=1}^{NP_m} V_p C_p^n}{\sum_{p=1}^{NP_m} V_p} \quad \text{si } NP_m > 0$$

$$C_m^R = \omega C_m^{n*} + (1 - \omega) C_m^n$$

ω = Facteur poids varie entre 0.5 et 1

8 Simulation de la propagation d'un polluant dans la nappe superficiels des argiles sableuses après accident de transport de carburant dans l'autoroute Est –Ouest (Nord de la ville d'El Eulma)

8-1 Présentation du problème

L'Autoroute Est –Ouest longe la ville d'El Eulma au Nord, elle est réalisée sur les argiles sableuses de la nappe des formations superficielles. Caractérisée par la présence des trois oueds (Sareg, Djehadi, Djermane), Dans le cas d'un accident de circulation sur l'autoroute, il y'aura transport rapide du polluant en surface qui sera transite progressivement vers l'aquifère. notre objective c'est de faire une simulation de la propagation de ce polluant par la méthode des caractéristiques, afin de prévoir le comportement de ce polluant dans l'aquifère superficielle des argiles sableuses dont les paramètres physiques sont données dans le tableau 7

8-2 Application de la simulation .

Afin de simuler la propagation des polluants issue de l'accident, sur autoroute est- ouest est de comprendre le chemin des particules formant le polluant Fig 141

Le logiciel appliqué est Inteactive Groundwater Modelling (IGW 4.7) Pr SHUGUANG LI AND ASSOCIATES Michigan State university college of Engeneering version 2002.

Les étapes du mode de fonctionnement du logiciel

Définition du projet.

Import des documents de bases (La carte géologique du terrain)

Définition du terrain et discrétisation (couches aquifères)

Définition des paramètres des formations géologiques de chaque aquifères

Temps de simulation

Input Data (entré des donnée)

Tableau 77 Paramètres du modèle

Transmissivity	Coefficient d'emmagasinement
Hydraulic conductivity	River D
Aquifer top Elévation	River Leakage
Aquifère Bottom Elévation	River Bottom Elevation
Aquifère Thickness	Drain Conductance
Partition ing Coefficient	Drain Elévation
Specific Storage	Storage Coefficient
Longtudinal Dispesivity	Calibration Concentration
Effective Porosity	Calibration Head
Recharge	

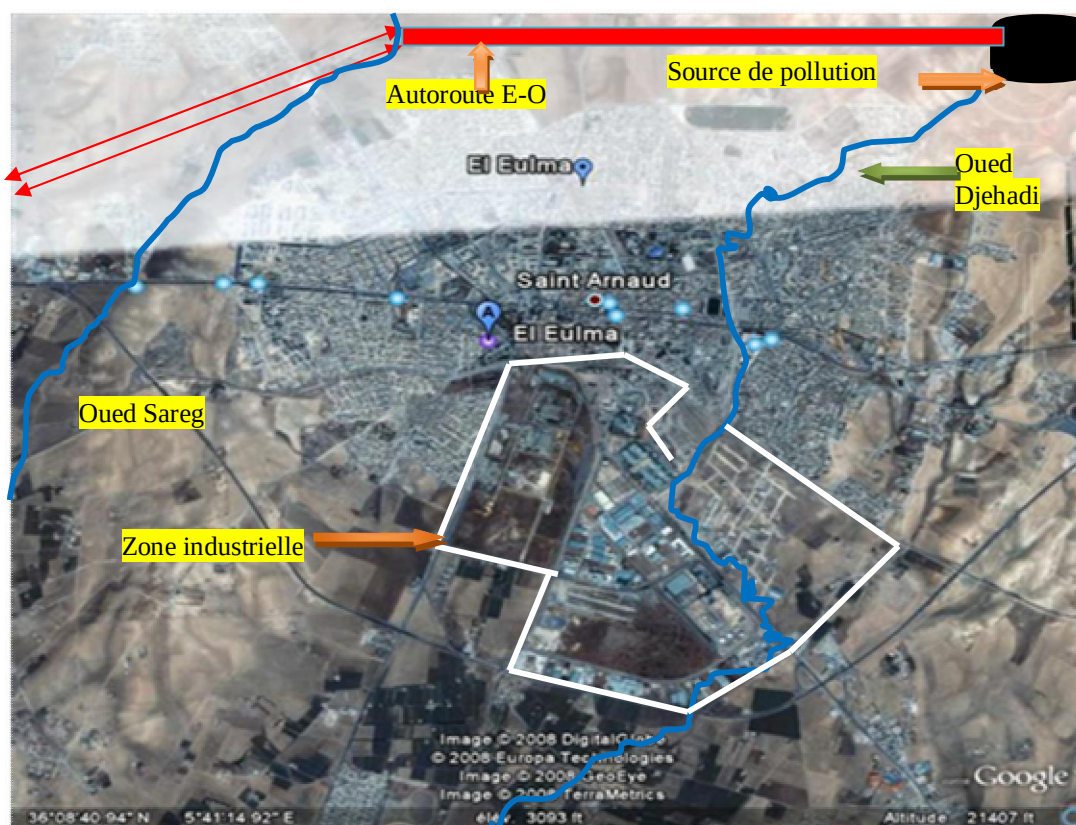


Fig N °141 Présentation de la ville d'El Eulma avec l'autoroute Est –Ouest

Tab 78 Paramètres physiques des argiles sableuses

Paramètres physiques	Symbole	Unité	Argiles sableuses
X	X	km	16
Y	Y	km	14
ΔX		m	100
ΔY		m	100
Toit de l'aquifère	Aq top	m	-2
Mure de l'aquifère	Aq Bot	m	-50
Epaisseur	e	m	48
Porosité	n	%	0.04
Perméabilité	K	cm/s	$3.4 \cdot 10^{-4}$
Transmissivité	T	m^2/s	$6.5 \cdot 10^{-4}$
k_x/k_y	sans	sans	1
T_x/T_y	sans	sans	10
Coef d'emmagasinement	S	sans	$0.61 \cdot 10^{-5}$
Recharge	Rech	cm/an	10
Dispersion Longitudinale	D_L	m	8.8
Dispersion Transversale	D_T	m	0.88
Dispersion verticale	D_V	m	0.088
Coefficient de partition	K_d		0
Coefficient de retard	Rt		0
Vitesse de direction X	V_x	cm/s	0.75
Vitesse de direction Y	V_y	cm/s	0.075
Vitesse de direction Z	V_z	cm/s	0.0075
Concentration	C	mg/l	300
Temps	T	s	946080000
Type de l'aquifère	Aq		Libre

8-3 Discussion des résultats.

La simulation de l'étude du comportement de la propagation du pollutions issue d'un accident sur l'autoroute Est –Ouest qui longe la ville d'El Eulma au Nord. le logiciel nous a donné la discrétisation de la région après avoir placé les piézomètres d'observation Fig 142 .

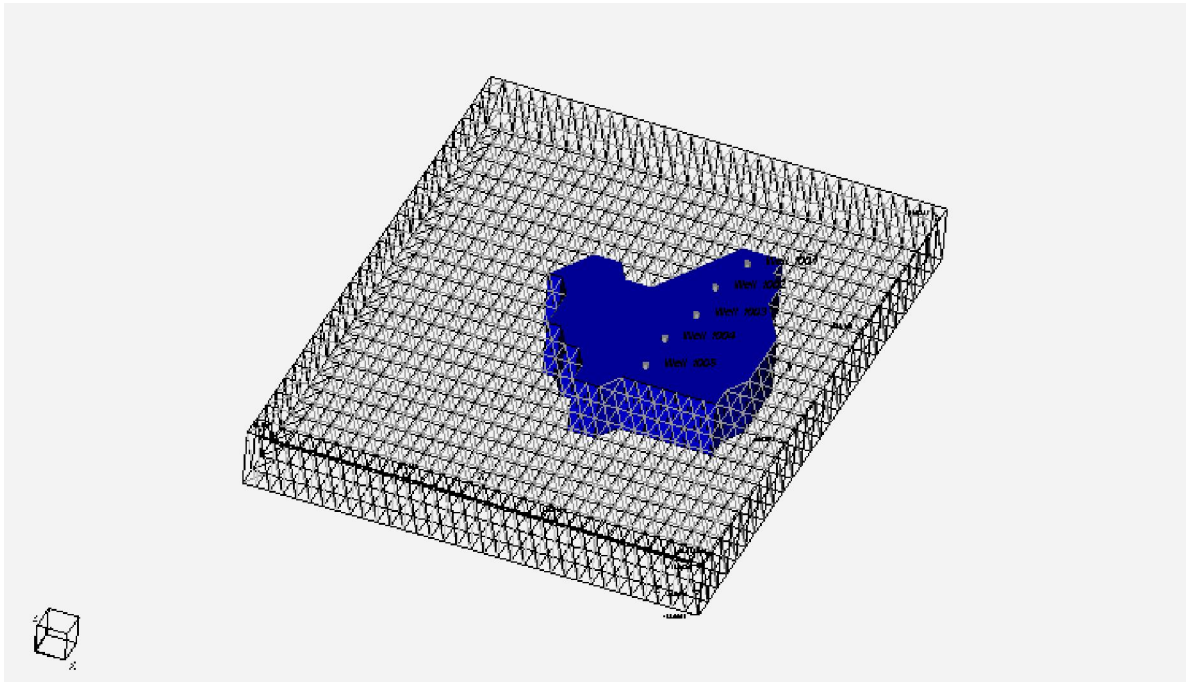


Fig N°142 Présentation de la discrétisation de la région avec piézomètres d'observation

Nous constatons que le polluant se propage rapidement en fonction de la nature lithologique des formations géologique, ce qui explique l'interaction entre le milieu souterrain et les eaux souterraines ainsi l'effet des paramètres physiques sur le polluant lui-même est les réactions chimiques qui se déroulent lors du transit du polluant dans le milieu poreux .Fig 143 et 144. Le polluant se propage tout le long de l'oued ce qui montre l'évolution de la concentration en fonction du temps et la distance parcouru .Fig 145 et 146 .

