

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار-عنابة

Faculté des sciences de la Terre
Département de Géologie

Année 2007

Thèse

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

**Contribution à l'étude hydrogéologique,
hydrochimique et Vulnérabilité d'un système
aquifère karstique en zone semi aride.
Cas du plateau de Chéria N. E. Algérien**

Option
Hydrogéologie

Par
BAALI Fethi

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

DIRECTEUR DE THESE : KHERICI Nacer Professeur, Université de Annaba
CO- DIRECTEUR DE THESE : MANIA Jacky Professeur, Université de Lille (Fr)

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : HAMAMI Mounir Professeur, Université de Skikda

EXAMINATEURS : HANI Azzedine M. C. Université de Annaba
DERADJI Fadel M. C. Université de Annaba
BOUMAZBEUR Abderrahmane M. C. Centre Univ. de Tébessa

أصبحت ندرة المياه مشكلا عويصا تعيشه كل المجتمعات، خاصة تلك التي هي في طريق النمو، حيث أن النمو الديموغرافي والتطور المعيشي والزراعي والصناعي، كان لهم الأثر الكبير في التأثير على نوعية وكمية المياه الجوفية وانخفاض ملحوظ في محتويات الخزانات الجوفية التي تمثل في غالب الأحيان المصدر الأساسي للتزود بالمياه الصالحة للشرب.

يحاول هذا العمل، بعد معاينة ميدانية حديثة، حصر الخصائص النوعية للخزانات المائية الجوفية وأخطار تلوثها بمنطقة الشريعة الواقعة أقصى الشرق الجزائري أين يسود المناخ الشبه الجاف. هذه الدراسة تعتمد على إحصاء منابع الموارد المائية ومصادر تلوثها وعلى وجه الخصوص التلوث عن طريق المياه القذرة (التي تصرف من خلال واد الشريعة) وتربية المواشي إلى جانب العوامل الجوية غير الملائمة للحفاظ على مستوى المياه الجوفية.

استغلال المياه الجوفية من خلال الخزانات الكلسية، يعد المصدر الرئيسي لسد الاحتياجات الخاصة بمياه الشرب والزراعة بالمنطقة. خلال السنوات الأخيرة لوحظ تطور ملحوظ للنشاط الزراعي الذي إلى زيادة في الطلب على المياه موازاة مع تدهور نوعيتها.

أظهرت هذه الدراسة انخفاضا ملحوظا لمستويات المياه الجوفية وارتفاعا خطيرا لتراكيز بعض العناصر الكيميائية كالنترات (80 إلى 120 مغ) هذه الوضعية استدعت التفكير الجدي في طرق لحماية الخزانات الجوفية بالمنطقة وخاصة للخزان المتواجد بالتراكيب الكلسية الأيوسينية التي تعد الخزان الأساسي لتزود المنطقة وذلك من خلال إعداد خريطة تتوزع عليها القابلية للتلوث الخاصة بجميع التراكيب الكلسية المعرضة للفعل الحثي الجوفي والتي أظهرت قابلية كبيرة لتلوث الجزء الجنوبي لحوض الشريعة.

ABSTRACT

The shortage of water became has crucial problem lived by all societies, and in particular, those of the developing countries. Indeed, the growth of the populations and the development of the agglomerations, the industrial units and the cultivated earths had for corollary a deterioration of the quality of the underground waters and a very meaningful decrease of the reserves that sometimes represent the only resources of water for the food of the populations.

The present work, tents after an actual analysis of land situation, to surround the features of the aquiferous complex and the risks of underground waters pollution of the tray of Chéria region, situated in the extreme Algerian east, where a semi arid climate reigns. This survey is based on the development of the inventory pollution sources while taking account of several factors, as the contamination by the sloppy waters and the raising of the animals, as well as of the climatic conditions.

The exploitation of the underground waters from the aquiferous carbonated is now the only resource to answer the needs in water for the human, industrial and agricultural consumption in the region.

These last years, a big agricultural activity and para agricultural developed themselves in the region dragging a growth of the needs in water and a deterioration of the quality of the resource.

The present survey shows the existence of a depression of the level piézométrique and concentrations raised in nitrates due to the anthropic activities. Securities of 80 to 120mg/l have been gotten in many wells capturing the tablecloth. This situation drove us to think seriously about the protection of the aquiferous main speaks bay of the cartography of that vulnerability while using methods reserved to karstique and fissured fields and that have revealed the existence of a very vulnerable zone in the South of Chéria region .

RESUME

La pénurie d'eau est devenue un problème crucial vécu par toutes les sociétés, et en particulier, celles des pays en voie de développement. En effet, l'accroissement des populations et le développement des agglomérations, des unités industrielles et des terres cultivées ont eu pour corollaire une dégradation de la qualité des eaux souterraines et une baisse très significative des réserves qui représentent parfois les seules ressources d'eau pour l'alimentation des populations.

Le présent travail, tente après une analyse de la situation actuelle du terrain, de mieux cerner les caractéristiques du complexe aquifère et les risques de pollution des eaux souterraines du plateau de Chéria, situer a l'extrême Est algérien où règne un climat semi aride. Cette étude est basée sur l'élaboration de l'inventaire des sources de pollution en tenant compte de plusieurs facteurs, tels que la contamination par les eaux usées et l'élevage des animaux, ainsi que des conditions climatiques.

L'exploitation des eaux souterraines à partir des aquifères carbonatées est à présent la seule ressource pour répondre aux besoins en eau, pour la consommation humaine, industrielle et agricole dans la région.

Ces dernières années, une grande activité agricole et para agricole se sont développés dans la région entraînant un accroissement des besoins en eau et une dégradation de la qualité de la ressource.

La présente étude montre l'existence d'une dépression du niveau piézométrique et des concentrations élevées en nitrates dues aux activités anthropiques. Des valeurs de 80 à 120mg/l ont été obtenus dans de nombreux puits captant la nappe. Cette situation nous a conduit a penser sérieusement à la protection de l'aquifère principal par le biais de la cartographie de sa vulnérabilité en utilisant des méthodes réservées au milieu karstique et fissuré et qui ont révélé l'existence d'une zone très vulnérable au Sud de la région de Chéria.

Liste des Figures

01	Situation géographique de la plaine d'El Ma el Abiod.....	05
02	Représentation en trois dimensions de la plaine d'El Ma El Abiod.....	06
03	Carte géologique.....	12
04	Coupe géologique	14
05	Carte du système de faille (UGF-BRNO 1971).....	18
06	Variation des moyennes mensuelles annuelles des précipitations.....	25
07	Distribution annuelle des précipitations aux stations d'observation (1984-2004).....	26
08	Distribution interannuelle des précipitations mensuelles aux stations d'observation (1984-2004).....	27
09	Corrélation entre les températures calculées par les deux modèles.....	30
10	Température moyenne mensuelle aux stations d'observation	31
11	Abaque de l'indice d'aridité annuelle de De Martone 1923.....	33
12	Climogramme de Peguy.....	34
13	Diagramme Pluviothermique aux stations d'observation 1984-2004.....	36
14	Diagramme ombrothermique aux stations d'observation 1984-2004.....	37
15	Directions prédominantes des vents.....	42
16	Coupe géologiques schématiques sur oued el ma lassouad et E'znad	43
16.1	Photographie de l'oued el Goussa à el Goussa Rouabhia 2005.....	43
16.2	Vue satellitaire de la plaine d'El Ma El Abiod. Septembre2005.....	45
17	Carte de position des sondages électriques.....	46
18	Coupe géoélectrique transversales I	47
18.1	Coupe géoélectrique transversales II	48
18.2	Coupe géoélectrique transversales III.....	49
18.3	Coupe géoélectrique transversales IV.....	49
18.4	Coupe géoélectrique transversales V.....	50
18.5	Carte d'égale épaisseur des sables.....	51
18.6	Carte d'égale épaisseur des grès.....	52
18.7	Carte d'égale épaisseur des argiles sableuses.....	52
18.8	Représentation en 3D des horizons aquifères.....	53
19	Coupes hydrogéologiques à travers la plaine d'El Ma El Abiod.....	58
19.1	Structure géologique et hydrogéologique du système aquifère d'El Ma El Abiod.....	59
19.2	Carrière de sable abandonnée à T'noukla. Rouabhia 2005.....	59
20	Carte des conditions aux limites du système aquifère d'El Ma El Abiod.....	60
21	Carte des transmissivités.....	62
22	Carte des perméabilités	63
23	Représentation graphique des essais par pompage.....	65-69
24	Carte Piézométrique. mars 2001	70
25	Carte Piézométrique. octobre 2002.....	71
26	Carte Piézométrique. septembre 2003.....	72
27	Carte Piézométrique. mars 2003.....	73
28	Carte Piézométrique. mars 2004.....	73
29	Variation de la cote Piézométrique dans le temps et dans l'espace.....	75
30	Composantes du bilan hydrogéologique dans le bassin versant d'El Ma El Abiod.....	76
31	Evolution du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative au cours du temps...	80
32	Schéma simplifier d'un annaux concentrique utilisé dans les essais d'infiltration.....	81
33	Carte de l'infiltration en cm/h. Rouabhia septembre 2003.....	82
34	Classification des puit recensé en pourcentage.....	83
35	Pourcentages des différentes causes d'abandon des puits.....	84

36	Sources naturelles et anthropiques de la salinité.....	87
37	Diagramme de scholler-berkallof. octobre 2000.....	91
37.1	Diagramme de scholler-berkallof. Juin 2002.....	92
37.2	Diagramme de scholler-berkallof. octobre 2003.....	92
38	Diagramme de Piper. (présentation générale).....	93
38.1	Diagramme de Piper. Octobre 2000.....	94
38.2	Diagramme de Piper. Juin 2002.....	95
38.3	Diagramme de Piper. Octobre 2003.....	96
39	Carte des chlorures. Octobre 2000.....	97
39.1	Carte des chlorures. Juin 2002.....	97
39.2	Carte des chlorures. Octobre 2003.....	98
39.3	Carte des chlorures. Mars 2004.....	98
40	Carte des sulfates. Octobre 2000.....	99
40.1	Carte des sulfates. Juin 2002.....	99
40.2	Carte des sulfates. Octobre 2003.....	100
40.3	Carte des sulfates. Mars 2004.....	100
41	Carte des conductivités. avril 2003.....	102
42	Carte du strontium juin 2002.....	103
43	Carte des concentration molaires du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+}	104
44	Le cycle de l'azote dans le sol.	105
44.1	Carte des nitrates. Octobre 2000.....	107
45	Carte des nitrates. Juin 2002.....	107
45.1	Carte des nitrates. Octobre 2003.....	108
45.2	Carte des nitrates. Mars 2004.....	108
46	Mode de transfert des émissions polluantes vers le sol et les eaux souterraines.....	109
47	Risque de migration de polluants par infiltration des eaux a travers un sol poreux.....	111
48	Carte d'inventaire des points d'échantillonnage	113
49	Carte de répartition du plomb.....	114
50	Carte de répartition du Zinc.....	115
51	Corrélation entre le zinc et le plomb.....	116
51.1	Evolution dans l'espace du zinc et du plomb.....	116
52	Représentation graphique en ACP1 année 2000.....	119
52.1	Représentation graphique des individus année 2000.....	119
53	Représentation graphique en ACP1. année 2003.....	121
53.1	Représentation graphique des individus année 2003.....	121
54	Représentation graphique en ACP1. globale.....	123
54.1	Représentation graphique des individus ACP globale.....	123
	Carte d'aptitude des eaux a l'irrigation selon le diagramme de Richards Octobre 2000	131
	Carte d'aptitude des eaux a l'irrigation selon le diagramme de Wicox Octobre 2000...	131
55	Carte de la profondeur d'eau et ces indices	140
56	Carte de la recharge efficace et ces indices.....	141
57	Carte de la nature de la zone saturée et des indices correspondant.....	142
58	Carte de la pente et des indices correspondants.....	143
58.1	Carte de la nature du sol et indices correspondants.....	143
59	Carte de la zone non saturée et indices correspondants	144
60	Carte de la perméabilité et des indices correspondants.....	145
61	Carte des indices DRASTIC.....	145
62	Carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC.....	146
63	Principe de la méthode BRGM pour l'établissement de la carte de vulnérabilité.....	147
63.1	Carte de vulnérabilité selon la méthode BRGM.....	148

64	Carte de vulnérabilité selon la méthode des indices de contaminations.....	150
70	La notion de risque potentiel.....	153
71	Carte des sources de pollution réelle où potentielle des eaux.....	154
72	Carte de l'indicateur pente.....	155
73	Carte de risque nitrates (moyenne des campagnes 2000-2004).....	155
74	Construction d'un indicateur de pollution.....	156
75	Carte de risque de pollution d'origine anthropique des eaux souterraines de la plaine d'El Ma El Abiod.....	157

Tables des Matières

	INTRODUCTION GENERALE	01
A	<i>I - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT</i>	
1	Cadre général	03
1.1	Situation géographique	03
1.2	Population	03
1.3	Activités économique et industries	03
B	<i>GEOLOGIE</i>	05
1	Introduction	05
2	Aspect géomorphologique	05
3	Stratigraphie de la région de Chéria	05
4	Tectonique	09
5	Paléontologie	09
II	Géophysique	11
1	Prospection géoelectrique	11
1.1	Interprétation des résultats des sondages	12
1.2	Carte d'iso résistivité AB 1000	12
1.3	Carte du toit du substratum	13
1.4	Interprétation des coupes géoélectriques	14
2	Gravimétrie	17
3	Diagraphie	18
C	Etude de la fissuration et la karstification	18
1	Etude quantitative et qualitative de la fracturation	18
1.1	Etude quantitative	18
2	Etude de la karstification	21
2.1	Introduction	21
2.2	Morphologie karstique	21
2.3	Signes de karstification des calcaires éocènes	22
3	Conclusion	24
	<i>II - CLIMATOLOGIE ET HYDROLOGIE</i>	
A	Climatologie	
1	Introduction	26
2	Détermination du type de climat	26
II	Etude de la pluviométrie	27
II.1	Homogénéisation des données	27
II.2	Analyse statistique des précipitations	30
II.3	La lame d'eau moyenne précipitée sur le bassin	33
3	Les variations temporelles des précipitations	35
3.1	Variations interannuelles des précipitations	36
3.2	Variation moyenne mensuelle des précipitations	36
4	Variation de la température	38
5	Le diagramme ombrothermique	38
6	Evapotranspiration	39
6.1	méthode de Coutagne	39
6.2	Méthode de Turquie	39
6.3	Méthode de Thornthwaite	41
7	Bilan hydrique	41
8	Conclusion	44
	<i>III - CARACTERISATION ET ETAT ACTUEL DES AQUIFERES</i>	

1	Introduction	46
2	Géométrie de l'aquifère	46
2.1	L'aquifère des calcaires Maastrichtiens	46
2.2	L'aquifère des calcaires Eocènes	46
2.3	L'aquifère Moi Plio Quaternaire	48
3	Hydrodynamique des eaux souterraines	48
3.1	La piézométrie	48
3.1.1	Campagne du mois de septembre 2002	50
3.1.2	Campagne du mois de septembre 2003	50
3.1.3	Campagne du mois de février 2005	51
3.1.4	Campagne du mois de septembre 2005	52
3.2	Evolution de la profondeur du plan d'eau dans le temps et dans l'espace	52
3.3	Les conditions aux limites	55
3.4	La transmissivité et le coefficient d'emmagasinement	56
4	HYDROCHIMIE DES AQUIFERES	56
4.1	Echantillonnage et analyse	56
4.2	Les paramètres physicochimiques	57
4.3	Les paramètres chimiques	60
4.3.1	La cartographie chimique	60
4.3.2	Les faciès chimiques	60
4.3.3	Etude de l'évolution des minéraux et des sels dissous	61
4.3.4	Représentation en composantes principales	62
4.3.5	Etudes des rapports caractéristiques	63
5	Evolution chimique des eaux souterraines	69
5.1	Représentation graphique sur le diagramme de Scholler Berklof	71
6	Utilisation agricole des eaux souterraines	73
7	Etude isotopique	75
7.1	Relation de l'oxygène 18 en fonction de l'altitude	75
8	Conclusion	76
<i>POLLUTION ET VULNERABILITE</i>		
1	Introduction	77
2	Les chlorures	77
3	Le strontium	78
4	Cartographie du strontium	79
5	Le rapport Sr / Ca	80
6	Le cycle de l'azote	81
7	Répartition des nitrates, mars 2002	83
7.1	Répartition des nitrates, septembre 2002	83
7.2	Répartition des nitrates, septembre 2003	84
7.3	Répartition des nitrates, avril 2004	84
7.4	Répartition des nitrates, février 2005	86
7.5	Répartition des nitrates, septembre 2005	86
7.6	Les phosphates	87
8	Les métaux lourds	89
9	Origine de la pollution	90
9.1	L'élevage des animaux	90
9.2	Les rejets urbains	91
VULNERABILITE A LA POLLUTION DE LA REGION DE CHERIA		
1	Introduction	94
2	Vulnérabilité des nappes souterraines	94

2.1	Notions générales	94
2.2	Les critères de vulnérabilité	95
2.2.1	Les critères de vulnérabilité intrinsèque	95
2.2.2	Les critères de vulnérabilité spécifique	97
2.3	Les méthodes de cartographie de la vulnérabilité	97
2.3.1	La méthode RISKE	98
2.3.2	La méthode God	99
2.3.3	La méthode DRASTIC	100
2.3.4	La méthode SINTACS	102
2.3.5	Autres méthodes	102
3	Essai d'établissement de la carte de la vulnérabilité EPIK	108
3.1	Résumé de la méthode	108
3.2	La méthode multicritères EPIK	109
3.2.1	Démarches	109
3.2.2	Evaluation semi quantitative	109
3.2.3	Calcul du facteur de protection	110
3.2.4	Détermination des zones de protection	111
4	Conclusion	113
	CONCLUSION GENERALE	114
	Bibliographie	116
	Annexes	121

INTRODUCTION GENERALE

La recherche et l'exploitation des eaux souterraines et leurs protections, contre tous types de contamination, par les effets anthropiques et industriels, reste le souci primordial de toute l'humanité.

De nombreuses recherches se concentrent actuellement sur l'étude des ressources en eaux dans les zones semi-arides, où les contraintes climatiques imposent une gestion intelligente et approfondie de ces ressources.

Le présent travail vient s'ajouter aux travaux antérieurs pour la quantification, la connaissance des conditions d'exploitation et la protection des eaux de la région de Chéria.

Cette dernière est située au Nord-est algérien à 50 km du chef lieu de la wilaya de Tébessa.

Dans cette étude nous allons approfondir ces connaissances et essayer de répondre à certaines questions :

Quel est l'état actuel de la qualité chimique des eaux souterraine de la plaine ?

Quels sont les différents polluants chimiques existants dans l'eau, ainsi que leurs origines ?

Quels sont les mécanismes physico-chimiques intervenant dans l'évolution de ces polluants dans le temps et dans l'espace ?

Enfin quel est le risque de la plaine vis-à-vis de la pollution et les méthodes de prévention ou de protection ?

Pour répondre à ces questions un suivi hydrogéologique et chimique des eaux souterraines de la région depuis 2002 à un pas de temps saisonnier (basse et haute eaux).

Plusieurs outils géologiques, chimiques et statistiques ont été utilisés afin d'interpréter les données.

Les détails des résultats sont présentés dans cette thèse à travers deux parties :

Une 1^{ère} partie est relative à l'étude des caractéristiques générales du plateau, afin de déterminer les différents aquifères existants et leurs conditions d'existence. Il a été ainsi développé les chapitres suivants :

Dans le 1^{er} chapitre, il a été abordé les caractéristiques physiques du bassin versant ainsi que la géologie (situation géographique, stratigraphie et tectonique) et la géophysique (prospection géo-électrique, diagraphie et gravimétrie). A partir de ce chapitre, on a pu avoir une idée détaillée concernant les différentes formations géologiques, leurs natures et la susceptibilité aquifère du site étudié.

Dans le second chapitre, il a été étudié les différents paramètres climatologiques (type de climat, étude des précipitations, températures et bilan hydrique) et l'hydrologie de l'oued Chéria (étude des débits).

La deuxième partie est consacrée aux paramètres hydrogéologiques (péizométrie, conditions aux limites), l'évolution des éléments chimiques, la détermination des différents

éléments qui possèdent un caractère polluant ainsi que les foyers de pollution et les moyens de protections. Les chapitres relevant de cette deuxième partie se présentent comme suit :

Chapitre III, consacré à l'étude hydrogéologique de la région (la piézométrie et les conditions aux limites) et à l'étude hydrochimique (le suivi saisonnier des paramètres physico-chimiques, leurs représentation cartographique), ainsi qu'à l'étude de la qualité des eaux destinées à l'alimentation humaine et à l'irrigation.

Le quatrième chapitre, vient pour mieux étudier les origines des pollutions, détectée dans le chapitre III. La proposition des méthodes de prévention et de protection des eaux souterraines, par la définition de diverses méthodes de cartographie de la vulnérabilité, et un essai d'application de la méthode « EPIK » spécifique aux milieux fissurés et karstiques.

Chapitre I

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT

I. CADRE GENERAL

1. situation géographique

Chéria est une assez grande bourgade avec une vaste place centrale située dans l'un des points les plus bas de la dépression et visible des monts environnants. Cette structure de bassin permet de ne pas manquer d'eau : tout les oueds convergent vers le Sud (l'exécutoire du bassin de Chéria)

La dépression de la ville de Chéria est entourée par les massifs des Djebels : Doukkane, Tazbent, Troubia, Krime, Reddama, Zeghrata, kef Nsour, Dj. El Mezraa, Dj. Zohra, Dj. Gaagaa

Le synclinal perché de Chéria (fig. 01) appartient au bassin versant de chott Melghir à 45 km au sud ouest du chef lieu de la wilaya de Tébessa. Il est de forme grossièrement triangulaire d'une superficie de 722 km², limité au Nord par le fossé d'effondrement Hamammet- Tébessa-Morsott, à l'Est par le sous bassin versant d'El Ma El abiod, à l'Ouest par le bassin d'EDALAA et au Sud par le bassin de Tlidjen.

2. La population

La population de la région de Chéria s'est élevée à environ 70 000 habitants d'après le recensement national de 1999. Cette population est concentrée à la ville de Chéria, à Bir Mokeddem, M'Chentel, Ouled saidane à Abla, où se trouve, essentiellement développée, les activités d'élevage et agricole

3. Activités économiques et industries

La zone en question appartient au domaine sub-saharien ce qui limite la végétation dans la région.

L'activité d'élevage, ovin et bovin, est la plus importante activité dans la région

Les terres agricoles sont évaluées à 326 hectares. Le volume d'eau nécessaire pour l'irrigation s'élève à 6.10⁶ m³ d'après les récentes enquêtes sur la région. Les habitants procèdent à la culture de quelques légumes essentiellement pomme de terre, salade, fève...etc, dont l'irrigation est assurée grâce aux eaux souterraines.

La culture des céréales est conditionnée par les précipitations qui sont très aléatoires. La principale ressource de la région provient de l'élevage qui est la principale activité de l'ensemble du secteur.

Le secteur industriel est moins important dans la région sauf pour une petite industrie transformatrice des produits alimentaires pour bétail.

La végétation naturelle, à base de pin d'Alep, est développée au Nord de la zone d'étude et devient de plus en plus rare vers le Sud jusqu'à disparition en limite Sud au Dj Allouchetes. Par opposition avec les plaines de Mellégue et les monts de Tébessa, les montagnes, bordant la plaine de Chéria, se singularisent tout d'abord par l'absence presque

totale de végétation arbustive, ne fait vraiment exception, que les mont Est qui sont recouvert d'une forêt de pins.

On peut également citer les geneviers épais du Djebel Kraa et surtout des basses pentes du Djebel Arour. Partout, ailleurs, la roche ou les sols affleurent entre les touffes d'une steppe basse où domine l'Alfa.

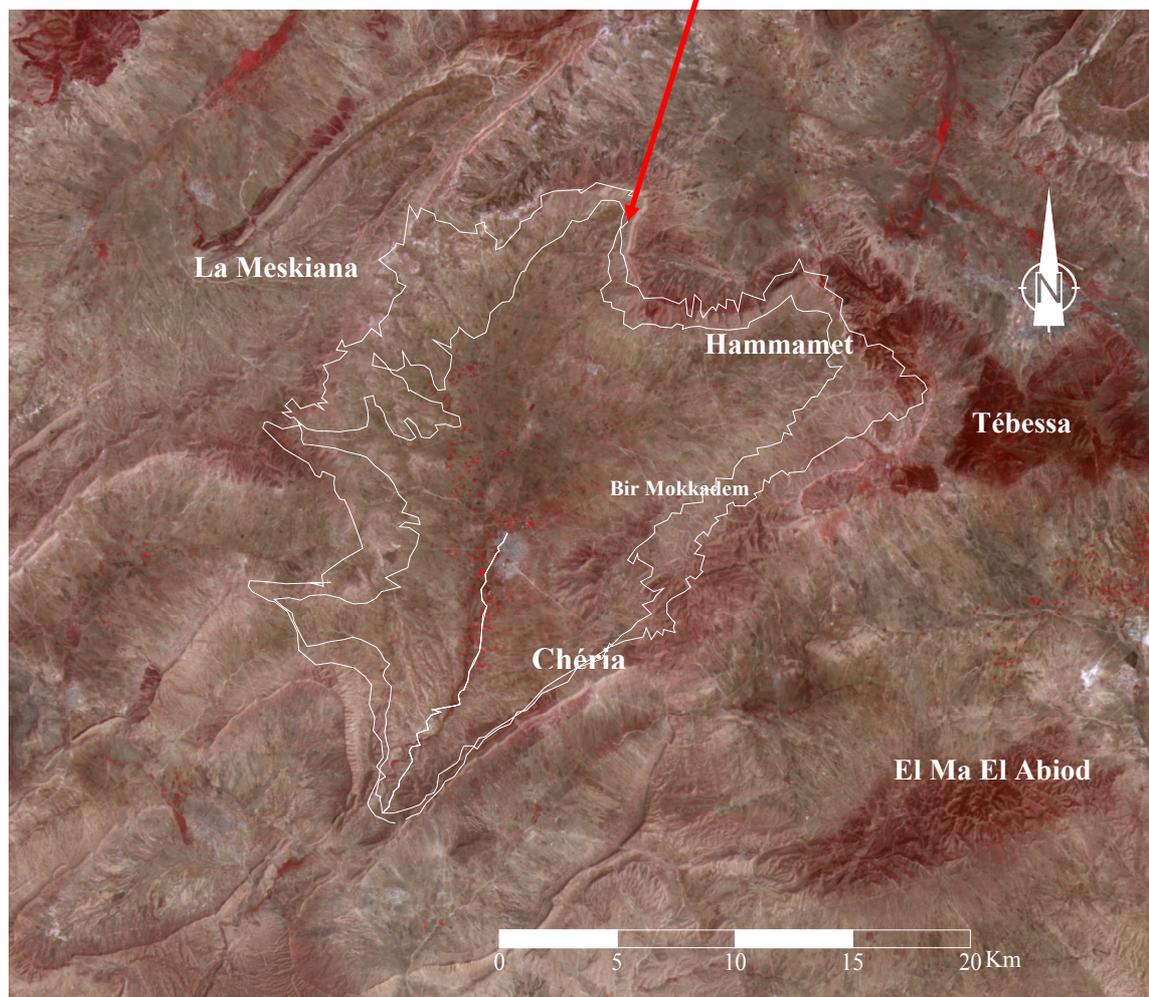


Image satellitaire ALSAT 01. Centre d'imagerie sat. Bouzaréaa Alger

Fig. 01- Situation géographique du plateau de Chéria

II. GEOLOGIE

1. INTRODUCTION

Le plateau de Chéria l'un des quatre systèmes aquifères important constituant la région de Tébessa. Au Nord-Est de l'Atlas Saharien. Représenté principalement sur trois cartes au 1/50.000 de Youkous-les-bains (N° 205), Chéria (N°234) et Ain Thlidjen (N°265). Il appartient à la zone des hautes plaines, d'une altitude moyenne de 1100 m, limité grossièrement entre les parallèles 35°50 et 36° longitudinale, 7°30 et 8° de latitude.

L'étude géologique détaillée de la région ne fait pas l'objet de cette thèse. Nous nous contenterons de reprendre les anciens travaux effectués par les différents auteurs tels que : Lambert et Durozoy (1947), Gaud (1977), Ricard (1979),etc.

2. ASPECT GEOMORPHOLOGIQUE

Un rappel du contexte géomorphologique est cependant nécessaire afin de mieux comprendre l'aspect hydrogéologique de la région. La forme générale du bassin de Chéria est grossièrement triangulaire, la pointe vers le Sud Sud-Ouest. Le pourtour du bassin est limité par des chaînes de montagnes continues, à peine coupé de cols peu entaillés. Au Sud ces dernières convergent en entonnoir et laisse entre elles une vallée étroite. Le sommet le plus culminant est Doukkane à 1685 m, les flancs de ces montagnes présentent des pentes accentuées qui vont en s'adoucisement dans la plaine jusqu'à se confondre avec l'inclinaison générale de celle-ci descendant du Nord et du Nord-Est vers le Sud. Une chaîne de monts et de collinettes s'étend à l'Est du plateau nord en forme d'arc depuis le djebel Tazbent (1418) jusqu'à Kef M'chouar (1135) en une série d'élévation de moins en moins hautes au-dessus du plateau qui sont Draa krerafi (1200 m), collines de Bir MokkaDEM, Kef hadjera Oum Neb et Draa Douamis.

Le bassin présente également deux parties nettement séparées à hauteur du village de Chéria en deux parties distinctes, le Nord large et étendue et le Sud de moindre surface.

3. STRATEGIE DE LA REGION DE CHERIA

Si nous nous référons aux études sus citer la série stratigraphique peut être établie de la manière suivante : des niveaux les plus bas aux niveaux les plus récent (Fig. 02):

3.1 Secondaire

3.1. a Crétacé supérieur:

La période de crétacé est caractérisée par de puissants dépôts marneux, témoin d'une sédimentation vaseuse généralisée, mais la fin de l'époque est marquée par l'apparition d'une sédimentation essentiellement calcaire : *calcaire à Inocérames*.

3.1. a.1 Turonien

Affleure au Nord (Dj. Essenn, Dj. Gaaga) et au Sud (Outa Oum Khaled) sous forme des calcaires beiges, roses à patine, parfois sombres et piquetés d'hématite.

3.1. a.2 Sénonien supérieur

3.1. a.2.1 Campanien

D'après R. LAFFITTE (1956) ; il s'agit des marnes grises en profondeur, verdâtre a la surface altérée et contiennent de nombreux cristaux de gypse a la surface provenaient de la de la décomposition des pyrites. Elles se localisent dans la plus grande bordure externe du bourrelet montagneux limitant le plateau de Chéria, d'une épaisseur varie entre 300 et 400m.

3.1. a.2.2 Maestrichtien:

Des calcaires tendres crayeux surmonte ces marnes, subit de notables variations de faciès du Nord au Sud. Les bancs supérieurs se chargent en silex et présentent une grande analogie de faciès avec certains niveaux de l'Éocène moyen. L'épaisseur peut être estimée à 250m ; les forages Bir Droudj, J8-9 et F2 ont traversé.