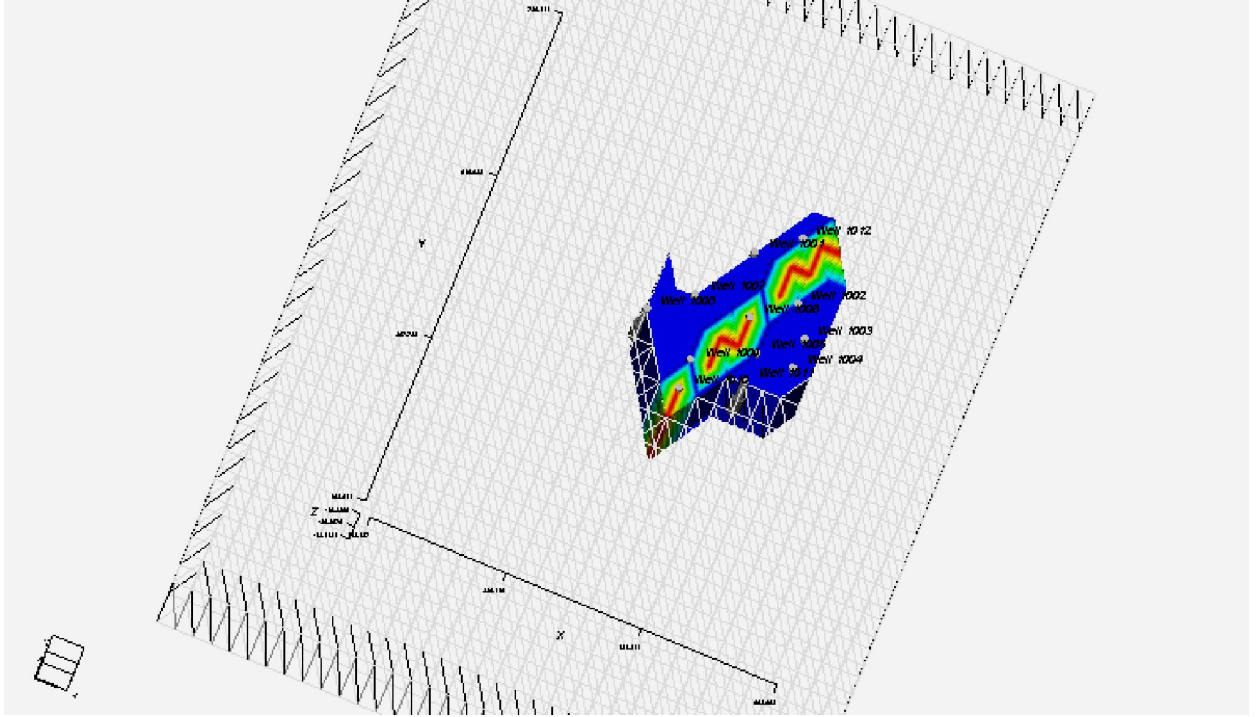


Fig N°143 Présentation du polluant dans l'aquifère en 3D avec discrétisation

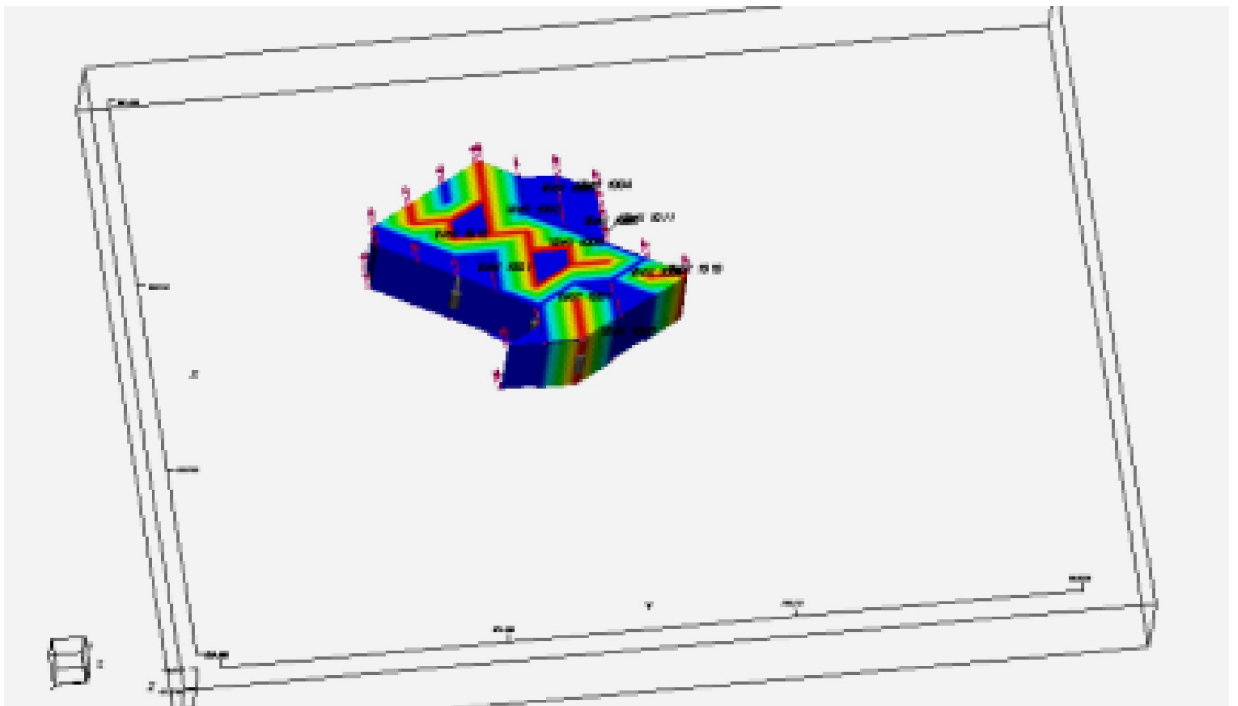


Fig N° 144 Présentation de la propagation du polluant en 3D avec le sens d'écoulement

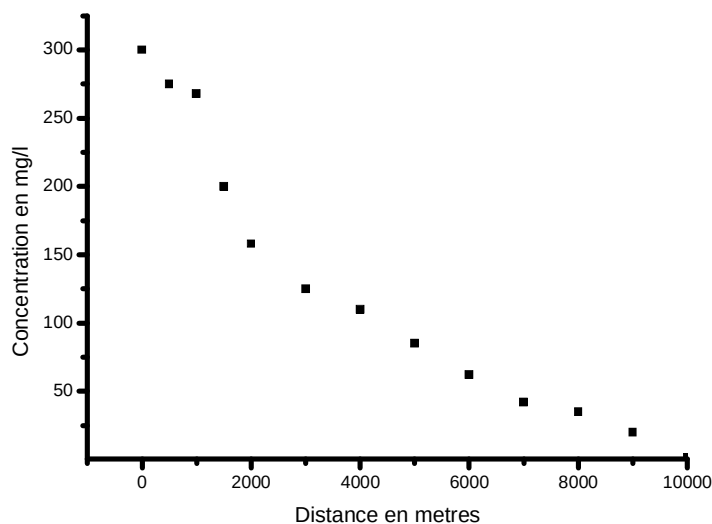


Fig N°145 Évolution de la concentration en fonction de la distance parcouru

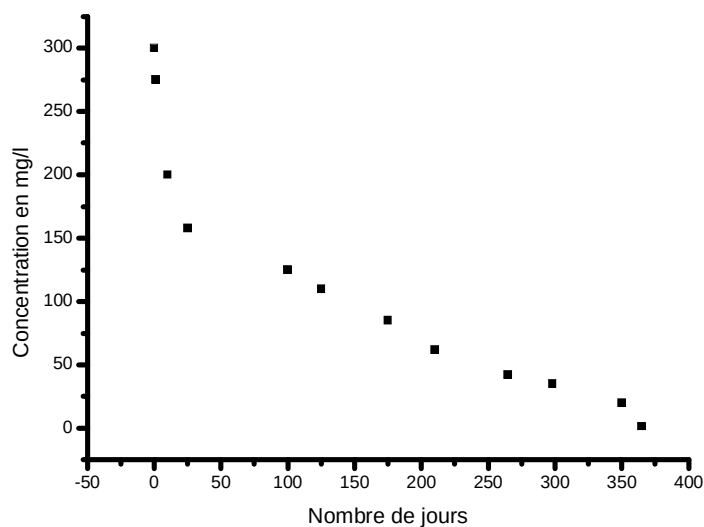


Fig N° 146 Evolution de la concentration en fonction du temps

9 Conclusion.

Cette simulation montre le comportement des pollutions dans le milieu géologique afin de préserver la ressource en eau souterraine et superficielle. Ce travail permet de proposer des stations de contrôle de l'évolution de la pollution et de trouver une solution durable de la ressource en eau dans la région d'El Eulma.

4^{ème} Partie

Stratégie d'aménagement et gestion de la ressource en eau

1 Introduction.

L'aménagement des ressources en eaux dans le bassin d'El Eulma consiste à développer un programme d'action afin d'optimiser la ressource en eau pour une gestion durable et continue. Le développement durable est définie comme étant un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures.

Les systèmes géologiques, pédologique, faunistique, faunistique, population et air sont en interaction avec la ressource en eau. Ce qui nous amène à proposer une stratégie d'aménagement et de gestion de la ressource en eau dans la région d'El Eulma.

Les différentes étapes d'aménagement des ressources en eau.

2-1 Réseau de suivi et d'observation des ressources en eau

Afin de proposer des schémas d'aménagement des ressources en eau dans la région on doit réaliser un réseau d'observation et de mesures des ressources en eaux de surface et souterraines qui doit comporter les réseaux suivants. Fig 147

2-1-1 Le réseau pluviométrique.

Les trois stations pluviométriques installées dans la région doivent être équipées afin d'exploiter le maximum d'informations pluviométriques avec un suivi régulier durant les 365 jours de l'année.

2-1-2 Le réseau hydrométrique.

Aucun réseau de jaugeage n'est installé dans les oueds de Djermane, Djehadi, Medjaz et Guitoune. Or pour contrôler et quantifier les crues il est nécessaire d'installer des limnigraphes pour la quantification des ressources en eau de surface.

2-1-3 Le réseau piézométrique.

La région n'a aucune conception de réseau observation piézométrique des eaux souterraines. Les études hydrogéologiques menées depuis 1974 jusqu'à 2006 ont mis en relief la présence de différentes aquifères souterraines. La nappe superficielle des sables argileux et la nappe des calcaires lacustre dans le Mio-Plio-Quaternaire. La nappe des calcaires Cénomanien, la nappe des calcaires à silex de Yprésien et la nappe des marno-calcaire du maestrichtien dans les formations géologiques de la nappe de Djemila au Nord de la région. La nappe de formations carbonatées de l'ensemble allochtone sud Sétifien au Sud. Donc il est intéressant de réaliser un réseau d'observation piézométrique dans les différentes nappes pour le contrôle de l'évolution de la piézométrie en basses et hautes eaux.