3.2 Tertiaire

3.2. a Éocène moyen inférieur

3.2. a.1 Danien-Eocène inférieur

Au calcaire du Maestrichtien succèdent les dépôts marneux très argileuses, noirâtres d'une épaisseur de 100 à 150m, particulièrement développées dans le mont de Tazbent (Nord-Est) (fig. 2). Au sud leurs épaisseurs deviennent très difficile à évaluer mais elles ne dépassent pas les vingtaine de mètres et passant latéralement des calcaires crayeux à silex.

3.2. a.2 Thanétien :

Des formations lumachelliques calcaires et marnes, affleurants au Sud, et sur les bordures des anticlinaux de Telidjene.

3.2. a.3 Ypresien

La fin des dépôts du thanétien est marquée par l'apparition d'une part d'une série siliceuse ou marneuse, apparaisse au Nord (Koudiat Kraa et à Draa Belgacem) et d'autre part des calcaires marneux et des calcaires brun-beiges à silex avec présence de niveaux phosphatés.

3.2.a.4 Lutétien

Un puissant système lagunaire subsident des calcaires à gypse blanchâtre fragile cas de l'affaissement de Douamis et l'affleurement de Bir Touil.

3.2.b. Mio-Pliocène

Il est discordant et transgressif sur les calcaires de l'éocène moyen. Constitué de bas en haut par des alternance d'argiles gypseuses et de lentilles de sable et des sables siliceux jaunes. L'épaisseur moyenne est en virons 60m.

3.3 Quaternaire

Affleure dans les parties Nord au abords des dj Gagaa et Tazbent, y forme des plateaux inclinés vers le Sud-Ouest, consolidés à la surface par une croûte calcaire et découpés par l'érosion actuelle. En aval de Chéria est représenté par des cailloutis fluviaux formant un vaste plateau limité au Sud-Ouest par le talus Draa Fidh el Mahri, à l'Est par le marécage de Chéria.

3.3 .a Les alluvions actuels

3.3.a.1 Alluvions de remplissage

Constitue le marécage de Chéria en alternance avec des horizons argileux. Se sont des cailloutis et petits galets enrobés dans un ciment plus ou moins argileux, elles peuvent atteindre une puissance minimum de 50m.

3.3. a.2 Alluvions de piedmont

Elles constituées par des cailloutis très propres, elles occupent toute la périphérie de la plaine de Chéria. Elles peuvent atteindre des épaisseurs importantes au pied de dj Doukkane

3.3. a.3 Les éluvions

Ils sont constitués par des esquilles plates dont la taille peut varier entre la dimension de la main et celle de l'angle, provenant du gel sur les calcaires maestrichtiens. Leur faible épaisseur est cependant inversement proportionnelle à leur rôle hydrologique (Lambert 1946).

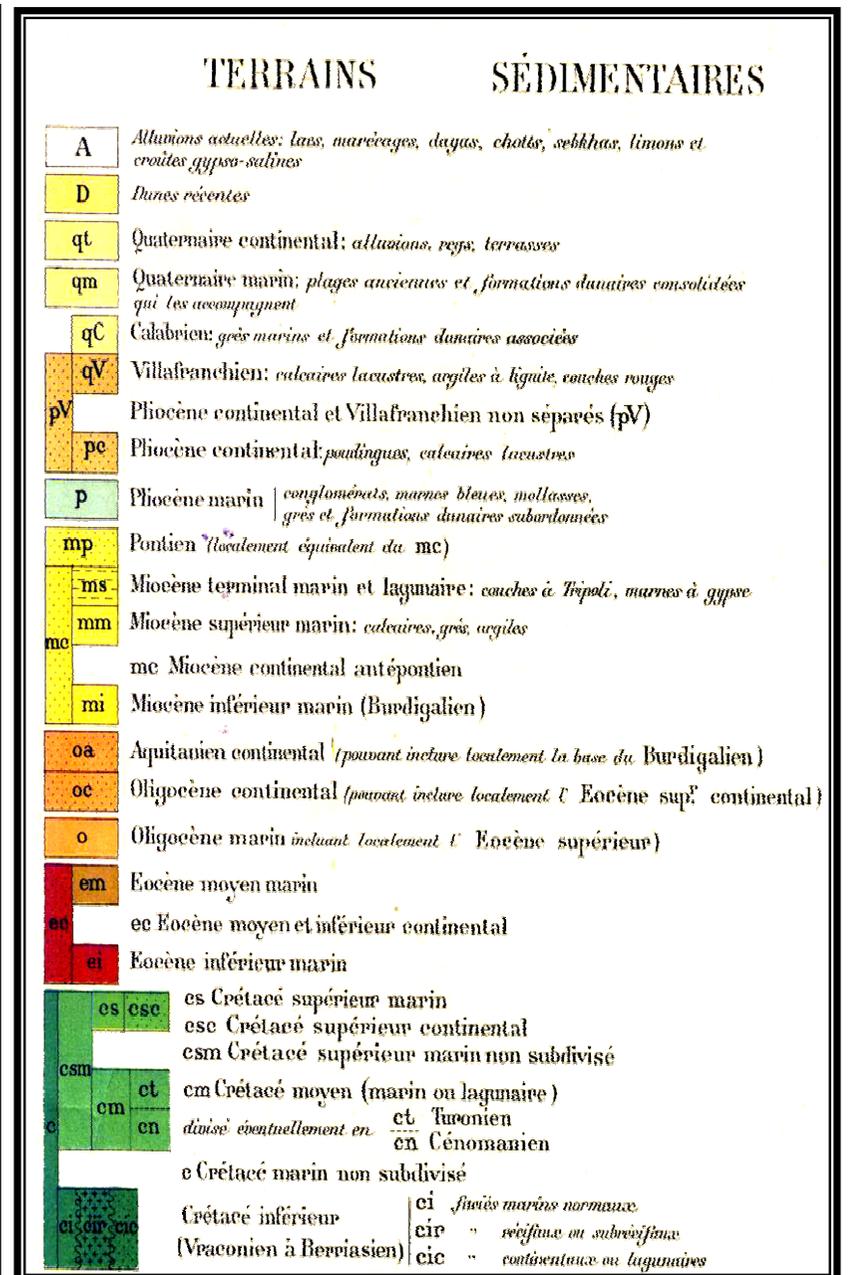
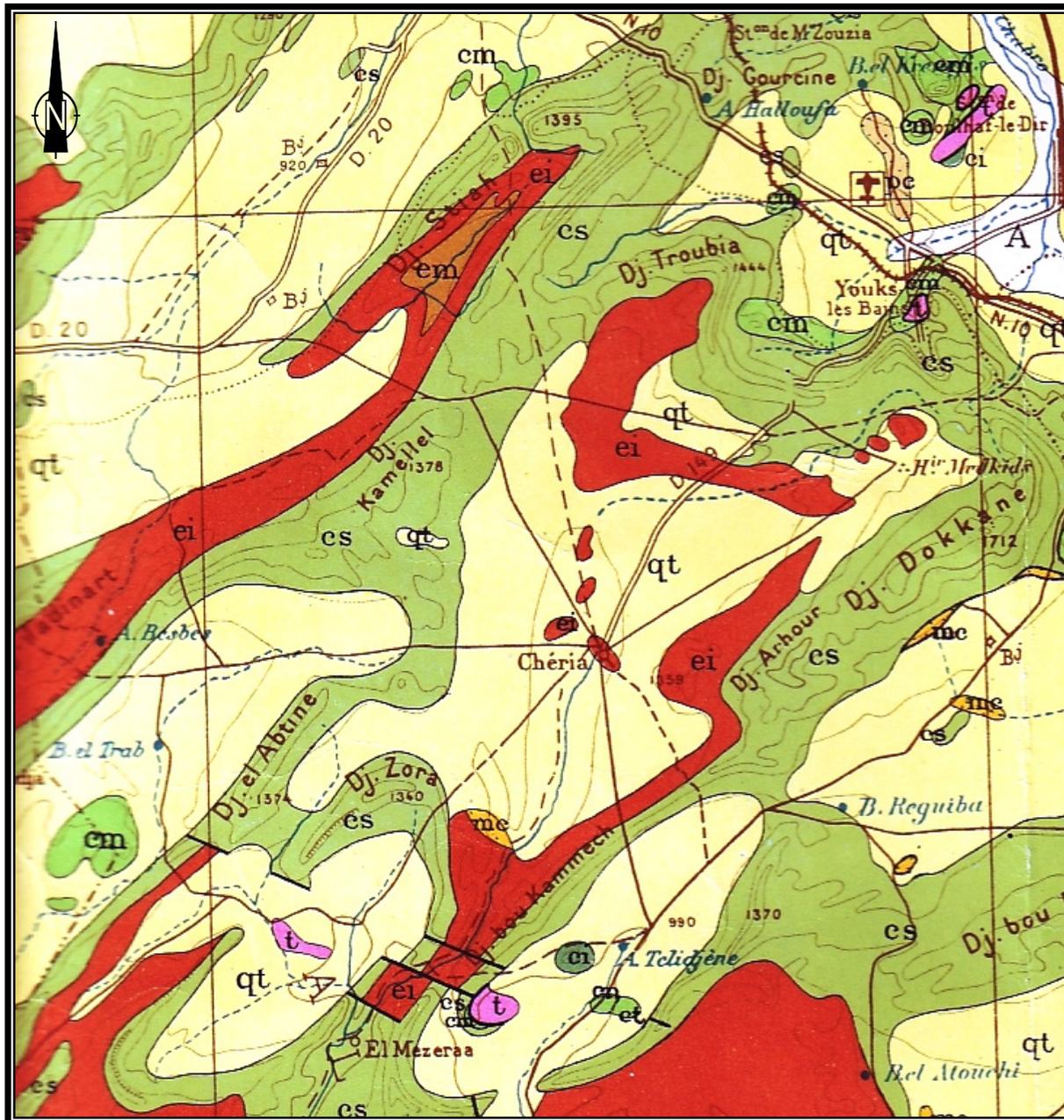


Fig. 02 – Géologie de la région de Chéria à partir de l'extrait de la carte géologique de l'Algérie.

5. PALEONTOLOGIE

Dans ce paragraphe on essaye de citer quelque passage concernant les formations de la régions, apparus dans le livret de la paléontologie des vertébrés en Afrique du Nord (Française) par C. Arambourg 1952.

5.1 Les poissons

Les niveaux phosphatés de l'éocène sont, comme ceux du maestrichtien, très riches en débris de vertébrés. Ils forment dans les régions du Sud constantinois et du Sud tunisien, d'importants gisements activement exploités. L'âge de leurs dépôts s'étend de du montien au lutétien supérieur.

5.2 Les mammifères

L'hauteur de l'ouvrage sur site dit: «nos connaissances sur les faunes mammalogiques tertiaire de bérie sont très incomplètes.

L'Éocène et l'Oligocène n'ont encore, dans leurs totalité, fourni aucun document certain. Les faunes du miocène inférieur et moyen ne sont elles-mêmes connues que très partiellement par quelques documents sporadiques .je citerai, pour ce qui concerne les niveaux les plus inférieurs du miocène, les dents de Proboscidiens découvertes, l'une dans la région de kenchla (aures))et rapprochée, par Gaudry, de celles de *Mastodon turicensis* Schinz ., l'autre en Kabylie par Depéret (1897) et qu'Osborne (1936) a attribuée au genre *Phiomia*.

C'est sans doute aux horizons de base miocène qu'il convient d'attribuer des restes de *Mastodon* et de *Dinotherium* recueillis dans les couches continentales superposées aux niveaux phosphatés marins du Sud constantinois (Brives, 1919, 1920)».

II. GEOPHYSIQUE

L'étude géophysique dans la région de Chéria est basée principalement sur la prospection géoélectrique menée par la société TRANSAKTA-GEOMETAL en 1971 et la CGG en 1970 (fig.04), sans oublier l'étude gravimétrique établie par Zerdazi (1990) sur la carte 205 d'El Hammamet la partie Nord du Bassin ainsi que la diagraphie de quelques forages par la direction d'hydraulique de la wilaya d'Annaba (D.H.W) entre 1973 et 1977.

Ceci a permis à définir sur le terrain les formations susceptibles être aquifères.

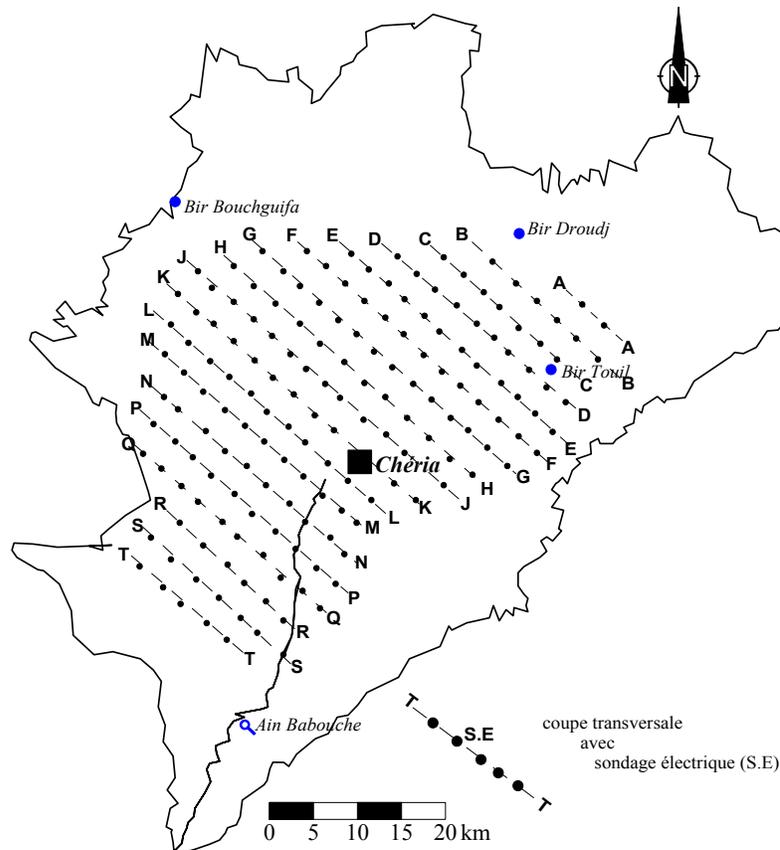


Fig. 04- Carte de positionnement des sondages électriques. CGG 1970

1. PROSPECTION GEOELECTRIQUES

La prospection géoélectrique suscitée recouvre une superficie de 790 km² représenté par 291 sondages électriques, disposés suivants des profils Nord-Ouest Sud-Est et espacés de 1km, les sondages eux-mêmes distant de 1km. Lors de cette campagne les lignes d'injection AB ont été de 2000m (68 S.E), 3000m (64 S.E), 4000m (158 S.E) (d'après le rapport géophysique modifié).

1.1 Interprétation des résultats des sondages

Vu la difficulté quand on a connu pour avoir les données brutes pour une éventuelle réinterprétation, on reprend les anciennes interprétations.

1.2. Carte d'iso-résistivités en ligne AB=1000m (prof d'investigation 200m)

Cette carte est caractérisée par la plage conductrice (moins de 20 ohm-m) étalée du Nord au Sud et qui correspond à la remontée des marnes daniennes entre les calcaires de l'éocène et ceux du maestrichtiens (Fig.05).

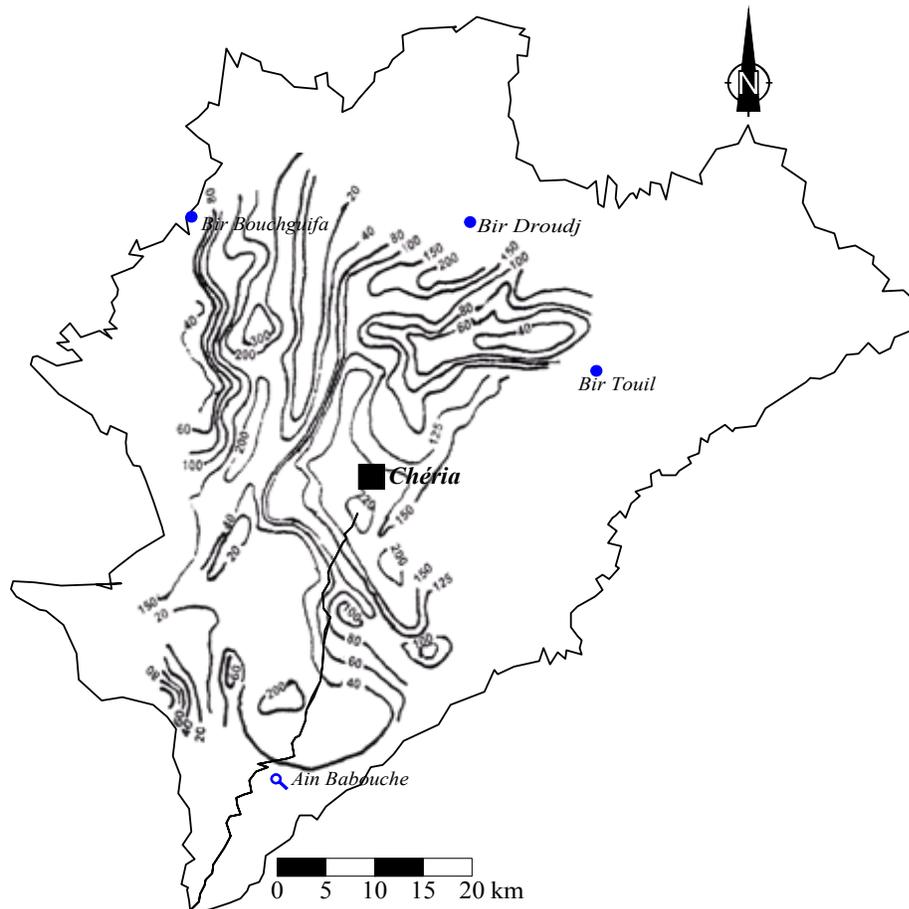


Fig. 05- Carte d'iso-résistivités en ligne AB=1000m. CGG 1970

Plus à l'Ouest, la remontée des calcaires maestrichtiens, très résistants, plus à l'Ouest les marnes campaniennes (chute brutale des résistivités).

Cette carte limite bien les diverses couches dans la limite de la profondeur d'investigation, mais elle met d'autre part en évidence deux anomalies qui intéressent semble-t-il l'allure des calcaires éocènes sous le recouvrement.

Le fort gradient des courbes de résistivités au se trouve Nord-Ouest (entre les S.E. DE8 et E9, CD et 4D9, C4 et CD5) ce qui peut représenter un accident avec approfondissement vers le Nord des calcaires éocènes. Cet accident pourrait se prolonger au travers du bassin, vers l'Ouest, le dessin des courbes suggérant également un affaissement Nord du maestrichtien et du campanien.

Au Sud un gradient des courbes orienté Nord-Ouest semble correspond à un enfoncement brusque des calcaires éocènes vers le Sud avec épaissement du remplissage miocène. Cet accident probable borderait au sud les affleurements de Chéria.

La carte traduit ainsi l'allure des calcaires éocènes la partie Est, les zones les plus conductrices correspondent aux zones les plus profondes. L'axe du bassin éocène orienté d'abord orienté Est-ouest dans la partie Nord puis prenant ensuite une direction normale NNE-SSW (fig. 5).

1.3 Carte du toit du substratum résistant

La carte du toit du substratum résistant (fig. 06): calcaires éocènes à l'Est, calcaires maestrichtiens à l'Ouest, est dans ces grandes lignes identique à la carte des résistivités. Les accidents F1 et F2 y sont également reportés. L'accident F1 divise le bassin en deux structures bien distinctes :

L'une au Nord, ou le synclinal dit de Chéria à une direction NE-SW , l'accident F2 peut recouper transversalement ce dernier dans sa partie Nord on approfondissant les calcaires vers le Nord, de sorte qu'un synclinal secondaire apparaîtrait avec une direction Est-ouest.

L'autre au sud de l'accident F1, elle se décompose en deux bassins, le premier centré sur les S.E. NP3 et P3, qui est le prolongement du synclinal de l'oued el El btine. L'autre sur les S.E. RS4, RS5, R6 où les calcaires atteignent 250-300m de profondeur, est le prolongement du synclinal du Dj Babouche. Entre les deux un léger relèvement des calcaires éocène (S.E. QR3, Q4, PQ5, P5, MN9) représente le prolongement, rapidement amorti, de l'anticlinal médian de El Outa Guibeur. Dans l'ouest de cette zone les calcaires éocènes se distinguent mal des niveaux résistants du recouvrement et des calcaires maestrichtiens sous-jacents. Ce qui fait que dans cette zone leurs limites Ouest est mal assurée et que leur profondeur est difficilement interprétable.

Au delà de la limite des calcaires éocène, dans la partie Ouest, le prolongement des calcaires maestrichtiens est assez bien assuré, leurs profondeurs considérées sous réserves, notamment en certains points de confusions entre les argiles miocènes et les argiles daniennes qui les recouvrent. La surface d'érosion des calcaires maestrichtien d'une faible profondeur et une grande superficie dans la partie Nord-Ouest ce qui rend difficile voir impossible de mettre en évidence les éventuels accidents qui peuvent affecter ces calcaires et ce n'est que l'étude du mur de cette formation qui aurait pu éventuellement nous renseigner sur ce point.

1.4. Interprétation des coupes géoélectriques

L'observation des coupes géoélectriques a permis la conclusion des résultats suivants

1.4.1 Formation anti-miocène

Dans la zone Nord les coupes de B à L sont particulièrement simples. Elles traduisent bien la structure synclinale de l'éocène, du Danien et du Maestrichtien. Dans cette zone les épaisseurs sont respectivement constantes (200 à 250 m) pour des résistivités de l'ordre de 200 à 300 ohm.m.(fig.07)

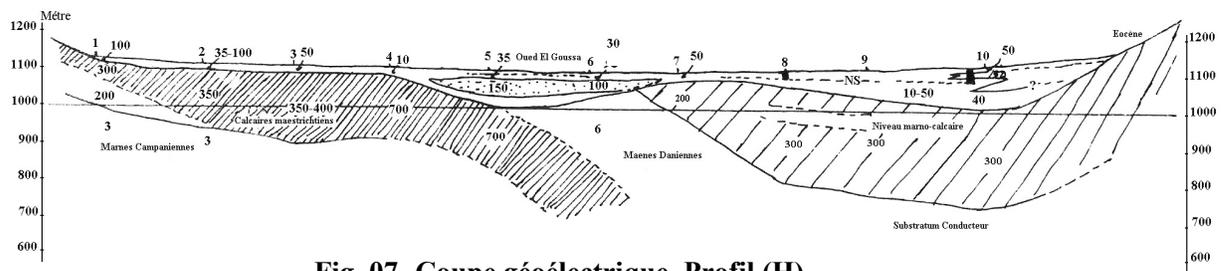


Fig. 07- Coupe géoélectrique. Profil (H)

Les épaisseurs du Danien semble plus variable diminue du Nord vers le sud (400 à 250 m)

L'épaisseur moyenne des calcaires Maestrichtiens semble être de l'ordre de 250 m mais difficile à estimer (fig. 08), d'autant plus qu'ils comportent souvent une partie sèche très résistante. Ils sont érodés dans la partie Ouest.

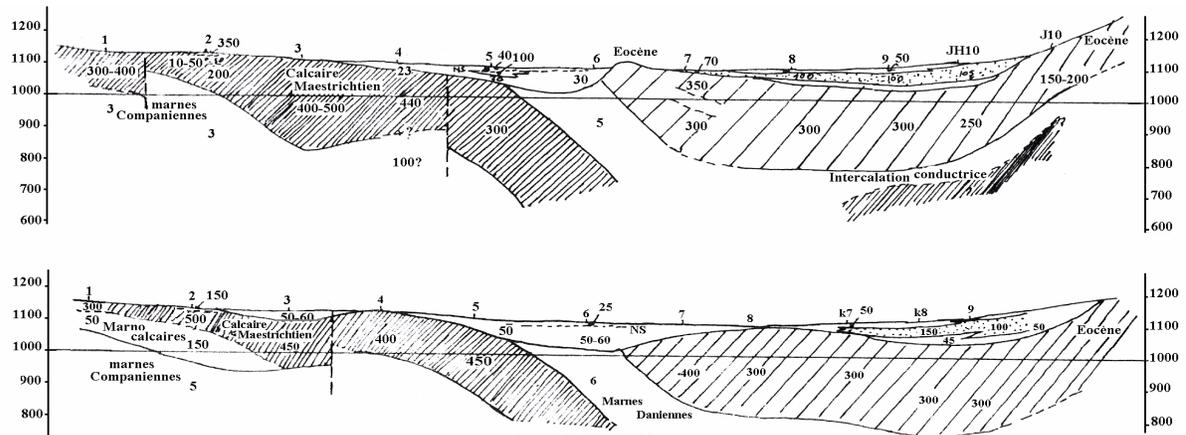


Fig. 08- Coupes géoélectriques. Profil (J et K)

Les calcaires se terminent en biseau vers l'Ouest, (profil N) et leurs épaisseurs est parfois inférieure à 100 m (fig. 09). Les marnes daniennes se trouvent réduites en épaisseur (ordre de 100 m) ce qui peut paraître très faible, d'autant plus qu'au sud (200 sur profil S et T).

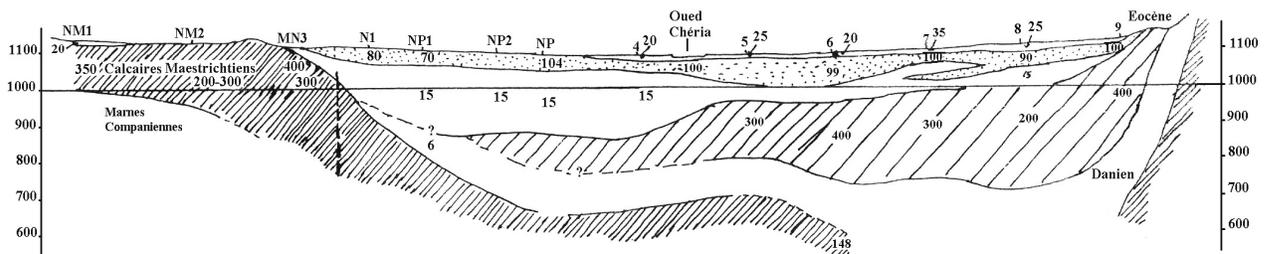


Fig. 09- Coupes géoélectriques. Profil (N)

L'interprétation de cette zone Ouest des profils N.P.Q reste donc douteuses et devra être considérée avec toutes les réserves nécessaires.

1.4.2. Recouvrement

Le remplissage continental dans la partie Nord est constitué généralement de trois niveaux.

- Un niveau superficiel dont la résistivité est en général comprise entre 20 et 40 ohm.m.

- Un niveau résistant (70 – 100 ohm.m) correspondant à des éléments grossiers (galets plus ou moins symétriques). Ce niveau est développé d'avantage le long de la bordure Est du bassin et semble provenir de destruction du massif (profils D, E, F, G et H). L'épaisseur pourrait atteindre 30 – 40 m. (fig. 10)

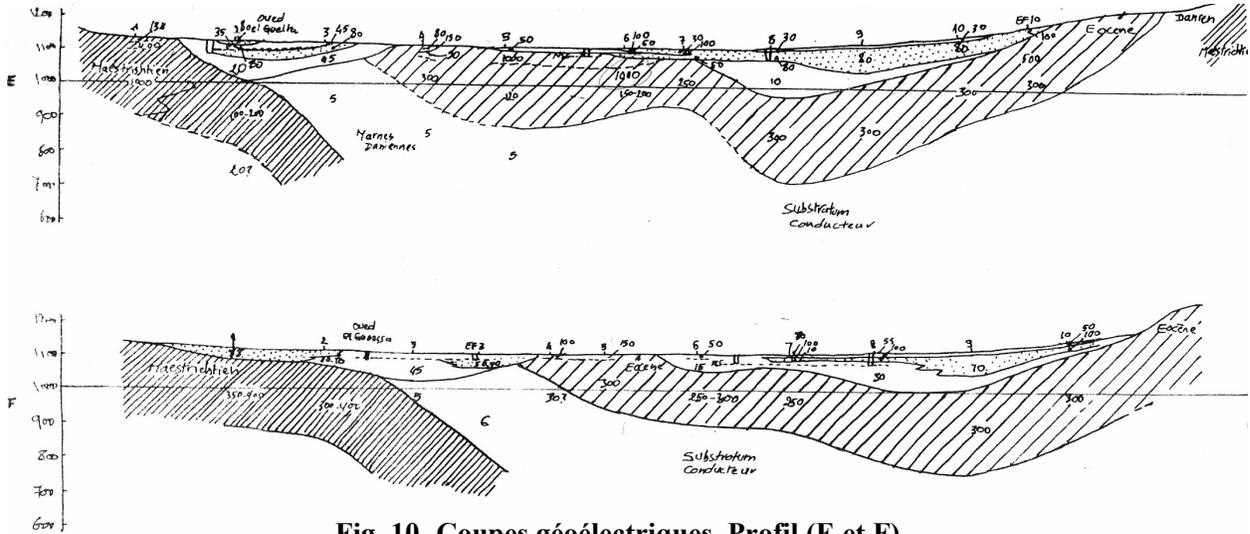


Fig. 10- Coupes géoélectriques. Profil (E et F)

- un troisième niveau plus conducteur, (10-20 ohm.m) souvent épais et constitue le remplissage principale au cœur du synclinal. Le remplissage des plaines dépasse par fois la centaine de mètre (Oued el Guelta, el Goussa à l'Ouest). En surface existe également en surface un niveau grossier. Au sondage électrique M5 le niveau résistant (150 ohm.m) peut être attribué aussi à un remplissage alluvionnaire (fig.11), qu'à des éboulis provenant des calcaires maestrichtiens.