2-1-4 Le réseau de suivi hydrochimie des eaux

Hydrochimie des eaux de surface et souterraines est indispensable pour l'étude d'aménagement de la ressource en eau.

2-1-5 Le réseau de suivi de qualité des eaux et les sources de pollution

La qualité des eaux destinée à la consommation et l'irrigation, nous amène à penser de faire un réseau de suivi de l'évolution de la qualité des eaux par des analyses afin de déterminer les éléments chimiques et bactériologique et l'identification des sources de pollution industrielle, agricole et urbaine.

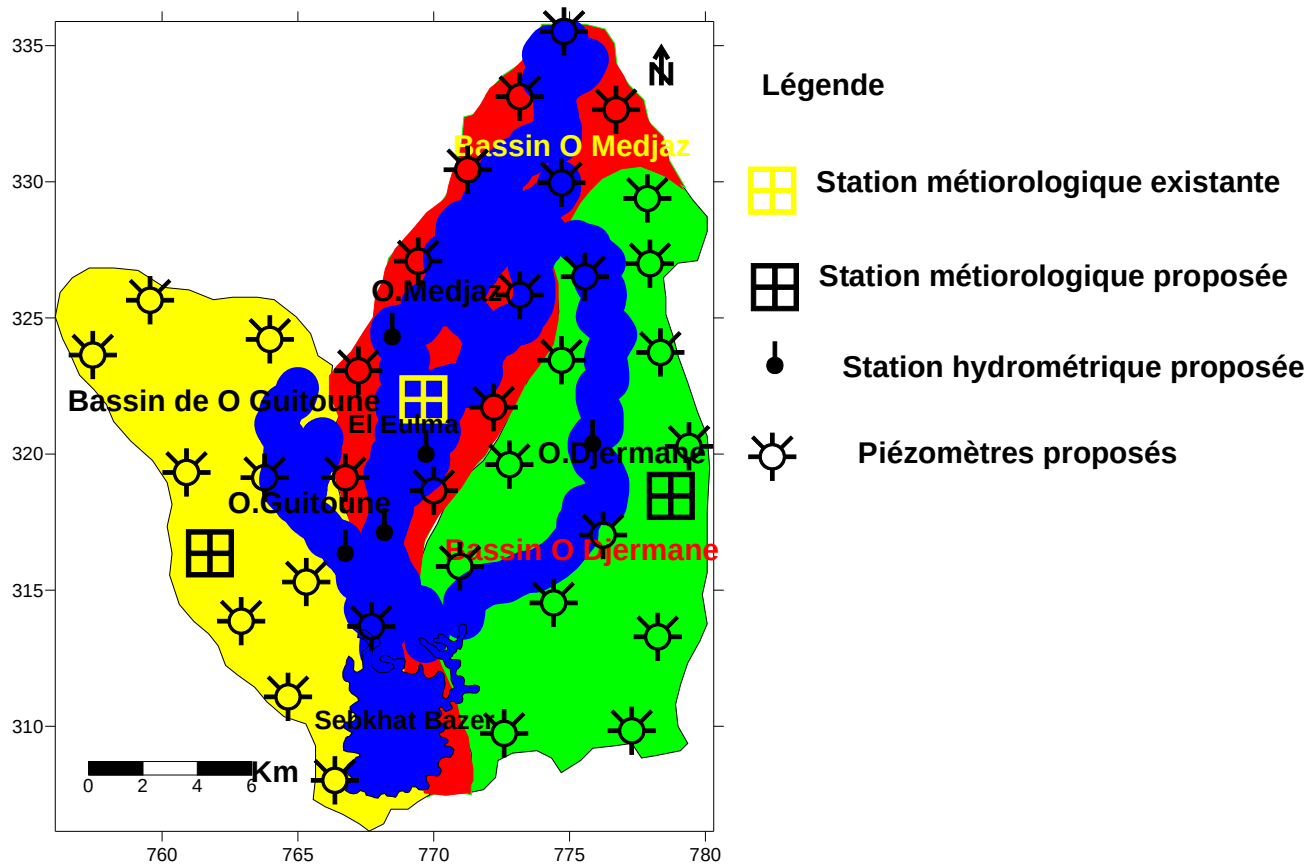


Fig N° 147 Carte du réseau d'observation des ressources en eau

3 Réalisation d'une banque de données des ressources en eau.

Après l'installation des réseaux d'observation et de suivi pour la quantification des ressources en eau en quantité et qualité. La collecte des informations des données des paramètres doivent être traitée et saisies sous forme de banque de données.

3-1 Inventaire des points d'eau.

Les sources.

Les puits.

Les forages.

Présentation des points d'eau sous forme de fiche signalétique de banque du sous sol.

Tableau 79

Tableau 79 fiche signalétique

Nom prénom	Lieu	Coordonnées			Types de nappe	Log géologique			Nature des points d'eau	débit
		x	y	z		Code	Stra	Litho		
									a	
									b	
									c	

4 Investigation à l'échelle du bassin et collection des données.

L'étude de l'aménagement de ressource en eau dans la région est basée sur les informations de banque de données dont les étapes de l'étude sont :

- Examination préliminaire
- Etude de reconnaissance.
- Etude de faisabilité.
- Définition du projet.

Les quatre étapes sont développées dans la fig. 148

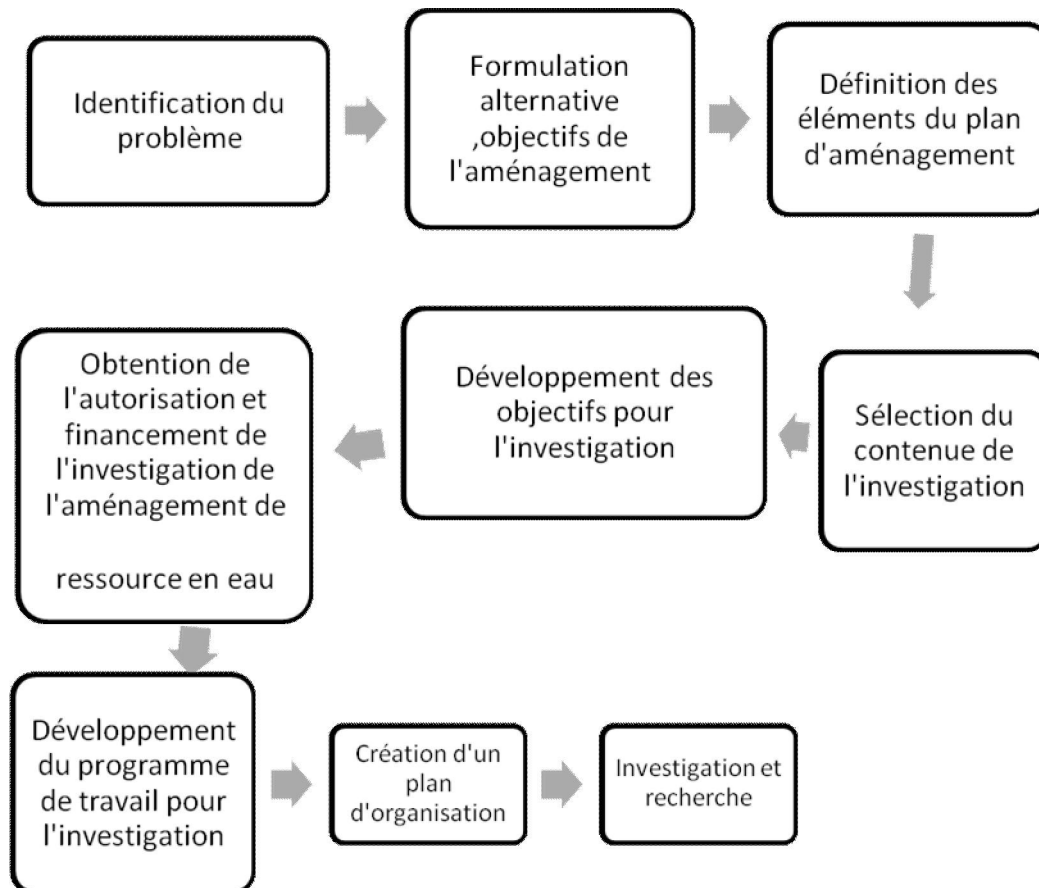


Fig. N° 148 Étapes d'aménagement

5 Développement du code de police de l'eau.

L'aménagement de ressource en eau doit être basé sur des lois qui protègent les ressources en eau du gaspillage , la surconsommation par les entreprise étatiques ,privé et le citoyen avec la création de la police de l'eau dont le rôle sera une institution de contrôle d'orientation et de sensibilisation pour l'application des lois développées.

6 Application et développement des modèles d'aménagement de la ressource en eau dans la région.

Afin d'étudier l'état de ressource en eau dans le future et il est nécessaire de faire des techniques de simulation par des modèles de gestion et d'aménagement et des modèles de méthodes d'optimisation.

6-1 Les méthodes d'optimisations

Les problèmes d'optimisation sont formulés par l'expression suivante .

On optimise la fonction : $F(x)$

Avec des contraintes : $G(x) = 0$

Les contraintes des variables $x_l \leq x \leq x_u$

La forme générale du modèle a pour expression

$$\text{Max(ou Min)} X_0 = \sum c_j X_j$$

La fonction objectif linéaire des contraintes est donnée par

$$\sum a_{ij} X_j \leq b_i$$

$$X_j \geq 0$$

6-2 Les modèles d'aménagement des eaux souterraines.