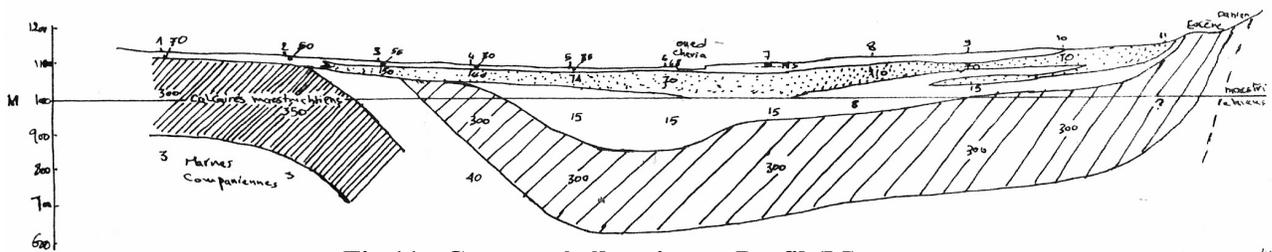


Fig.11 - Coupes géoélectriques. Profil (M)

Dans la partie Sud du bassin le remplissage Mio-Pliocène prenait de l'importance (formations argileuses). Mais on notera que souvent en profondeur, apparaît un autre niveau résistant, dont l'interprétation en terme de profondeur et épaisseur est assez délicate. Ce dernier serait particulièrement important (P3, Q3, Q7, QR7, R1, R2, R4 à R7, S1, S2, S5, S6, T3). Il se situerait en gros vers 100 m de profondeur et aurait une cinquantaine de mètre d'épaisseur. (fig.12)

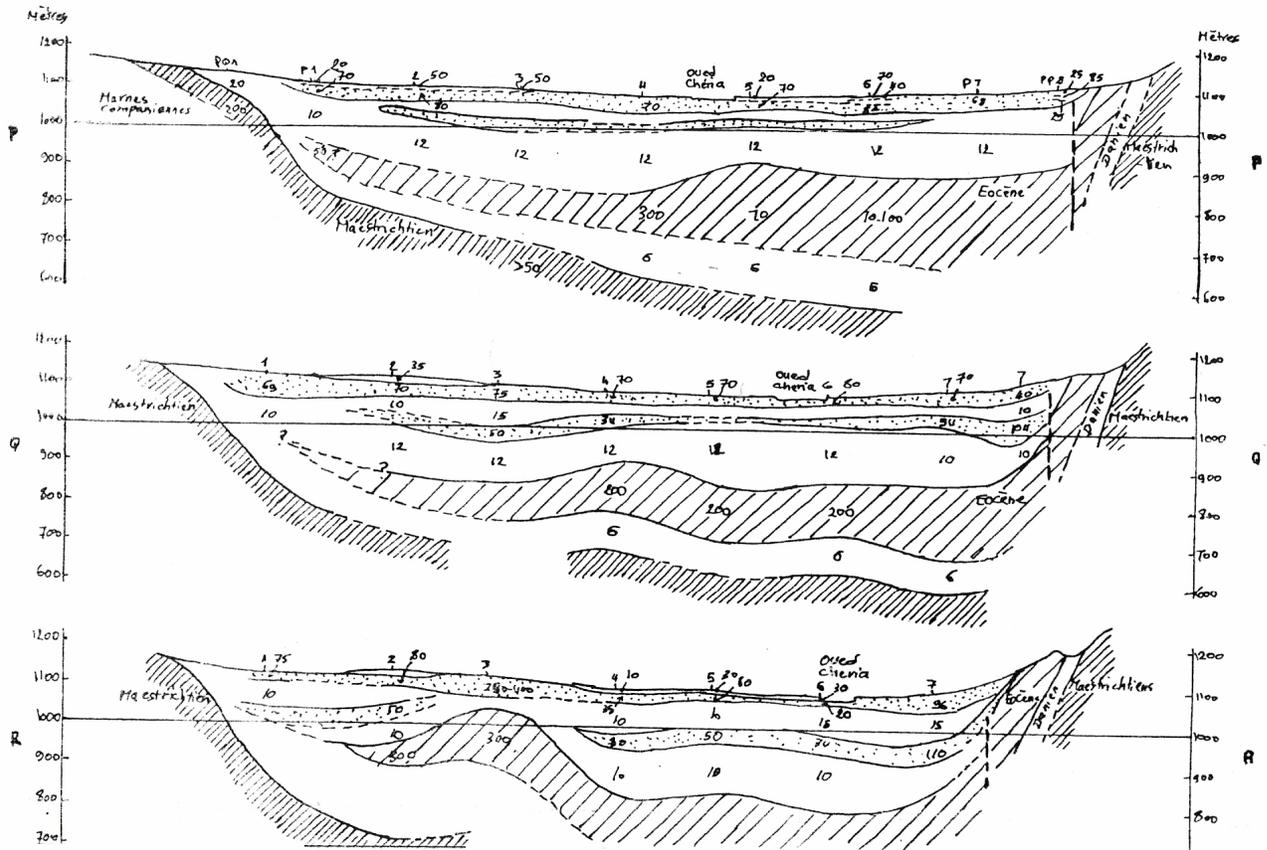


Fig. 12- Coupes géoélectriques. Profil (P,Q et R)

2. GRAVIMETRIE

La gravimétrie est une méthode géophysique qui contribue à l'amélioration des modèles géologiques ; par la précision des structures et la répartition des formations géologiques dans le sous sol.

Une étude gravimétrique mis a jour par l'Office National des Recherches Géologiques et Minières en 1990 et qui couvre particulièrement la partie Nord de Chéria (carte 205 et une partie de la 234) (A. Zerdazi, 1990).

La carte d'anomalie de Bouguer (anomalie régionale + anomalie résiduelle) élaborée pour la densité de 2,67 avec à l'échelle 1/50000.

L'analyse de cette carte du Nord au Sud a permis :

Au Nord une anomalie négative de forme ovoïde, qui se superpose géologiquement au fossé de Tébossa une allure lenticulaire et une ligne de forte gradient au sud liée probablement à une grande fracture.

Des anomalies positives plus au sud des précédentes qui semblent être une seule plage positive coupée par un système de faille orienté NE-SW. Il s'agit probablement d'une zone

de formation plus compacte et plus dense (Dj Gaaga, Dj Bourouh, Dj Es Stah et Dj Bouzaiane). La ligne de fort gradient délimitant au Sud cette zone, illustre un contact anormal.

Une anomalie fortement négative, de forme de demi-ovale, pas complètement délimité au Sud, son axe est presque Est-Ouest, elle occupe la moitié de la carte. Cette anomalie est due à une densité plus faible des sédiments quaternaires remplissant la plaine, qui peuvent atteindre une centaine de mètres.

III. ETUDE DE LA FISSURATION ET LA KARSTIFICATION

1. ETUDE QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA FRACTURATION

La connaissance de la géométrie de la roche carbonatée est d'une grande importance dans l'étude des aquifères des milieux fissurés. Celle-ci conditionne en effet les travaux des hydrogéologues praticiens.

Dans les roches carbonatées, l'écoulement est fortement conditionné par la fissuration. (KIRALY, 1972).

Certaines technique sont employées, afin de connaître la structure du réservoir emmagasinant carbonaté. Tel que la quantification et statistique directionnelle des discontinuités affectant le milieu, par reconnaissance de terrain et par photo-interprétation, des champs de fracture à l'aide des programmes statistiques. L'inventaire et mesure des microstructures et finalement le traitement statistique des donnée permettant de reconstituer les champs de contraintes.

Le manque de moyen et de documentations nécessaires (carte géologique détaillé, couverture par photo aérienne complète, absence des carrières et des études structurales antérieures) a rendu notre tache plus difficile. Pour ce la on a essayé de répondre à cette exigence primordiale par des mesures sur terrain des pendages, des directions et leurs longueurs sur les affleurements des calcaires éocènes

1.1. Etude quantitative

1.1.1 Définition des paramètres quantitatives

Les paramètres numériques peuvent exprimer l'importance de la fracturation et individualiser les familles directionnelles les une par rapport aux autres.

Les mesures de la fracturation ont été faites dans les affleurements les plus importants des calcaires éocènes dans la région (Bir Touil, Ain Troubia).

1.1.1.a. Méthodologie

Pour les deux cites d'affleurement des calcaires éocènes (fig.15), choisies on a mesuré les paramètres suivants :

- direction ;
- pendage ;
- longueur (estimée) ;
- remplissage ;

1.1.1.b Analyse et interprétation

Les données ont été traitées par représentation graphique (projection sur le logiciel STERIO) pour déterminer les différentes familles directionnelles.

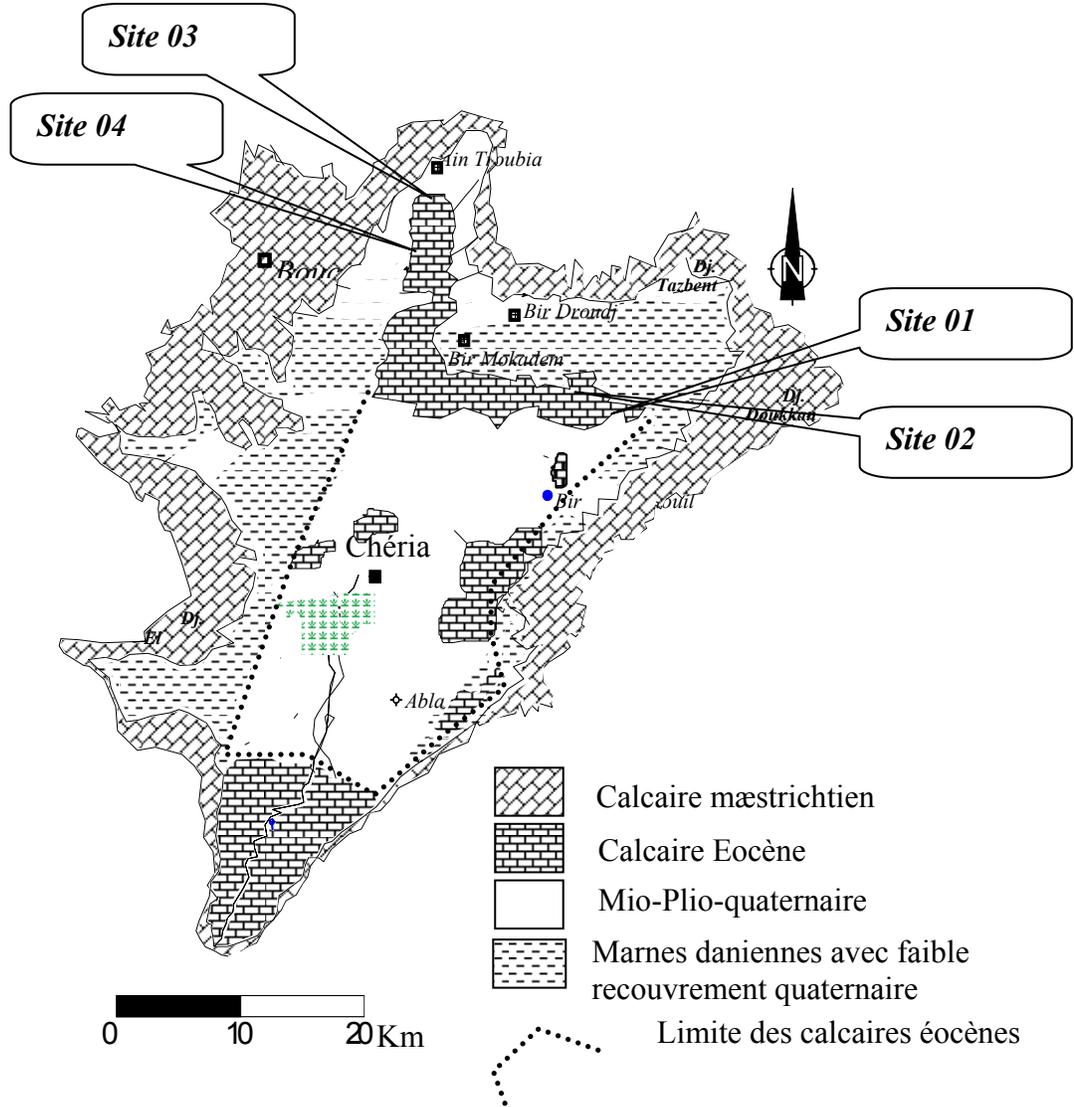


Fig. 15 - Carte de sites choisis pour l'étude de la fracturation

La représentation a été faite comme suit :

- Une représentation globale (les différents secteurs sur la même rosace).
- Une représentation sectorielle (chaque secteur a part)

Ce qui a permis les interprétations suivantes :

Deux fourchettes à direction dominantes N40-50 (Fig. 16.A) et N130-150, qui peuvent être expliqués comme suit :

La direction N130-150, (Fig. 16. B, C et D) dont les mesures effectuées aux affleurements de Bir Touil, on peut les referentier parmi celles produites à partir des mouvements tangentiels (NW-SE) de compression s'accroissent et déterminent le plissement général d'intensité moyenne. (Hmimed M. 2005)

La direction N'40-50, est représentée par la rosace D (Fig. 16.D) dont les mesures effectuées aux affleurements des calcaires de Ain Troubia ces directions ont comme origine les failles Post-Miocène, donnant naissance au fossé d'effondrement Tébessa-Morsott. Sachant que ces fractures situées à la limite Sud de ce dernier.

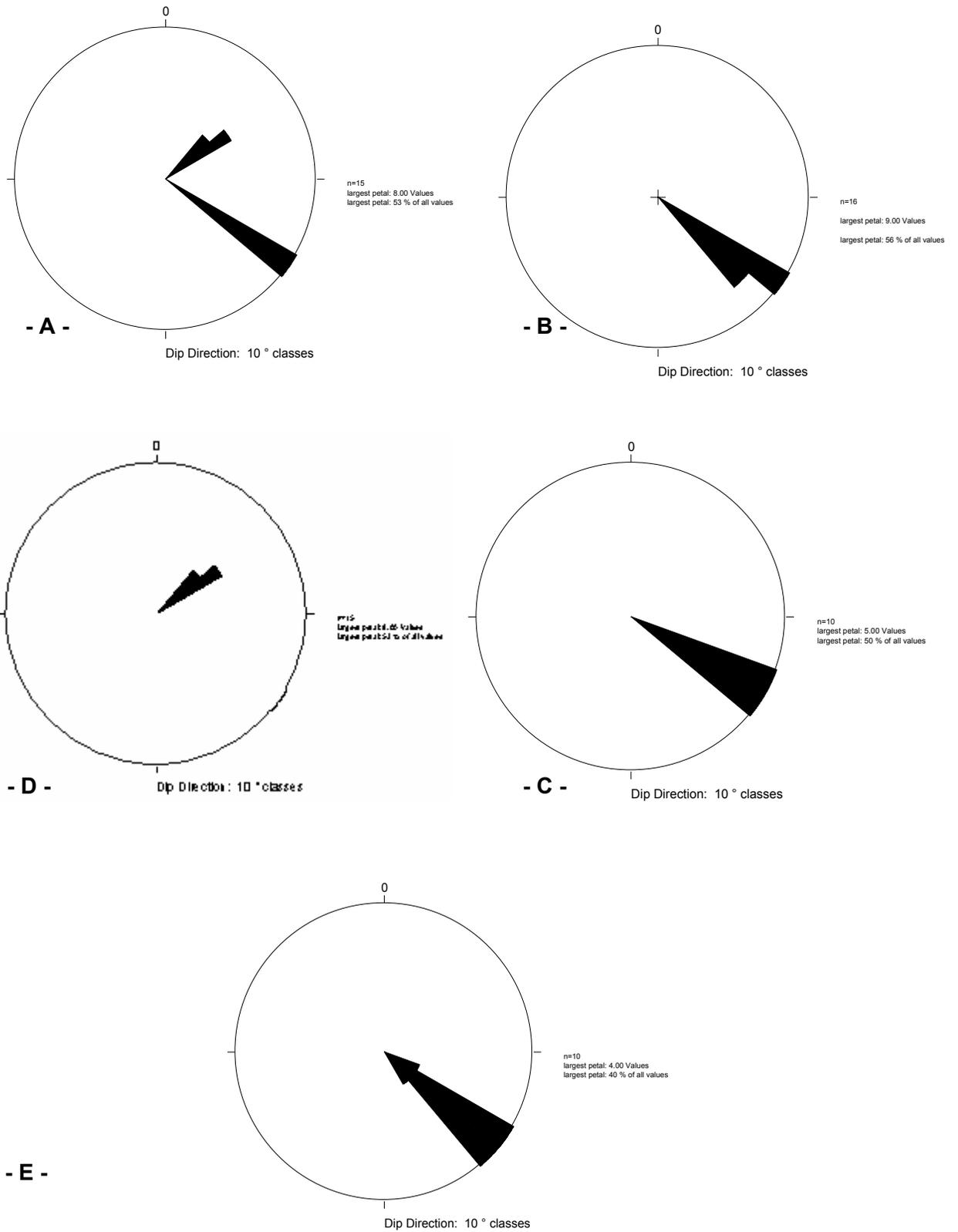


Fig. 16 – Projection stéréographique des familles directionnelles

2. ETUDE DE LA KARSTIFICATION

2.1 Introduction

Le mot karst provient du terme allemand, karst, désignant un plateau calcaire de Slovénie, le kras. Plus précisément, le karst est un ensemble de terrains à hydrographie et hydrologie particulière et marqué par des modèles spécifiques liés au fait que certains sont à la fois solubles et affectés par une porosité secondaire bien développée (Ford et Williams, 1989). Le karst se distingue par des paysages souvent étranges (parcs naturels). Ces derniers sont caractérisés par les disparitions de rivières, les grottes les arches naturelles, de grosses sources, des dépressions fermées et des roches sculptées et dont la genèse relève de la dissolution.