Les modèles d'aménagements des eaux souterraines sont basées sur l'aménagement hydraulique et les évaluations économiques des ressources en eau Fig 149

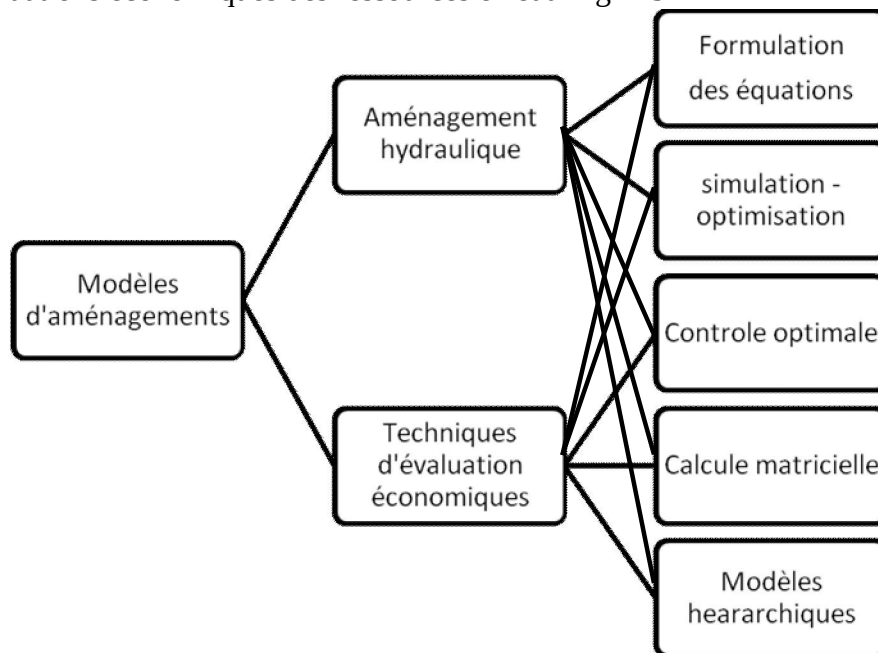


Fig N°149 Modèle d'aménagement

7 Mobilisation des eaux de surface.

La région d'El Eulma est caractérisée par son climat semi aride ,les précipitations moyenne ne dépasse pas les 400 mm .La réalisation du barrage Djebel Diss contrubiera a la mobilisation de 185 millions de mètres cube d' eau transféré de la région de Tabbalout wilaya de Jijel par adduction vers la région d'El Eulma .Ce projet rentre dans les grandes aménagements que l'état algérien réalisera afin de résoudre le problème de l'eau dans la wilaya de Sétif .Fig 120



7-1 Impact du barrage de Djebel Diss sur la région .

7-1-1 Impact direct

Le barrage de Djebel Diss sera réalisé sur une assiette de 700 hectares avec un volume d'eau de 185 millions de m³.la structure géologique de la région qui est formée par des calcaires du Cénomanien, les marno –calcaire du maestrichtien et les calcaires à silex de Yprésien favorisera l'alimentation de ses nappes par l'eau de la retenue .Donne un impact direct sur les eaux souterraines la région.

7-1-2 Impact indirect.

Trois problèmes qui vont se poser dans le future après la réalisation du barrage de Djebel Diss .

- Le problème de contamination des eaux de la retenue par les métaux lourds existant dans le milieu naturel confirmé par nos analyses géochimiques.
- Le second est celui des inondations qui va s'accroître due à l'effet de la recharge de la nappe superficielle.
- L'impact des fosses septiques existant dans le milieu rural.

7 Les techniques d'aménagements des eaux souterraines dans la région d'El Eulma .

8

Les techniques d'aménagement des eaux souterraines, consiste à réaliser des concepts de recharge artificielle afin d'établir un équilibre entre les eaux souterraines et les eaux de surface .Pour la mise en œuvre d'une alimentation artificielle de la nappe souterraines on distingue, principalement, les dispositifs d'infiltration par les lits de rivière aménagés et les dispositifs d'injection par puits.

8-1 Aménagement des oueds

La construction de diguettes a travers les oueds de Djermane ,Djehadi ,Medjaz et Goutali .Les diguettes permettent l'augmentation de la charge hydraulique à l'amont des oueds .La hauteur est de l'ordre de 1.50 m et construite par des matériaux locaux.Fig 155

Deux zones de réalimentation naturelle a protéger, la plaine de Kaouane ,et la plaine de Goutali.

8-2 Problèmes de colmatage dans les diguettes de réalimentation et les types de remèdes.

Le colmatage des dispositifs de réalimentation se traduit par la destruction des agrégats par un excès d'ions dispersant les argiles ou solubilisation du ciment liant suivit du gonflement des argiles et le colmatage des pores du sol par des phénomènes physique ,chimique et biologique

Tableau 80

Tableau N°80 Types de colmatages et remèdes

Types de colmatage	Remèdes
Colmatage physique : Fonction de la concentration en matière en suspension des effluents	Décantation de l'effluent a travers un massif de graviers. Création d'une couverture végétale dans le fond du bassin Addition de matière organique ou de produits chimiques dans la couche supérieure du sol
Colmatage chimique : Due à la précipitation des sels contenus dans l'effluent au contact de certains constituants	Contrôle de la minéralisation des eaux
Colmatage biologique : Le développent des bactéries et la production de produits résultant de leur métabolisme	Utilisation de la javellisation de l'effluent
Colmatage par les algues : La présence des éléments nutritifs, telle que le phosphore avec la lumière et la température élevée permet le développement des algues dans le bassin qui conduit au colmatage de la plage infiltration.	Contrôle du développent des algues par l'emploi d'algicides.

8-3 Réalimentation par puits :

La technique de réalimentation par puits se fait en fonction de la nature de la nappe à réalimenter, captive ou libre.

des puits d'injection sont des forages plongeant dans la nappe, la circulation de l'eau dans les puits doit être étudié pour ne produire ni érosion ni effondrement des terrains qui pourrait se traduire par un colmatage du puits par les matériaux fins. L'introduction de l'eau de recharge dans l'aquifère peut se faire sous la pression atmosphérique ou sous pression plus élevée. Fig. 151 et 152

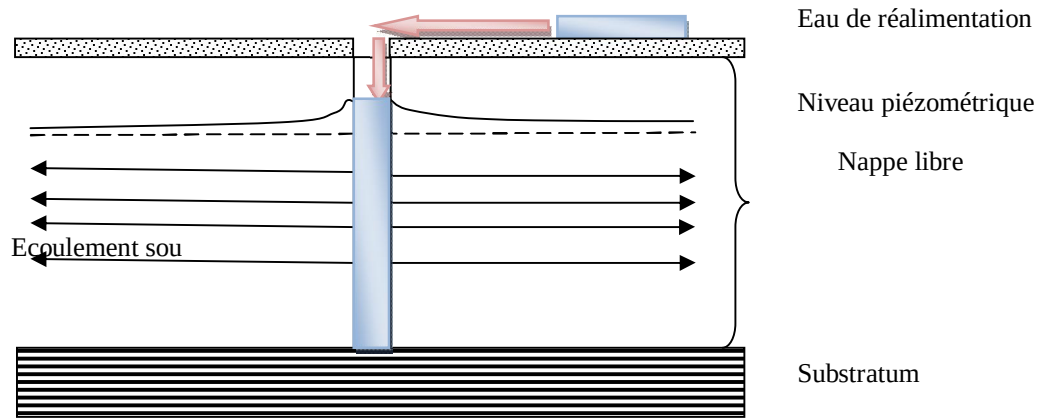


Fig 151 Réalimentation par puits dans une nappe libre

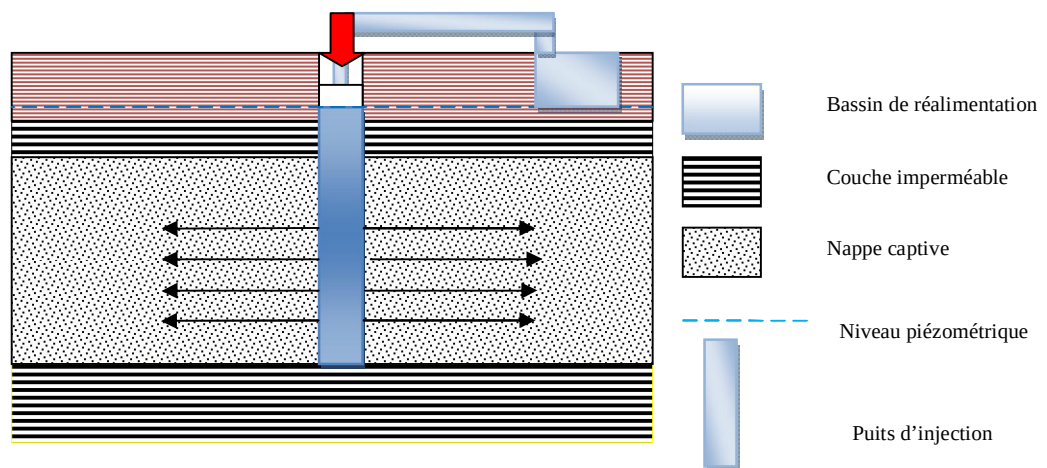


Fig N° 152 Réalimentation par puits en nappe captive

8-4 Les problèmes de colmatages dans le dispositif d'injection par puits et les types de remèdes.

Le colmatage des dispositifs d'injection par puits sont d'ordre physique, chimique et biologiques .Tableau 81.

Tableau N° 81 de colmatages dans les puits d'injection et les remèdes

Types de colmatage	Remèdes
Colmatage physique : Fonction de la concentration en matière en suspension des effluents	• Décantation de l'effluent a travers un massif de graviers. • Création d'une couverture végétale dans le fond du bassin • Addition de matière organique ou de produits chimiques dans la couche supérieure du sol
Colmatage chimique : Due à la précipitation des sels contenus dans l'effluent au contact de certains constituants	Contrôle de la minéralisation des eaux
Colmatage biologique : Le développent des bactéries et la production de produits résultant de leur métabolisme	Utilisation de la javellisation de l'effluent
Colmatage par les algues : La présence des éléments nutritifs, telle que le phosphore avec la lumière et la température élevée permet le développement des algues dans le bassin qui conduit au colmatage de la plage infiltration.	Contrôle du développent des algues par l'emploi d'algicides.

9 Réalimentation par irrigation.

Le retour par infiltration des eaux d'irrigation est estimé à (10%), un contrôle est recommandé pour suivre l'évolution du niveau piézométrique.