La karstification se produit dans toute roche soluble (calcaire, marbre, dolomies, gypse... etc).

L'importance de l'étude de karst intéresse de plus en plus de monde (spéléologues, géologues et géomorphologues, hydrologues, archéologues et préhistoriens, biologistes et écologistes, ingénieurs et aménageurs).

Depuis longtemps, l'homme a su s'adapter aux particularités des régions karstiques et en tirer le meilleur parti. D'abord il utilisa les grottes comme abri et refuge, voir comme lieu de culte et de culture, puis il sut mettre en valeur ces terrains et en tirer quelques ressources minières. Enfin de nos jours il utilise pleinement les multiples possibilités de celui-ci (construction, ressource en eau, tourisme . . . etc).

2. 2. Morphologie karstique

La morphologie karstique se distingue des autres paysages par :

- Ensemble de formes de surface (exokarst) et de formes souterraines (endokarst) intégrées les unes aux autres.
- En surface, pas de vallées, sinon démantelées et sèches, mais des dépressions fermées plus ou moins profondes et plus ou moins étendues, de 10 m à plusieurs km de diamètre.

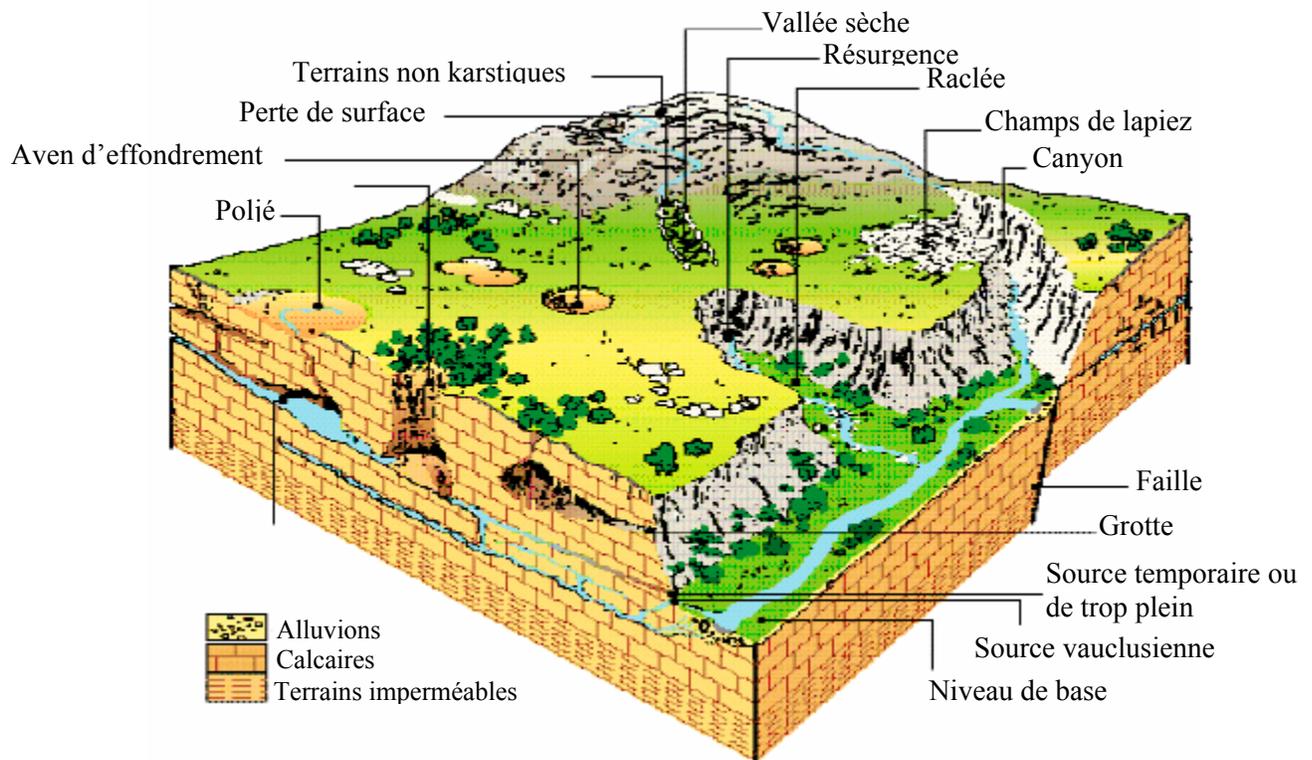


Fig. 17- Morphologie du karst d'après Michel Bakalowicz. 2002

2.3. Signes de karstification des calcaires Eocènes de la région

La plus grande surface des calcaires Eocènes de Chéria se trouve généralement couverte par des formations Quaternaires. Cela ne permet pas la visualisation du karst nettement par des lapiez, des grottes ou des grandes ouvertures. De ce fait la karstification de cette formation est restée douteuse jusqu'au début des travaux de recherche et exploitation hydrogéologique dans la ville. On résume les signes de karstification comme suit :

2.3.1 La croûte calcaire

La croûte calcaire formée au pédiment des affleurements des calcaires Eocènes, témoigne une dissolution de ces derniers par les précipitations chargées en CO_2 suivant la formule suivante :



Ce principe de dissolution peut se produire dans les profondeurs par les même pluies permettant l'élargissement des fissures et la formation des canalisations et des cavernes souterraines.

2.2.2 Les forages réalisés dans la région

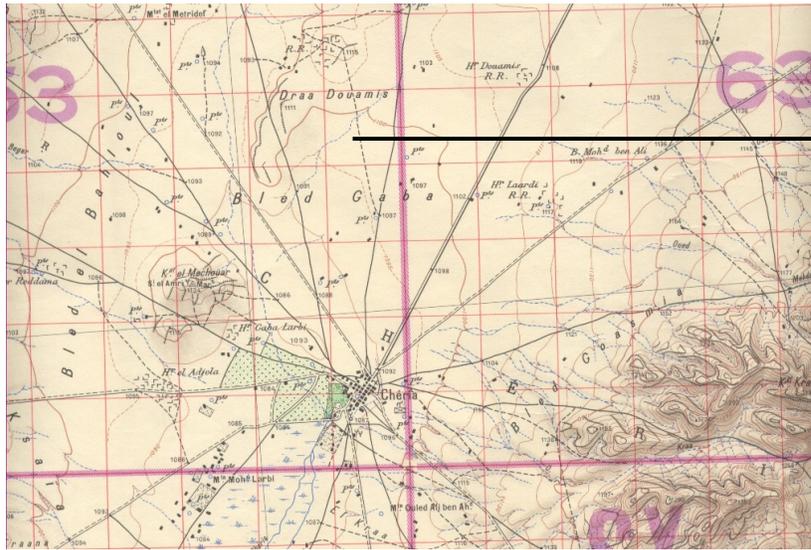
L'or de la réalisation de nombreux forages dans les calcaires Eocène et spécialement au tour de la ville de Chéria, l'objet d'une importante exploitation pour l'alimentation en eau des mines de Djebel Onk et pour l'irrigation. On a remarqué une chute de l'outil de quelques centimètres à quelques mètres et une perte totale et partielle de la boue de forage, ce qui permet de dire qu'il y a une zone de fissuration et de karstification qui peut être importante. Le tableau suivant résume les différents cas rencontrés.

N° Forage	Date Exploit	Profondeur Totale (m)	Calcaire profond du toit (m)	Epaisseur de calcaire traversé (m)	Débit L/s	Etat actuel	Profondeur des zones fissurées	Profond Des zones karstifiées (m)
508	1959	51.0	0	51	16	A sec	19,7 – 23	19,7 – 23
509	1959	14.8	2.9	11.9	Rec	-	2,9 à 3,6 12 – 13	3,6 à 4,9 12 – 13
510	1959	29.15	0	29.15	13.6	A sec	3 – 5 9,10,15,18 20-20,5	3 – 5 9,10,5,18 20 – 20,5
511	1959	34	2.6	31.4	15	A sec	2,6 – 17,2 26,5 – 29,2	2,6 – 17,6 26,5 – 29,2
512	1959	30.6	0	30.6	44.5 (110)	A sec	10,3 – 11,6 19,7 – 23,30	10,3-11,6 19,7 – 23,30
513	1961	30.0	0	30.0	0.1 (0.3)	A sec	0 – 6 9 – 18,5	
514	1961	31.95	0	31.95	2.4	A sec	2 – 8 11 - 20	/
515		12	3.5	8.5	0.2	A sec	3,5 - 12	3,5 – 12
516	1964	20,0	1,10	18,9	109.7	A sec	3 – 5,1 6,5 – 8 9 – 19,0	3 – 5,1 6,5 – 8 9 – 19,0
517	1964	20,0	1,10	18,9	111.1	A sec	5,1 – 19	5,1 – 19
518	1967	30,2	3,0	27,2	128	A sec	4,3 – 6 9,5 – 12,3 17 – 18,7 21,7 – 23,2	4,3 – 6 9,5 – 12,3
534	1976	100	0	100	70.3	A sec	44 – 100	44 – 45
Jk8	1989	100	11	89	08.14	En arrêt	27- 100	15 – 27

Tab N° 1. Caractéristiques des forages captant les calcaires Eocènes d'après Gaud. DHW-Tébessa 1978

2.2.3 Les affaissements de Draa Douamis

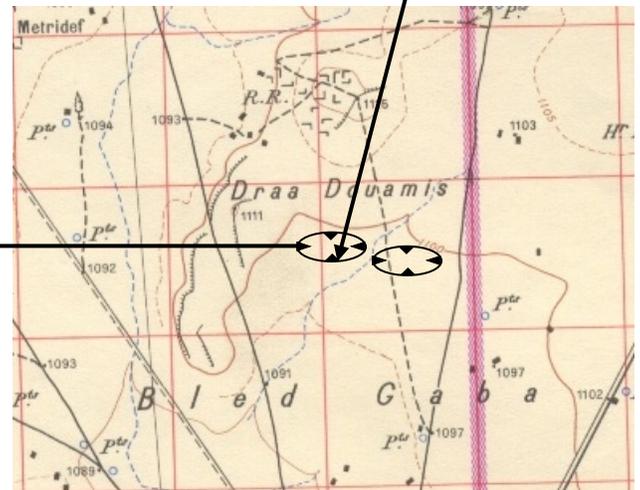
En 2001 la région de Chéria dans le lieu dit Draa Douamis, a connu l'apparition de deux grands affaissements, dues d'après une première interprétation, à la surexploitation par pompages et l'abaissement rapide du toit de la nappe karstique qui a provoquer par la suite une diminution de la pression interne (hydrostatique) et qui a entraîné les deux effondrements à quelques kilomètres au Nord de la ville de Chéria (de 15 à 20 m de diamètre). (Fig. 18)



Extrait de la carte Topographique de CHERIA. 1/50 000



Photographie récente du phénomène.



Position des affaissements sur l'extrait de la carte



Photo de l'intérieur de l'affaissement

Fig. 18- Situation et photographies des affaissements
(Baali, 2006)

3. Conclusion

Les études géologiques et géophysiques évoquées dans ce chapitre ont confirmé la succession des formations suivantes dans le synclinal de Chéria : les marnes d'âge Campanien, les calcaire du Maestrichtien, les marnes du Danien et les calcaires Eocènes recouvrent par les alluvions et le sable du Moi-Plio-Quaternaire.

Une analyse sur terrain des directions des fissures et sa représentation sur les stéréogrammes par le logiciel « stério » a montré deux directions dominantes une 40 – 50° dans la région de Ain Troubia et la seconde de 130 - 140° N dans les affleurements de Bir Touil.

L'étude de la fissuration et la karstification à permit de localiser la fissuration dans les cent premiers mètres et la karstification dans les cinquante premiers dans la partie centrale de la région et en allant jusqu'à l'exutoire.

Chapitre II

HYDROCLIMATOLOGIE & HYDROLOGIE

CLIMATOLOGIE

1. INTRODUCTION

Les conditions climatiques jouent un rôle déterminant dans le régime d'écoulement superficiel et souterrain. Elle permet d'approcher les termes de bilan qui sont les précipitations et l'évapotranspiration.

L'équipement climatologique du bassin est cependant loin d'être satisfaisant. Le manque de documentation est flagrant, les longues séries d'observation sont rares. Toutes fois nous allons tenter de faire ressortir les caractéristiques générales du climat, ses nuances spatiales et ses irrégularités temporelles à partir de la documentation disponible

II. Détermination du type du climat :(Indice De Martonne)

Pour la détermination du type de climat De Martonne (1925) a proposé une formule climatologique appelée indice d'aridité qui est fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations moyennes annuelles :

$$A = P / T + 10$$

Avec :

- **A** : indice d'aridité annuelle
- **P** : précipitations moyennes annuelles en mm.
- **T** : températures moyennes annuelles en mm.

Dans le cas de notre région $A = 11.11$ tel que $P = 263.35$ et $T = 13.57$

Selon De Martonne :

- $A < 5$: le climat est hyper aride.
- $5 < A < 10$: le climat est très sec.
- $10 < A < 20$: le climat est sec.
- $20 < A < 30$: le climat est tempère.
- $A > 30$: le climat est humide (écoulement abondant).

Les résultats de l'indice d'aridité trouvés pour la station de Chéria la plus importante, dans la zone d'étude, montrent que le climat est sec caractérisé par deux saisons l'une humide et froide et l'autre sèche et chaude

II. ETUDE DE LA PLUVIOMETRIE

En effet, les précipitations qui sont de loin les plus importantes agissent directement dans l'alimentation pluviale des aquifères du bassin versant de Chéria.

La plupart des stations pluviométriques du bassin sont installées après 1973, 1974, même ceux qui ont été installées avant ont eu des problèmes de prélèvement jusqu'à l'installation du réseau D.R.M.H (Direction des ressources minières et hydriques). Nous avons réuni dans le tableau 1 les différentes stations du bassin versant et leurs principales caractéristiques (tab.1). Leurs distributions géographiques sont représentées dans la figure 1.

Station pluviométrique	Code	X	Y	Z	Période d'enregistrement
Chéria	06.23.01	959.20	231.10	1087	1946 – 2003
Bir Mokadem	06.23.03	946.30	242.60	1156	1972 - 2003
Bir Touil	06.23.05	968.55	234.05	1163	1972 - 2003
Ain Troubia	06.23.07	963.25	250.91	1252	1972 - 2003
Ain Babouche	06.23.08	954.10	241.80	1175	1974 - 2003
Fedj Krima	06.23.11	964.05	224.30	1155	1972 - 2000
Ouled M'hamed	06.28.04	980.85	235/00	1335	1973 - 1990
Ouled Dhiab	06.23.04	957.20	221.00	1076	1972 - 1990
Bir Bouchguifa	06.23.06	952.60	246.00	1160	1972 - 2000

Tab. 2 - représentation des stations pluviométriques et leurs caractéristiques

Parmi les stations existantes dans le bassin versant, nous avons sélectionné cinq stations dont la période d'observation est assez importante, homogène et qui présente peu de discontinuités. La critique des données pluviométriques permet une étude relativement fiable. Pour ce faire les statistiques et les graphiques sont les moyens les plus sur et plus efficaces pour détecter les anomalies.

II. 1 - Homogénéisation des données

Le but de l'homogénéisation des données est de préparer un échantillon de pluies moyenne, afin de dégager les caractéristiques climatiques de la région ainsi que l'établissement des régressions hydropluviométriques en vu du calcul du bilan hydrologique du bassin. Par ailleurs on a pris une série de trente ans de 1973 au 2003 pour éviter le problème du choix de la période. On a procédé pour cet objectif à la méthode de comparaison des totaux cumulés.

La méthode consiste à comparer les stations pluviométriques prises deux par deux. La station de référence doit avoir une longue période d'observation et une série homogène c'est-à-dire quelle ne présente pas de lacunes et que son fonctionnement est continu (la station de Chéria), l'application de cette dernière suppose une liaison positive significative entre deux stations de la même région, d'autre part l'ajustement des séries de totaux pluviométriques annuels doit présenter une distribution statistique normale (Ghachi. A, 1986).

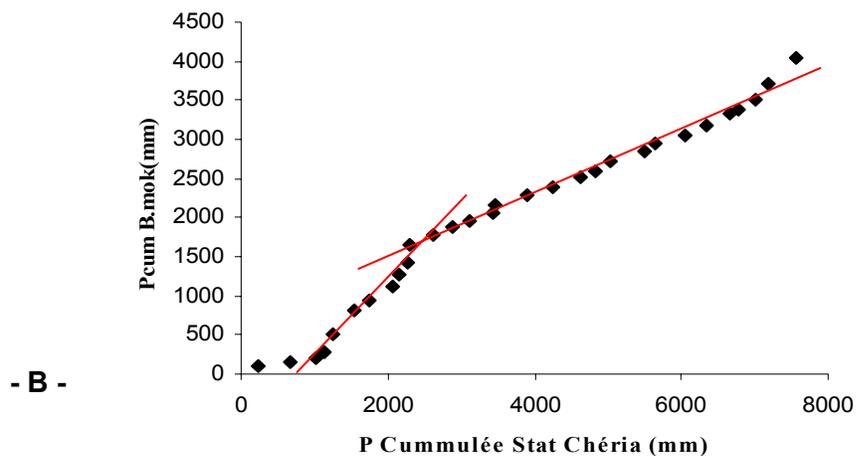
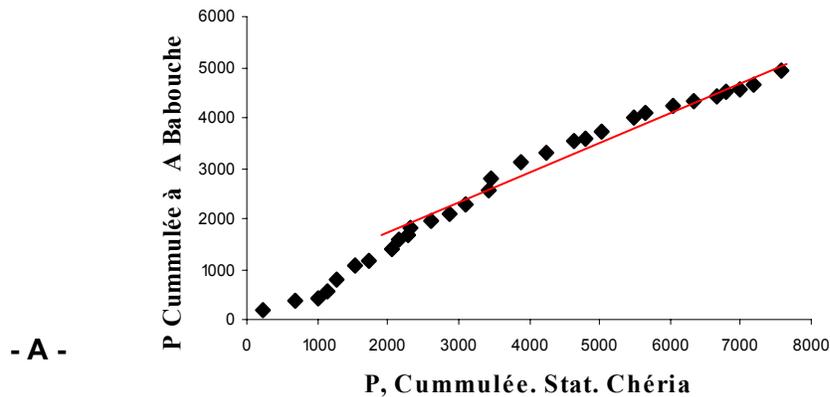
La représentation graphique des totaux annuels cumulés de la station de base en abscisse et en ordonnée les totaux annuels cumulés de la station à vérifier. Si les séries sont homogènes, les points forment une ligne droite, d'une pente constante et qui représente le rapport des moyennes interannuelles des précipitations de la station à

vérifier et la station de base. Dans le cas de cassure la courbe formant deux droites, due à des données erronées de l'une des stations, dans ce cas les séries ne sont pas homogènes. C'est notre cas, ceci est dû probablement à plusieurs critères tel que :

- modification partielle de l'appareillage ou de modification progressive son environnement.
- un changement d'observateur, ou déplacement du pluviomètre.

Dans ces conditions on procède à la correction par la méthode de double masse, qui permet de tester l'homogénéité des séries de données et de corriger les erreurs. La correction procède à multiplier tous les totaux annuelles des années antérieurs ou postérieurs par le rapport m/m' (le rapport des deux segments de droite de part et d'autre de la cassure).

Homogénéisation des données de précipitation de la station de Chéria avec les autres stations (figure 19A, B et C), ce qui nous a permis de remarquer que les données la station de Ain Babouche sont homogènes avec celles de la station de Chéria, tan disque les stations de Bir Mokka dem et Ain Troubia sont a corrigées par la méthode susité (en multipliant par la pente du deuxième segment de la droite de la figure, figure 19B et 19C)



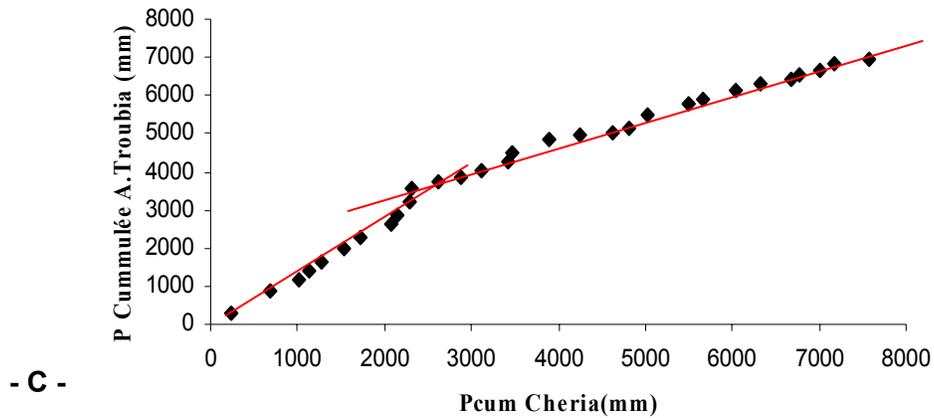


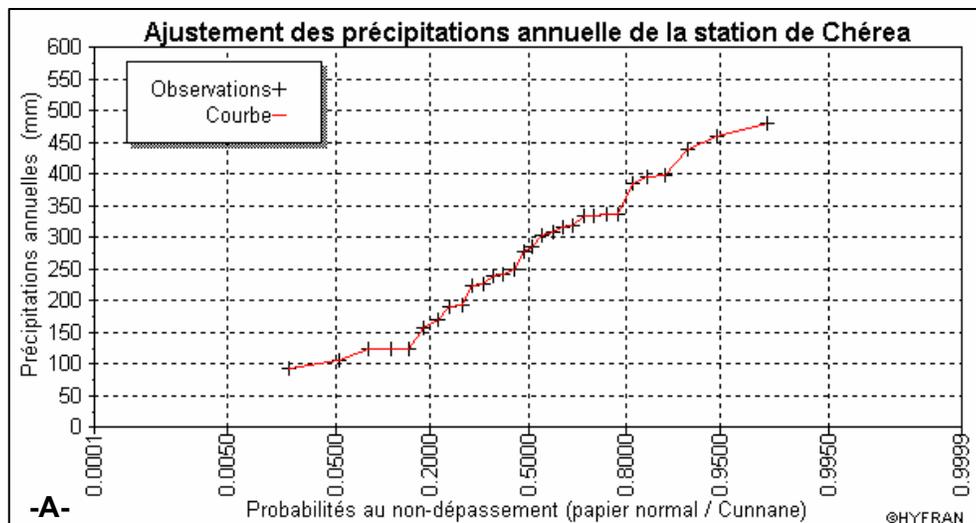
Fig. 19 - Homogénéisation des données pluviométriques des stations avec la station de Chérie

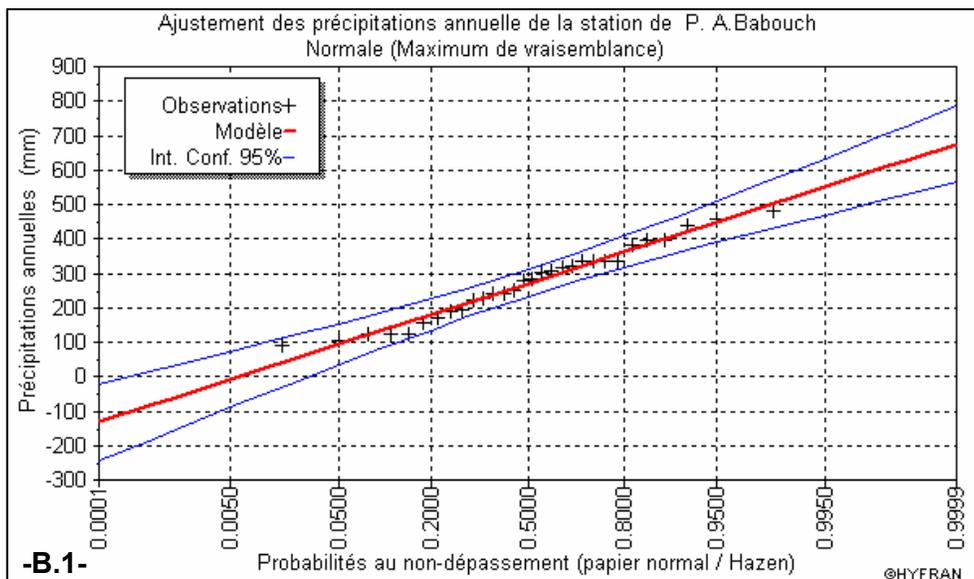
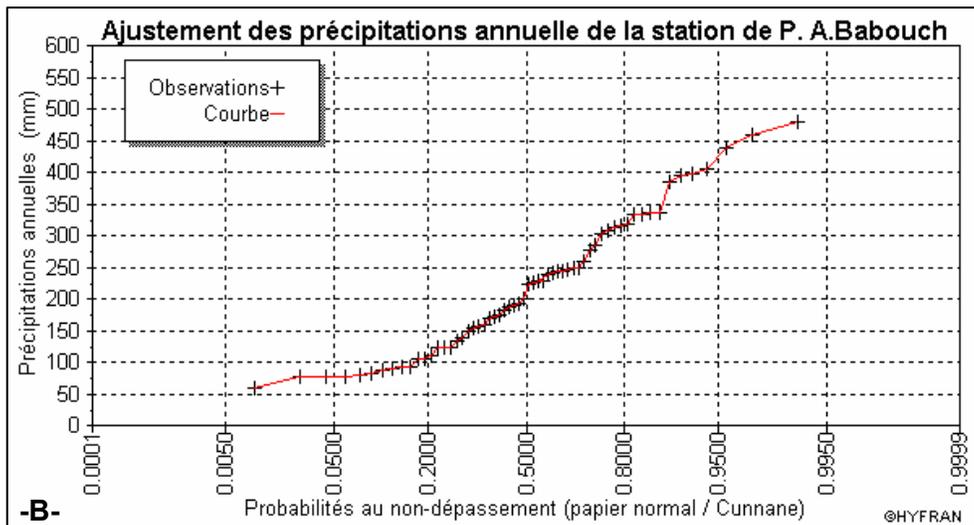
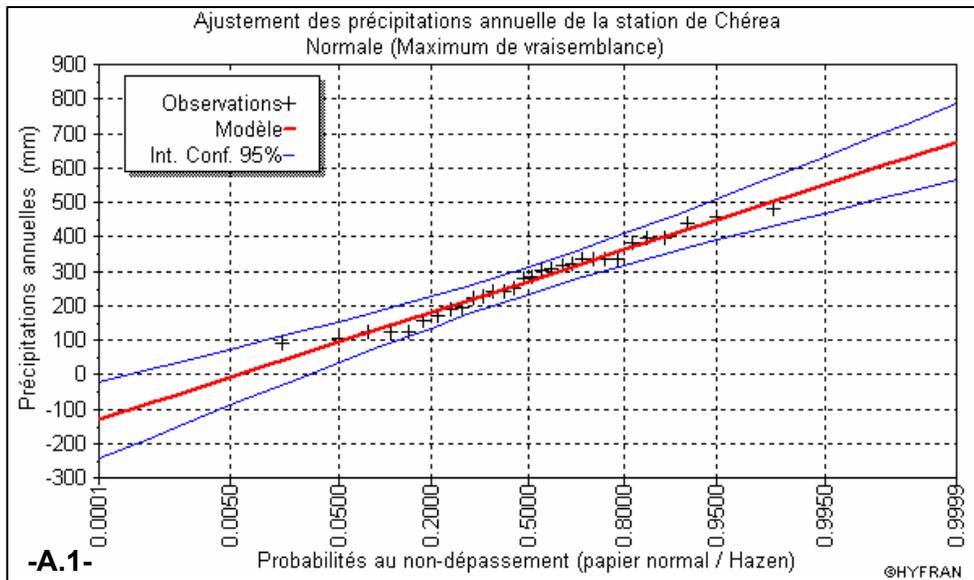
II. 2- Analyse statistique des précipitations