10 Réalimentation par S.A.T System.

Les eaux issues de la station de prétraitement sont récupérées dans les bassins de percolation est injectées directement dans la nappe .Puis elles sont pompées pour une utilisation comme eau d'irrigation ou eau potable .Fig. N ° 153

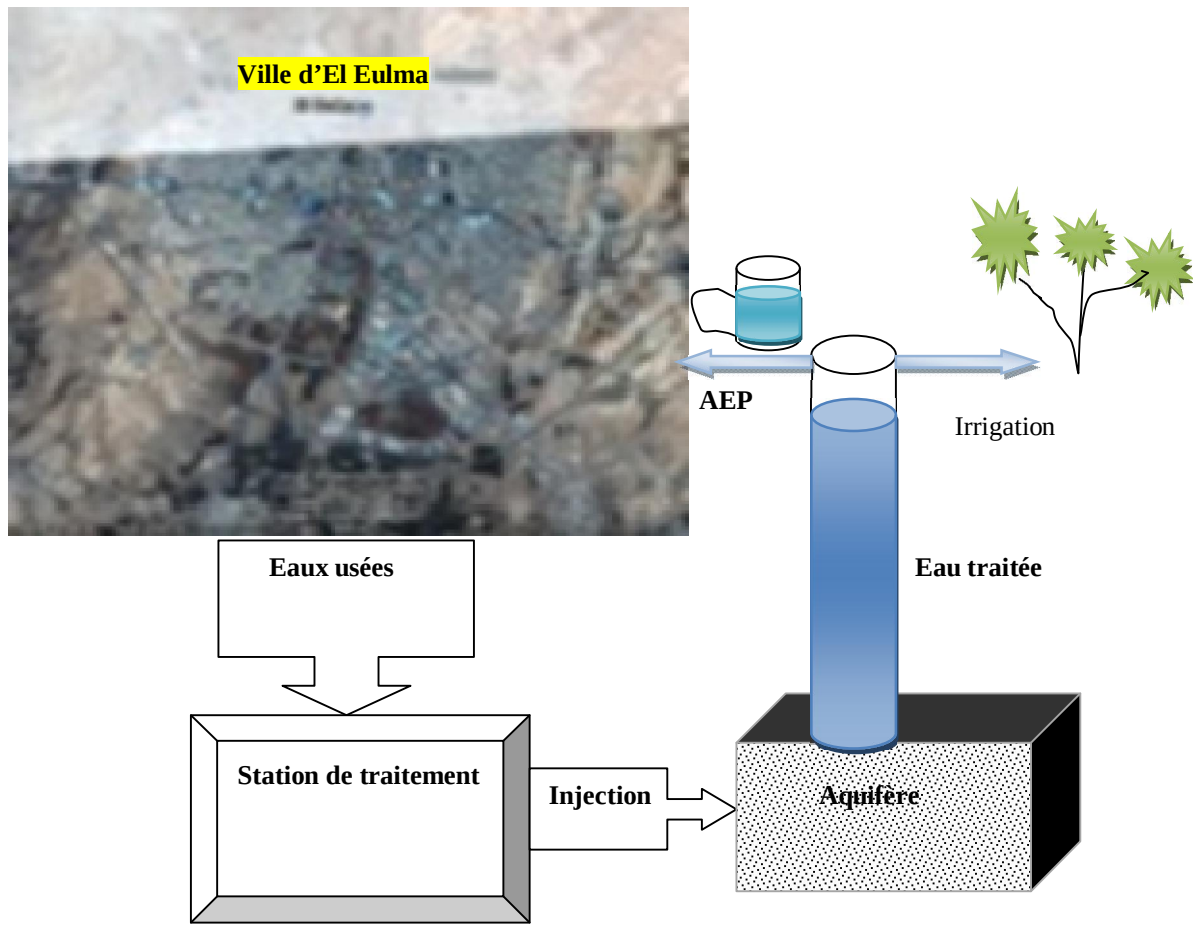


Fig N°153 Les étapes du système aquifère traitement

10-1 Dynamique du S.A.T.

La dynamique du S.A.T est subdivisée en trois phases :

- La première phase consiste l'entrée du système : qui comprend les propriétés physiques du sol , la quantité et la qualité de l'eau injecté et les conditions de température et l'évaporation .
- La deuxième phase consiste l'état du système : comprend le temps de résidence, développement des microorganismes et leur développement et la formation d'une couche étanche qui diminue la perméabilité.
- La troisième phase consiste sortie du système : Infiltration totale des eaux avec l'élimination du Carbone organique, de l'azote et l'ensemble des maladies qui se développent dans le bassin.
- Fig 154

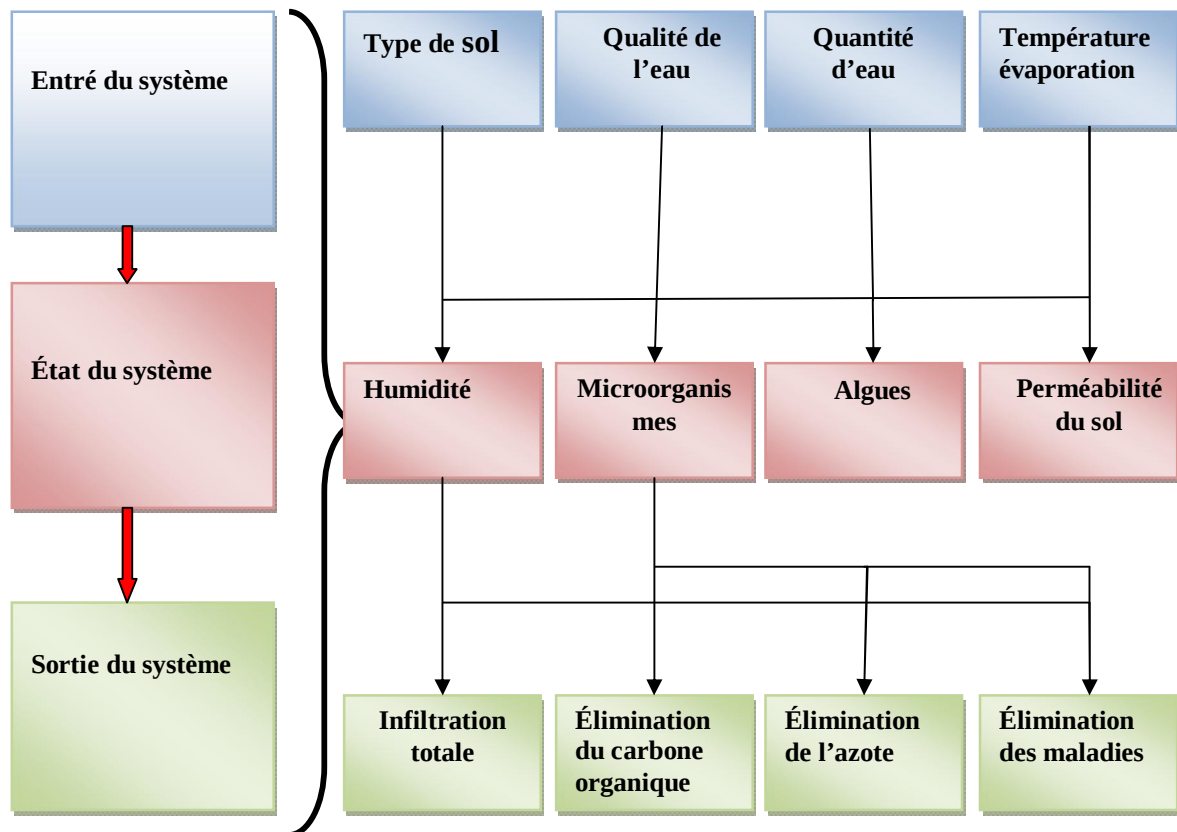


Fig N°154 Dynamique du S.A.T

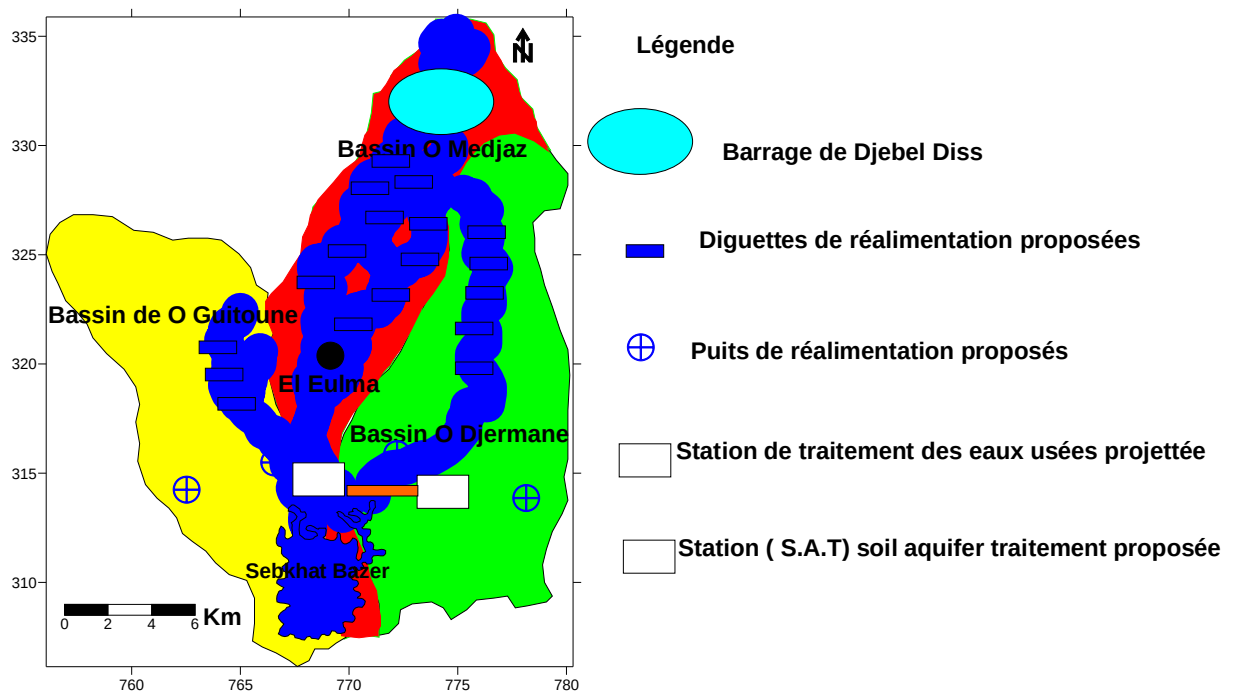


Fig N° 155 Carte d'aménagements des eaux dans la région d'El Eulma.

12 Contrôle de la réalimentation naturel dans le bassin urbain de la ville d'El Eulma

La population de la ville d'el Eulma est estimée au environ de 160 000 habitants. Caractérisées par la réalisation de nouvelles Zun (Zone urbaines nouvelles) aménagées autours du périmètre urbain qui est le noyau de la ville .Lors de l'implantation de la ville de ex St Arnaud par les français ,le niveau piézométrique de la nappe est peut profond .Donc les architectes et les aménagistes ont réalisé un drainage autours du tissus urbain pour protéger les constructions par des galeries souterraines .

Après l'indépendance les archives ont été détériorées, extension de la ville a été réalisée sans tenir compte de ses galeries qui sont devenues des foyers de propagation des eaux usées vers la nappe en période des hautes eaux. Les eaux usées sont une composante essentielle de la recharge de l'aquifère superficiels provoquant le développement des maladies hydriquement transmissible telle que la typhoïde, la méningite et le choléra.

Un contrôle de cette recharge est recommandé afin de limiter l'évolution de cette pollution.

12 Gestion des eaux souterraines de la région d'El Eulma.

Pour gérer la ressource en eau et plus particulièrement les eaux souterraines, on peut diviser la responsabilité entre du rôle de l'état et le citoyen avec la création du conseil local de l'eau. La sensibilisation du citoyen par l'éducation, l'intervention des collectivités locale basée sur les études techniques des experts et les scientifiques suivit des orientations et le contrôle de l'état nous donnera des résultats satisfaisants de la gestion des ressources en eau .Fig 156

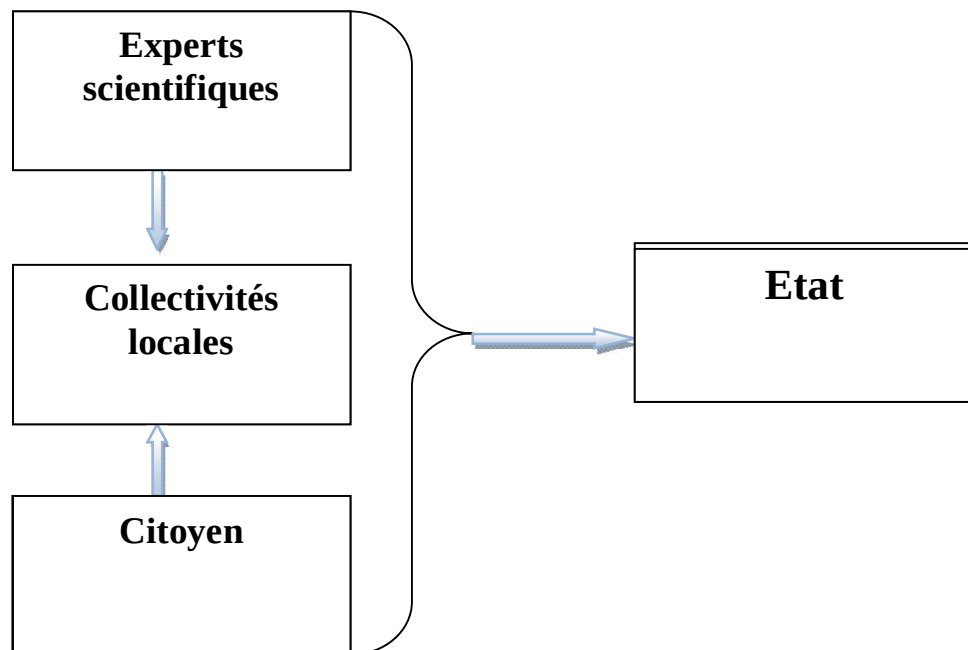


Fig. N°156 Conseil locale de l'eau

13 Gestion des forages et des puits :

Les ouvrages hydrauliques de captage de l'eau sont sujettes à divers pathologies et vieillissement ce qui nécessite un contrôle de l'ouvrage afin d'optimiser sa production

13-1 Alimentation en eau potable (AEP) : Nécessite la modernisation et la rénovation du réseau de distribution et limitation des pertes en eau potable.

13-2 Secteur industrielle : Il faut organiser le processus de traitement de l'eau afin de récupérer le volume consommé pour une utilisation ultérieure selon les normes de potabilité (OMS, Algérienne).

13-3 Secteur agricole :

Développent des techniques d'irrigation

- Irrigation par aspersion.
- Irrigation goutte à goutte.
- Irrigation souterraine.
- Réalisation des canaux d'alimentation et de distribution de l'eau pompé pour limiter les pertes

14 Conclusion.

Les étapes de la stratégie d'aménagement de la ressource en eau dans la région d'El Eulma sont caractérisées par la proposition de la réalisations du réseaux de station pluviométriques , stations hydrométéorologique , station piézométriques et le réseau de contrôle de la qualité des cette ressources en appliquons des modèles de gestion et d'optimisation .Deux techniques de réalimentation ont été proposée , la réalimentation artificiel et les techniques de réalimentation par S.A.T. La gestion de la ressource en eau est caractérisée par la proposition du conseil locale de l'eau et la gestion des puits et forages. La stratégie d'aménagements et de gestion proposée sont des solutions qui nécessite un suivi de terrain afin d'aboutir a une gestion durable de la ressource en eau dans la région.

CONCLUSION GENERALE.

Le système est une portion de l'univers, il est ouvert , semi ouvert ou fermé . Plusieurs systèmes ont été définies dans la région d'El Eulma :le système géologique, pédologique, la faune ,la flore , la population et l'air ainsi que leur interactions avec les ressources en eau.

Pour le système géologique, la région est caractérisée par une structure très complexe .Au Nord on a les formations carbonatées du Cénomanién ,les marno calcaires du Maestrichtien et les calcaires à silex de l'Yprésien .L'ensemble constituent la nappe de Djemila. Au centre on a les alluvions et les argiles sableuses, les argiles et les calcaires lacustres du Mio – Plio –Quaternaire .Au Sud ,on a les formations carbonatées de l'ensemble allochtone Sud Sétifien . La structure géologique selon Kazitani est caractérisée par la présence du bassin El Eulma limité par deux grands accidents sécants .Les analyses géochimiques ont montré.une minéralisation polymétallique hydrothermale tel que le zinc ,le cuivre et le fer .

Le système pédologique est caractérisé par la présence de sols sans différenciation pédologique particulière .Ainsi on a des sols à caractère vertique dominant ,des sols à profil marqué par la matière organique ,des sols riches en matière organique , des sols marqués par la présence de sels solubles ,des sols à caractère hydromorphe dominants et par les sols rubéfiés .Les analyses pédogéochimiques montrent la présence des sols riches en silicium et en calcium.

La flore de la région est diversifiée, elle est caractérisée par la présence des céréales, de la culture maraichère, par des plantes endémiques et par la végétation halophile .

La faune est très diversifiée également avec la présence d' animaux domestiques et sauvages fort important. Dans la région ,en pratique l'élevage des bovins ,ovins ,caprins ,de la volaille et de la dinde. Il est localisé dans les zones de Bazer Sakra et de Guelte Zerga .Les oiseaux migrateurs de la zone humide de Sebkhate Bazer constitue un maillon très important d'un écosystème très riche qu'il faut préserver.

La population est concentrée dans le tissu urbain de la ville d'El Eulma et les petites agglomérations de Guelte Zerga et Bazer Sakra et dans la zone rural . Le nombre total de la population est de 250 000 habitants .

L'ensemble de ses systèmes sont en interaction entre eux et avec la ressource en eau

Le bassin versant a une superficie de 402 Km².drainé par Oued Medjaz ,Guitoune ,Djehadi et Djermane ayant une longueur totale est de 614 km . Les eaux de surface se déversent dans Sebkhate Bazer pour constituer un système endoréique .

Le climat de la région est semi aride avec une température moyenne de 15°C
Les précipitations jouent un rôle déterminant dans le climat et elles varient entre 219 mm et 588 mm. L'ETP représente pratiquement le double des précipitations(800 mm) ,alors que l'ETR reprend 94% de la lame d'eau tombée sur le bassin versant .L'infiltration et le ruissèlement représentent 6% de la lame d'eau précipitée.

L'examen des différentes études géophysiques ont permis de montrer que l'aquifère superficiel a une extension latérale relativement homogène surtout pour les argiles sableuses alors que les calcaires lacustres sont beaucoup plus limités .Les formations carbonatés ont une structure plissée en forme de synclinale.

L'étude hydrogéologique a permis de voir que :

La nappe superficielle des argiles sableuses est exploitée par de nombreux puits. La nappe des calcaires lacustres est localisée au Sud de la région mais de faible extension. Les aquifères de la nappe de Djemila et de l'ensemble allochtone Sud Sétifien dans les formations carbonates sont exploités surtout par les services de la DHW dont les eaux sont destinées à l'A.E.P. Le sens d'écoulement de la nappe superficielle des argiles sableuses est Nord -Sud. Le gradient hydraulique au nord varie entre 0.025 et 0.018, et au sud il varie entre 0.0009 et 0.003. La perméabilité et la transmissivité sont importantes au Nord qu'au Sud. L'alimentation de la nappe superficielle se fait par les formations carbonatées de la nappe de Djemila et les eaux du jurassique de l'ensemble allochtone Sud Sétifien.

Les paramètres physiques, la température, la conductivité, le pH, le Eh, et l'oxygène dissout ont été déterminés pour l'ensemble des échantillons des eaux de surface et souterraines. Le dosage des éléments majeurs a montré la présence de faciès bicarbonaté calcique, chloruré sodique et sulfaté calcique.

Le dosage des éléments mineurs a montré la présence d'une pollution industrielle, agricole et urbaine dans la région.

La pollution industrielle est caractérisée par la présence de métaux lourds dont les plus importants sont le plomb, le zinc, le cuivre, le chrome, le nickel, le cadmium, le fer et le manganèse. La concentration varie d'un élément à un autre, la présence des métaux lourds est surtout liée à la zone industrielle, à la décharge publique et au trafic routier.

La pollution agricole est caractérisée par la présence des nitrates dont la concentration a évolué entre 1999 et 2006 de 56 mg/l à 186 mg/l dans les zones de forte activité agricole. Les orthophosphates (PO_4) ont une concentration qui varie de 0.895mg/l à 5mg/l liée à l'utilisation excessive des engrais.

La pollution urbaine est liée au trafic routier, aux fosses septiques dans les agglomérations limitrophes, à la détérioration du réseau d'assainissement au centre ville, au développement du smog dans la ville d'El Eulma et aux déchets de la décharge publique.

L'étude de la vulnérabilité de la nappe à l'aide de la méthode DRASTIC nous a abouti à la caractérisation de trois zones. La première de faible vulnérabilité localisée dans les zones externes de la plaine, la deuxième de vulnérabilité moyenne au centre de la plaine et la troisième de forte vulnérabilité localisée tout au long des oueds Medjaz, Djehadi, Djermane et Guitoune qui drainent les eaux usées et industriels.

La stratégie d'aménagement de la région se base sur la réalisation d'une station météorologique, de quelques stations limnigraphiques et des piézomètres pour la quantification des ressources en eau de surface et souterraine. Les techniques de réalimentation de la nappe des argiles sableuses par diguettes dans le Nord de la région et la recharge par puits d'injection au Sud ont été projetées ainsi qu'une station de réalimentation par les eaux usées traitées.

Les perspectives de recherche peuvent se résumer de la manière suivante :

1. Pour la gestion de la ressource en eau , il serait souhaitable de réaliser une banque de donnée par télé observation afin de contrôler l'évolution du nombre des points d'eau (puits, forages)
2. Actualiser les modèles existants afin de simuler la réalimentation.
3. Contrôler les apports des fertilisants.
4. Contrôler l'évolution de la pollution.
5. Rendre opérationnelle l'idée du conseil local de l'eau.
6. Développement et application des théories mathématiques pour la stabilisation de la dynamique des systèmes et leur frontière.
7. Cerner le processus hydrogéochimique de la zone hypothétique qui a un effet sur le chimisme de l'eau et le peuplement de surface.
8. Suivre l'évolution spatiale de l'humidité du sol en surface afin de contrôler la recharge.
9. Le contrôle de la recharge peut se faire à l'aide des isotopes (Cl , ^3H .)

Références bibliographiques

- ABDESSLAM.M (1995)** : Structure et fonctionnement d'un Karst de montagne sous climat méditerranéen :Exemple du Djurdjura occidental (Grande Kabylie Algérie) Thèse de Docteur , Université de Franche –Comté France 234 p.
- AHMED.S and MARSILY.DE .G (1987)**:Comparison of geostatistical method for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity, water resource research,vol 23 n°5 pp 78-86.
- ALBINET.M , MARGAT.J (1970)** :Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines .Bulletin BRGM 2^{ème} série ,section 3 N° 4
- BAISE.D ,TIERCE.C.M (2002)** :Les éléments traces métalliques dans les sols ,approche fonctionnelles et spatiales I NRA Paris cedex 564p
- BAIZE.D (2000)** : Guide des analyses en pédologie, INRA Paris 257p.
- BATUT.V (1998)** : Aquifèr hydraulic ,a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis ,Jonh Wilay &Sons,Inc USA 726p.
- BEAR.J (1972)**:Dynamics of fluids in porous media .Am .Elsevier Publishing Co ,New York 764pp.
- BEAR.J (1979)** :Hydraulics of groundwater .McGraw-Hill , New York 569pp.
- BEAR.J (2008)**: Modeling groundwater flow and pollution, University Haifa Palestine 20p.
- BEAR.J ,VERRUIJT.A (1987)** Modeling groundwater flow and pollution D.Reidel Publisching,Dordrecht, Holland ,414p.
- BEHRA .Ph,SIGG.L ,STUMM.W(2000)**:Chimie des milieu aquatiques DUNOD 3^{em} Edition 566p.
- BENABDESSLAM.T (2005)** : Gestion des ressources en eau en Algerie ,Proceding la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau ,Université de Batna p299-304.
- BEZELGUES.S et al (2002)** :Cartographie de la vulnérabilité des nappes de grande –terre et de Marie -Galante (Guadeloupe), BRGM/RP-51783-FR 42p.
- BIEFERT.C,PERRAUD.R(2003)** : Chimie de L'environnement, De boeck 477p.
- BOGARDI.J.J, NACHTNEBEL.H.P (1994)**:Multicriteria Decision Analysis in Water Resource Management ,IHP UNESCO 469p.
- BONNET.M (1988)**:Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie ,Thèse Doctorat es sciences .Institut Polytechnique de Lorraine 438p.
- BOUDOUKHA . A ,KHEMMOUDJ. K , DJABRI. L (2006)**:Conséquence d'une surexploitation d'un aquifère en pays semi aride Cas de la nappe superficiel d'El Eulma (Est Algériens) .Las aguas subterraneas en los paises mediterraneos.Publication del instito Geologico y minero de Espana. Série hydrogeologia y aguas subterraneas N°17 :459-465.Madrid
- BOUDOUKHA .A (1988)** : Hydrogéologie et modélisation du système aquifère des dépressions fermées d'El Eulma N.E Algérien . Université Franche Comté Besançon France 218p.
- BOUDOUKHA .A (1998)**: hydrogéologie des hautes plaines Sétifiennes &Qualité chimique des eaux souterraines, Thèse de doctorat d'état, Université Badji Mokhtar Annaba 230p.
- BOUDOUKHA .A et al (1993)** :Proposition de normes de potabilité des eaux domestiques pour l'Algérie du Nord

Edil inf –eau 4p

BOUDOUKHA.A (1984) : Contribution à l'étude hydrogéologique de la région d'El Eulma, DEA Université de Franche Compté .64P

BOUKARKAR.H (2007):L'influence des substrats de culture sur l'enracinement de plantes sous abri, mémoire de magister, Université Hadj Lakhdar Batna160p.

BOULAREK.M (2003) : Contribution a l'étude hydrogéologique du bassin de Boumerzoug ,vulnérabilité des eaux souterraines et impact de la pollution sur la région d'El Khroub, Thèse de Magister hydrogéologie , Université Mentouri Constantine 175p.

CAMPANA.M.E & Al (1982) : artificial recharge of surface runoff in cold spring valley , Nevada , Water resource center ,Desert research Institute University of Nevada System.50p.

CAMPANA.M.E ,KIRK.S.T (1988):Simulation of groundwater flow in a regional carbonat-alluvial system with sparse data :the white river flow system ,southeastern NevadaWater resources Center .Desert research Institute university of Nevada System.76p.

CASTANY.G (1982) : Principe et méthodes de l'hydrogéologie Dunod Université 238 p.

CASTANY.G(1968) : Prospection et exploitation des eaux souterraines .Ed.Dunod Paris France 683.

CHACHIA (1982) :Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie .Le bassin de la Seybouse Office des publications universitaires 505p.

CHERRY.J.A(1984).Contamination migration in groundwater /Processes and problems Proceeding of the second national water conference the fate of toxics in surface and groundwater pp 65-93.

CHERRY.J.A(1985) Contaminant hydrogéology physical processes géosciences Canada Volume 2 N°2 9p.

CHERRY.J.A(1989).Groundwater protection hazardous materials management magazine 5p.

COLLIN J.J(2004) : les eaux souterraines, connaissance et gestion, éditions BRGM 165p.

COOLEY .R.L (1974): Finite element solutions for the equation of groundwater flow Nevada , Water resource center ,Desert research Institute University of Nevada System.134p.

COOLEY .R.L ,SINCLAIR.P.J (1975):Uniqueness of a model of steady –state groundwater flow Water resource center ,Desert research Institute University of Nevada System. 39p.

COOLEY.R.L (1992): A modular finite elements model (MODFE)for areal and axisymmetric ground-water flow problems ,US. Geological Survey 108p.

COOLEY.R.L ,WESTRPHAL.J.A(1974) An evaluation of the theory of groundwater and river –water interchange ,Winnemucca Reach of the Hu,boldt river ,Nevada .Water resource center ,Desert research Institute ,University of Nevada System 74p.

DASSARGUES.A (1992):Paramétrisation et simulation des réservoirs souterrains Discrétisation du domaine, préparation statistique des données, couplages et non linéarités des paramètres thèse de doctorat es science appliquées, Université de liège Belgique 313p.

DE MARSILY G.(1981) : hydrogéologie quantitative .École National sup.des mines de Paris Masson Edition ,219p.

DEBIECHE.T.H (2002) : Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle, Thèse Doctorat Université Franche Compté 199p.

- DEMDOUM.A (1996)** : Etude hydrogéologique de la région d'El Eulma et le problème de la qualité des eaux, Thèse de Magister en hydrogéologie, université Mentouri Constantine 205p
- DJABRI .L (1987)** : Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de Tébessa essai de modalisation ,Thèse de Doc ing Université Franché .
- DJABRI.L (1996)** :Mécanisme de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse , origine géologique ,industrielle, agricoles et urbaines .Thèse de Doctorat d'état.Université de Annaba 280p.
- DJEBBAR MOUNIRA (1992)** : Le Karst hydrothermal de la région de Constantine Fonctionnement et modalités d'infiltration ,Thèse de magister en hydrogeologie ,Université Mentouri Constantine 162p..
- DJENBAS , BOUDOUKHA.A ,KHEDIDJA.A (2005)**Fluctuation piézométrique interannuelle de la nappe superficielle de Baida Bordj . Proceeding la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau ,Université de Batna p561-569.
- DJORFIS , HANIA, DJABRI.L (2005)**:Etude détaillée des risques des rejets industriels sur la santé des population de la région de Annaba ,Proceeding la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau ,Université de Batna p467-475.
- DJORFIS , HANIA, DJABRI.L (2005)**:Impact des rejets industriels sur les eaux superficielles et souterraines de la région de Annaba ,Proceeding la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau ,Université de Batna p476-488.
- FETTER.C.W (2001)**: Applied Hydrogeology Printice-Hall,Inc Fourth Edition 598p.
- FEZZANI.CH (1995)**: Water resource in the OSS Countries evaluation, use and management, IHP UNESCO 80p.
- FERREIRA .L (1988)**:Acomparative analysis of mathématiqueal masse transport model tracer experiments for groundwater pollution studies .Laboratorio nacional de engenharia civil Portugal 193 p
- FOSTER (1987)**: Vulnerability of soil and groundwater to pollution .TNO Committeeon hydrological Research, the Hague ,Netherland .Proceedings and information N° .38 ,pp69-86
- FRANKLIN W.SCHWARTZ, HUBAO ZHANG (2003)**: Fundamental of Groundwater Jonh Wiley &Sons, Inc USA 582p.
- FRIND E.O (1987)**:Modelling of contaminant transport in groundwater –An overview –The canadien society for civil engineering 29p
- GARDER.A.O ,PEACEMAN.D.W ,et POZZI.A (1969)**:Numerical calculation of multidimensional miscible displacement by method of characteristics .Soc .pet .eng J4 (1) ,26-29pp
- GHEBOULI.S(2005)** : Salinité des eaux souterraines des hautes plaines sétifiennes Proceeding la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau, Université de Batna p332-392.
- HADDOUCHI .B (1987)** :Etude géologique et hydrogeologique de la plaine alluvial de la Meuse en Belgique thèse de doctorat ,faculté des sciences appliquées ,université de Liège 320p.
- HANIA (2003)**:Analyse Méthodologique de la structure et des processus anthropiques : Application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de doctorat d'état Université Badji Mokhtar Annaba 214p.
- HUYAKORN.P.S ,PINDER.G.F (1983)**:Computational Methods in subsurface flow .Academic Press ,New York :473p
- HVILSOJ.S (1998)**: Estimation of groundwater hydraulic parameters .Internal Bulletin ,Département of hydrodynamique and water resource ,Technical University of Denmark 180p.
- KADRI.M & HAMIDOU.M (2005)** :Modélisation numérique en éléments finis de la recharge artificielle d'une nappe souterraines Proceeding la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau ,Université de Batna p136-142.

- KHEMMOUDJ. A (2007)** : Stabilisation de quelques problèmes aux limites non linéaires, thèse de doctorat d'état en mathématiques USTHB 166p.
- KHEMMOUDJ. A (1987)** : Résolution des équations de Navier Stokes par différences finies en Axisymétrie Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle Université de Paris XII 170p.
- KHEMMOUDJ.K (1988)** : La méthode des éléments finies, théorie et application en hydrogéologie, cas d'étude, la plaine de Taya wilaya de Sétif 8^{ème} Séminaire des sciences de la terre, Université de Constantine 12p
- KHEMMOUDJ.K (1992)** : Simulation de la propagation d'un contaminant dans les eaux souterraines .Cas d'étude région d'El Eulma .9^{ème} séminaire des sciences de la terre université de Tlemcen 6p
- KHEMMOUDJ.K (1995)** : Sur la décontamination des eaux souterraines .Cas d'étude région d'El Eulma 10^{ème} séminaire des sciences de la terre Alger 4p
- KHEMMOUDJ.K (1996)** : Optimisation de la production des puits en période de sécheresse dans la région d'El Eulma , Séminaire national des sciences de la terre 4p .INH Boumerdes
- KHEMMOUDJ.K (1998)** : La réalimentation artificielle de la nappe superficielle de la région d'El Eulma 6p Séminaire maghrébin des géosciences ,Université de Annaba .
- KHEMMOUDJ.K (2002)** : Impact de la pollution industriel ,agricole et urbaine sur les eaux de la nappe superficielle de la région d'El Eulma ,mémoire de magister université de Annaba 200p.
- KHEMMOUDJ.K ,BOUDOUKHA .A (2005)** :La mobilisation des ressources en eau dans la région d'El Eulma, Proceeding la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau ,Université de Batna p22-23.
- KHEMMOUDJ.K ,BOUDOUKHA .A(2008)** :Dynamique des systèmes est stratégies d'aménagement et gestion des ressources en eau dans la région D'El Eulma ,Séminaire international sur la vallée de la Soummam , Université de Bejaia 4p.
- KHEMMOUDJ.K ,BOUDOUKHA.A(2005)** :Impacte de la géochimie des formations géologique sur la qualité hydrochimique des eaux souterraines de la région d'El Eulma .Séminaires National des mines Université de Annaba 4p.
- KHERICI .N (1993)** : Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système superposées en milieu industriel et agricole (Annaba –La Mafragh) NE de l'Algérie .Thèse de Doctorat es science Université de Annaba 170p.
- KHERICI.N (1985)** :Aquifère sableux de bords de mer .Hydrodynamique et hydrochimie exp .de la nappe de Boutheldja .NE Algérien .Thèse de doctorat 3^{ème} cycle USTL Montpellier France 202p.
- KONIKOV.L.F (1996)**: Utilisation de modèles mathématiques pour simuler les processus d'écoulement et de transport dans les eaux souterraines US Geological survey ,Reston USA 45p
- KONIKOW.L.F , GOOD.D.J (1989)**:Modification of the method of characteristics solute transport model to incorporate decay and equilibrium-controlled sorption or ion exchange: Reston Virginia , U.S Geological Survey water –Resources Investigation Report 89-4030 65p.
- KONIKOW.L.F and BREDEHOEFT .J.D (1984)**: Computer Model of two –dimensional solute transport and dispersion in ground water U.S.Geological survey Book 7 Chapter C2 90p.
- LAHMAR & al (1993)** : Les sols et leurs répartition dans les hautes plaines sétifiennes .Eau et sols d'Algérie p.60-70
- LAMAYRE.J (1975)**: Roches et minéraux, les matériaux, Doin éditeurs 127p.
- LAOUAR.R (2002)** : Petrogenetic and metallogenetic studies of the tertiary igneous complexes of northeast Algeria: A stable isotope study ,These de doctorat d'état Université Badji Mokhtar Annaba 171p.

- LAWRENCE.C.R ,WEAVER.TR (1998):**Proceedings of international groundwater conference , Groundwater sustainable solution ,International association of hydrogeologists,University of Melbourne Australia ,890p.
- LEAHY.P.P, YORK.T.H ,ROSENSHEIN.J.S (1995) :**Proceeding International Workshop Development of water-related information system, IAH ,UNESCO 238 p.
- LEDOUX .E (1980):** Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique , Thèse de Docteur Ingénieur ENSMP 236p.
- LEVEQUE .Ch (2001):**Ecologie ,de l'écosystème à la biosphère DUNOD 502p.
- MARGAT.J (1968) :**Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines à la pollution , base de la cartographie ,rapport 68.SGL.168.HYD. BRGM. Orléons ,France
- McDONALD.M.G, and HARBAUCH.A.W(1988):**A modular tridimensional finite difference groundwater flow model :Denver ,CO, US. Geological Survey Open –File report 89-381 500p
- MEBARKI.A (1984) :**Ressource en eau et aménagement en Algerie ,le bassin du Kebir RHUMEL office des publications universitaires 302p.
- MESSADI.Dj, ALI-MOKHNACHE.S (1995) :** Etude et application de quelques électrodes ioniques spécifiques au contrôle de la pollution des eaux, Collection cours de chimie, office des publications universitaires 174p.
- MONJOIE .A et al (1987) :** Etude hydrogéologique de la nappe alluvial de la Meuse en aval de Liège, 150p.
- NEUMAN .S.P and JACOBSON .E.A (1990)** Analysis of non intrinsic spatial variability by residual Kriging with application to regional groundwater level ,Mathematical geology vol 16 n° 5 pp.499-521
- OTI(Ingeniors consultants)1973:**Projet de la ferme pilote d'El Eulma ,rapport interne DHW de Setif .15p
- POURBAIX .M (1963):** Atlas d'équilibres électrochimiques, Gauthier –Villars &C Editeur Paris 644p.
- PRUDIC .D.E (1989):**Stream-aquifer relation using a modular, finite –difference ,groundwater flow model.U.S Geological Survey open –File report 88-729 113p.
- RICHARD.H.McCUEN (2005) :**Hydrologic Analysis and Design, Prentice Hall 859p.
- RICHTON .K.R (2003):**Groundwater Hydrology Conceptual and Computational Models ,Jonh Wiley &Sons,Inc USA 414p.
- ROCHE .M (1969) :** Hydrologie de surface Ed .Gautier-Villars France 430p
- RODIER .J (1996) :**L'analyse de l'eau ,eaux naturelle ,eaux résiduares ,eaux de mer .8^{eme} edition Dunod ,Paris .
- ROUABHIA.A (2006):**Vulnérabilité et risqué de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables Miocènes de la plaine d'EL ma El Abiod Nord –Est Algérien ,Thèse de doctorat es sciences Université Badji Mokhtar de Annaba 167p.
- SAVORNIN.F (1920) :** Etude géologique de la région du Hodna et du plateau Sétifien .Thèse sciences 1920 ,Publication service .carte géologique Algérie ,2^{eme} série N°7 ,502p .

SCHOLLER.H (1962) :Les eaux souterraines ,hydrologie dynamique et chimique ,recherche ,exploitation et évaluation des ressources Masson &Cie .Editions ,642p.

SERGE .FRONTIER, Pichod-Vial.D (1998): Ecosystèmes structure-Fonctionnement Evolution Dunod 2^{em} edition 447p.

SHUGUANG LI ,KYLE PAULSON (2002):Interactive groundwater modelling (IGW) ,Michigan state University college of Engineering 32 p

SMIRNOV.B & MORAVINE.Y (1981): chimie agricole Edition Mir Moscou 375p.

SMIRNOV.V (1988) Géologie des minéraux utiles, édition mir 621p.

STRAHLER ,A.N., 1946 : Hypsométrie (Area-altitude) analysis of erosional topography .Bulletin ,Geol ,Soc .Amérique .Vol 63. ,pp 1117-1142 ,23 fig 1pl.

TODD.D.K, MAYS.L.W (2005):Groundwater hydrology ,Third Edition , Jonh Wiley &Sons,Inc USA 634p.

TORAK .L.J (1992) AModular finite element model (MODFE) for areal and axisymmetric groundwater flow problems .U.S Geological Survey Open File Report 90-194 153p.

UNEP(1990):The impact of the large water projects of the environment IHP UNESCO 559p.

UNESCO –CEC-IAEA-UNEP (1992): Proceedings of the international workshop On: Hydrological considerations in relation to nuclear plants IHP UNESCO 409p.

USEPA ,1993 , Guidelines for delineation of wellhead protection areas .Groundwater protection division ,office of groundwater and drinking water ,US .Environlental Protection Agency Waschington ,DC 150p

VILLA .J.M (1980):La chaine alpine d'Algérie orientale et les couffins Algéro –Tunisiens Thèse Doctorat sc-Nat Université P et M Curie Paris VI France .665p

WESTFAL.J.A(1977):Simulation modeling of the shallow groundwater system in Las Vegas Valley ,Nevada ,Water resource Centre ,Desert research Institute ,University of Nevada System 197p.

YUAN.S.W (1969) :Fondation of fluid méchanics ,Prentice –Hall of India Private Limited New Delhi .608pp

Publication revue international.

Mr Boudoukha .A , khemmoudj.K , Djabri .L (2006). Conséquence d'une exploitation d'un aquifère en pays semi aride ,Cas de la nappe superficielle d'El Eulma (Est Algérien) ,Las aguas subterraeas en los paisés mediterraneos ,Publication del instituto geológico y minero de Espana serie hydrogeologia y aguas subterraneeas N° 17 :459-465 Madrid.

Communication International.

Khemmoudj.k ,Boudoukha A (2008) Dynamique des systèmes et stratégies d'aménagement et gestion de la ressource en eau en région semi aride cas d'étude région d'El Eulma . Séminaire international sur le bassin de la Soummam, université de Bejaia. 6p

Communications national.

Khemmoudj .k , Boudoukha .A (2005) mobilisation des ressources en eau dans la région d'El Eulma ,Séminaire national sur la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau.université de Batna .3p

Khemmoudj .k ,Boudoukha .A (2005) :Impacte de la géochimie des formations géologiques sur la qualité hydrochimique des eaux souterraines de la région d'El Eulma . Séminaire National sur l'industrie Minéral et l'environnement .Université de Annaba , Institut de mines .4p

Khemmoudj.K , Boudoukha .A (2004) :Evolution de la pollution par les nitrates dans la région d'El Eulma Wilaya de Sétif .1^{er} Séminaire National sur les géosciences au service du développement durable Université de Tébessa .3p