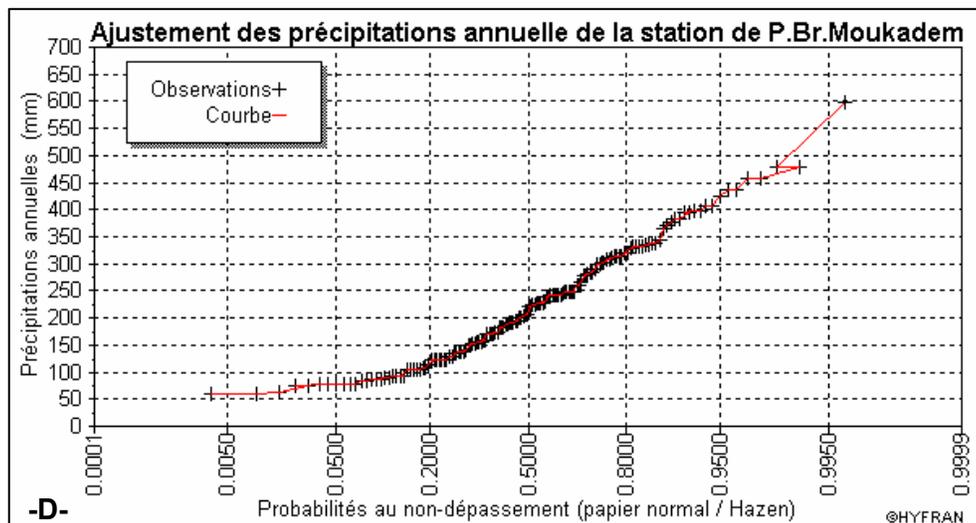
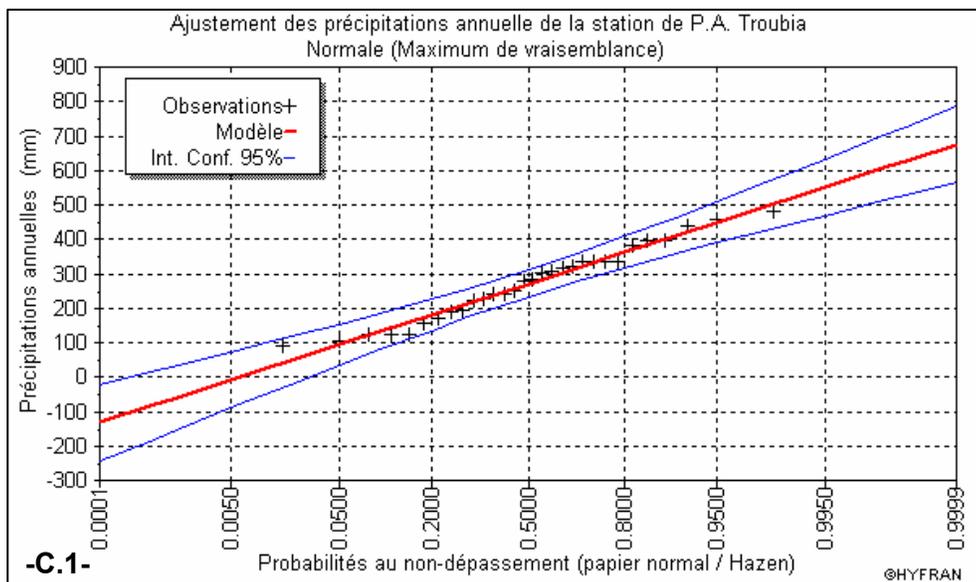
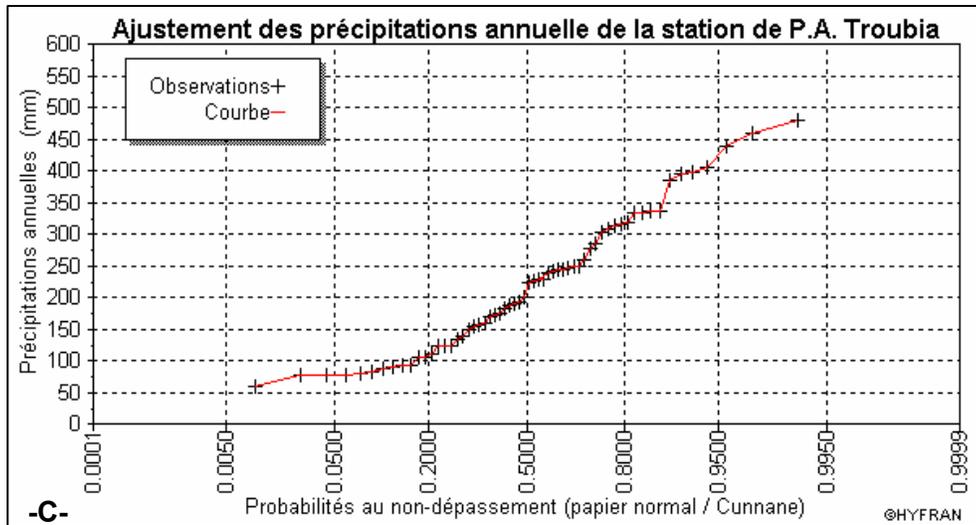
Cette analyse fait l'objet d'une étude fréquentielle des précipitations moyennes annuelles, déterminées aux principales stations pluviométriques citées ci-dessus, qui fournissent une bonne représentativité.

En ce qui concerne les lois d'ajustement statistique, la meilleure démarche est de tester plusieurs lois et de retenir celle présentant les meilleurs ajustements graphiques et statistiques. En effet, pour chaque année de la période d'étude, on retient la moyenne annuelle des précipitations observée dans chaque station du bassin versant pour une longue période d'enregistrement. L'analyse statistique détermine la loi qui ajuste le mieux cette série des précipitations.

Cette analyse statistique a été effectuée à l'aide d'un programme informatique d'analyse des fréquences hydrologiques **HYFRAN** ou HFA (**H**ydrological **F**requency **A**nalysis) qui a été développé à l'INRS-Eau, Terre et Environnement ; par l'équipe de la Chaire en hydrologie statistique (HYDRO-QUÉBEC). Il s'agit d'un logiciel d'ajustement de lois statistiques permettant l'analyse fréquentielle de séries de données des événements extrêmes (Bobée et Ashkar, 1991).







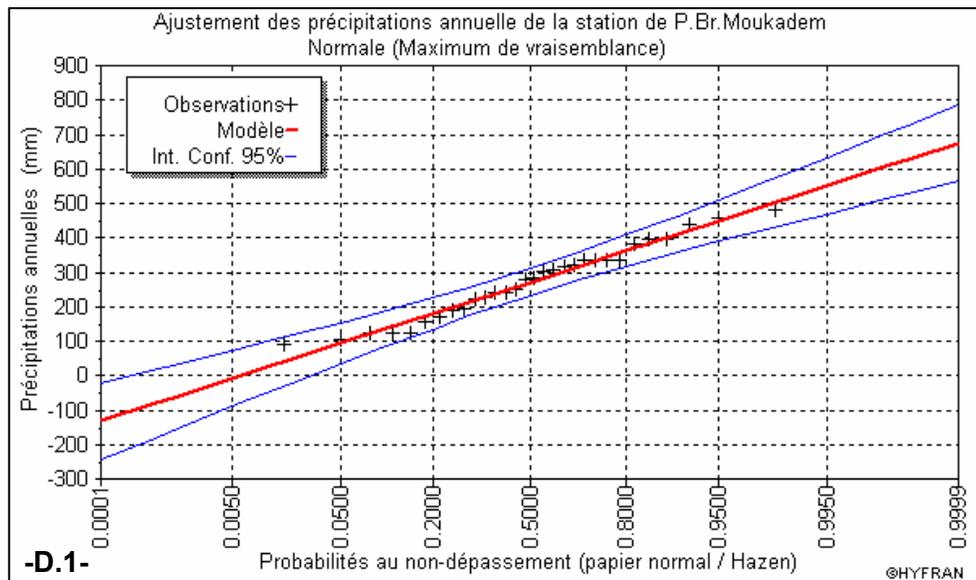


Fig- 20- Résultats des ajustements statistiques des données des précipitations

II .2 .2- Résultats des ajustements statistiques

Les séries des précipitations moyennes annuelles ont été employées pour l'analyse des pluies par ajustement à des lois statistiques. La lois normale (maximum de vraisemblance) étaient réellement représentatives des échantillons, avec un intervalle de confiance 95% pour chaque station étudiée (fig. A.1, B.1, C.1, et D.1).

II. 3 - LA LAME D'EAU MOYENNE PRECIPITE SUR LE BASSIN

La lame d'eau moyenne est définie comme la quantité de pluie moyenne tombée sur une surface pour une période définie. Elle peut être calculée par 3 méthodes :

II. 3. 1. La moyenne arithmétique :

La moyenne la plus simple et facile à calculer. Elle consiste à calculer la moyenne arithmétique des pluies observées à chaque station. Pour la période étudiée nous obtenons une moyenne annuelle de la lame d'eau à l'échelle du bassin de 189.41mm/an. Le mieux d'appliquer l'expression suivante : $Er = \frac{Cv}{\sqrt{N}}$

Où

Er, est l'erreur en pourcentage,

N, le nombre de station sur le bassin,

$$Cv = \frac{100\sigma}{\bar{x}}$$

Cv, le coefficient de variation,

Avec σ : l'écart type sur les valeurs des précipitations,

\bar{x} : La moyenne des précipitations annuelles

II. 3. 2. Méthode de Thiessen :

On attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à une zone d'influence présumée. La méthode ne tien donc compte que de la distribution spatiale en plan des stations (M.Roche1963). Les calculs ont donné 194 mm/an. On appliquant la formule suivante :

$$P = \frac{\sum p_i s_i}{S} = \frac{V}{S}$$

Avec

V : volume total tombé sur le bassin en mm ;

S : surface totale du bassin en Km²;

p_i : précipitations moyennes annuelles de la station à l'intérieur de polygone ;

s_i : surface de polygone considéré ;

Stations	Précipitations P _i en (mm)	Surface S _i en (Km ²)	P _i *S _i
Chéria	267.04	226.47	60476.55
Bir Mokadem	105.2	151.88	15977.77
Ain Troubia	240.37	83.07	19967.54
Bir Touil	167.4	152.25	25486.65
Ain Babouche	167.04	108.86	18183.97
Tab. 03- Estimation de la lame d'eau (méthode de <i>Theissen</i>)			121151,4851

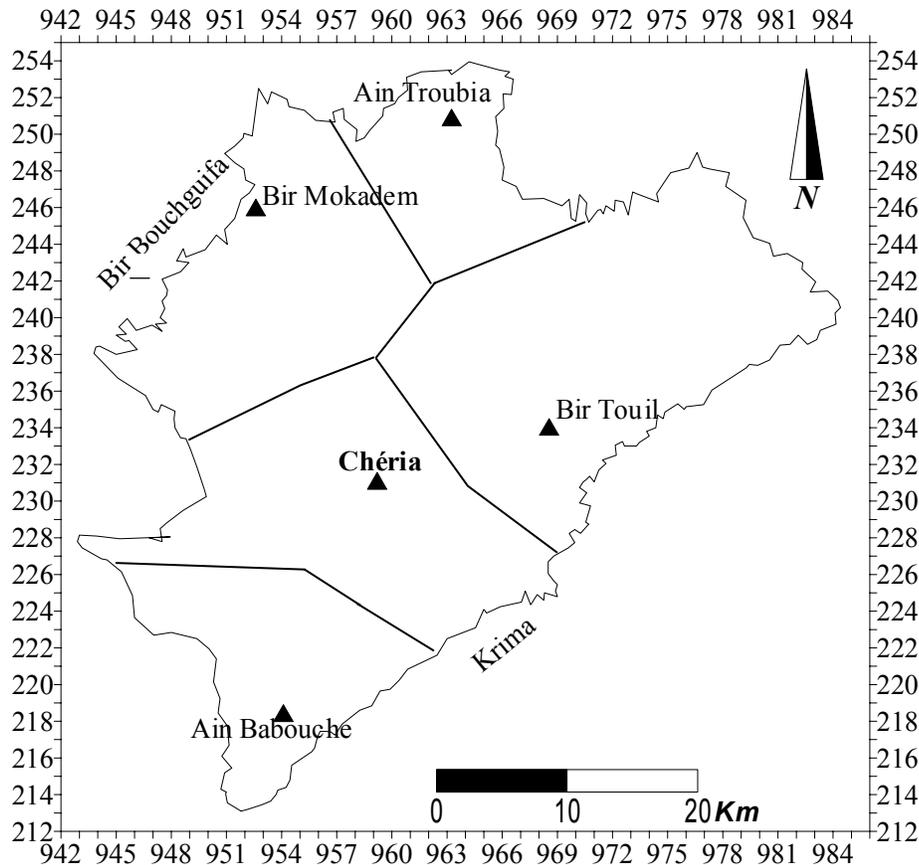


Fig. 21 – polygones de Theisen, région de Chéria

II. 3. 3. Méthode en courbes isohyètes

Une courbe isohyète est le lieu géométrique des points sur lesquels il est tombé la même hauteur de pluie pendant une période déterminée. Le tracé des différentes courbes isohyètes représentant la répartition spatiale de la pluie pendant la période d'étude.

La formule appliquée est toujours la même sauf que pour :

- p_i : précipitation moyenne annuelle entre deux courbes isohyètes ;
- s_i : la surface entre les deux courbes isohyètes ;

Vu l'arrêt de plusieurs stations de mesure après l'année 2000 (tab. 02), le nombre de cinq stations est insuffisant pour établir une carte en courbe isohyète, donc on garde la valeur de 213.29 calculé en 2001 (Baali, 2001).

II. 3. 4 - Discussion des méthodes :

Les résultats de calcul des trois méthodes de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin de Chéria, ont donné des valeurs rapprochées

La comparaison de ces résultats avec la moyenne calculée par Lambert et Durozy (330 mm) pour la période entre 1909 et 1949, a permis de constater une chute de la moyenne des précipitations de l'ordre de 44%.

3. LES VARIATIONS TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS

3.3 Variations interannuelles des précipitations

Pour l'étude des précipitations on a pris la période entre 1974 et 2003 pour les stations : Chéria, Bir Mokadem, Bir Touil et Ain Babouche comme référence car c'est la série la plus complète.

Le plus important à remarquer sur les figures (22 à 22c) est :

- Que la région a sévié une période de deux décennies depuis les années 80 jusqu'à 2000 une sécheresse marquée par des précipitations généralement au-dessous des moyennes annuelles sauf pour quelques années au niveau de la station de Chéria.
- Une pluviométrie très basse est constamment signalée à la station de Bir Mokadem par rapport aux autres stations. L'explication réside probablement dans le fait que cette région abritée des vents humides du Nord Ouest par le Djebel Troubia et ce qui le prolonge. En général il y a donc diminution de la hauteur pluviométrique entre les Djebels de bordures et la région de Bir Mokadem (B Gaud, 1978).
- L'année 1990 est année exceptionnelle (fortes Précipitations) pour les stations Chéria et Ain Babouche (plus de 400 mm/an), par contre pour Bir Touil c'est l'année 1975 avec 600 mm/an qui vraiment une exception pour

toute la région. La station de Bir Mokadem a enregistré environ de 350 mm/an pour l'an 2003.

- Les précipitations les plus faibles au-dessous de 100 mm/an sont enregistrées en 2000 pour les stations Chéria et Ain Babouche, 1992 pour Ain Troubia et 1976 pour la station de Bir Mokadem.

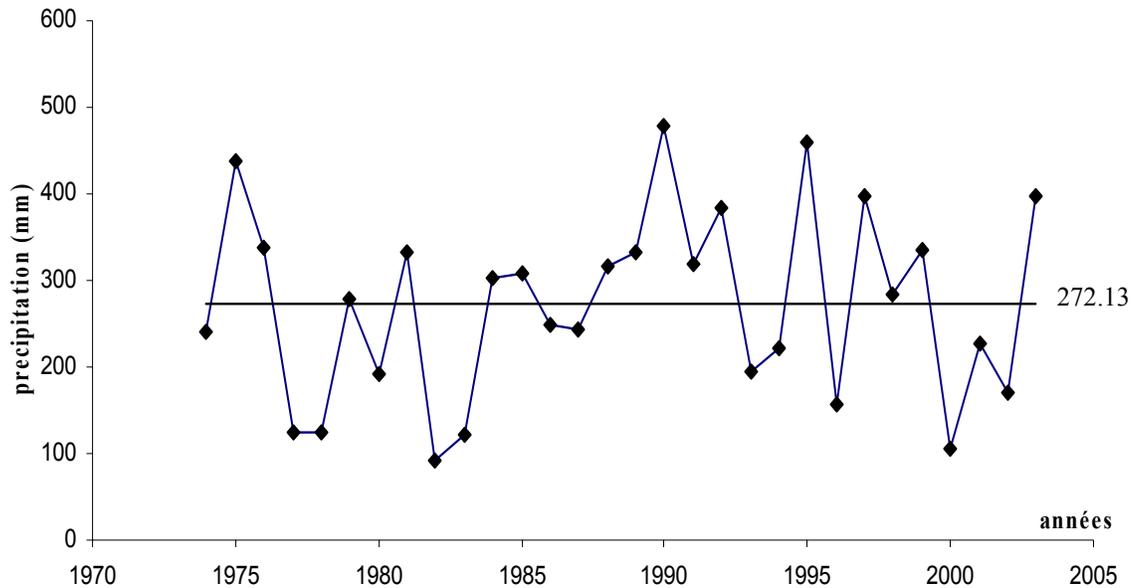


Fig. 22- Variations interannuelles des précipitations de la station de Chéria (1974-2003)

3.2. Variation moyenne mensuelle des précipitations (1974 – 2003)

Le mois de juillet est le mois le moins arrosé pour toutes les stations étudiées avec des précipitations variant entre 2 et 11 mm. Le mois de mai est le plus pluvieux pour les stations Chéria, Ain Babouche et Ain Troubia (32.6, 21 et 26 m), le mois de septembre ou les

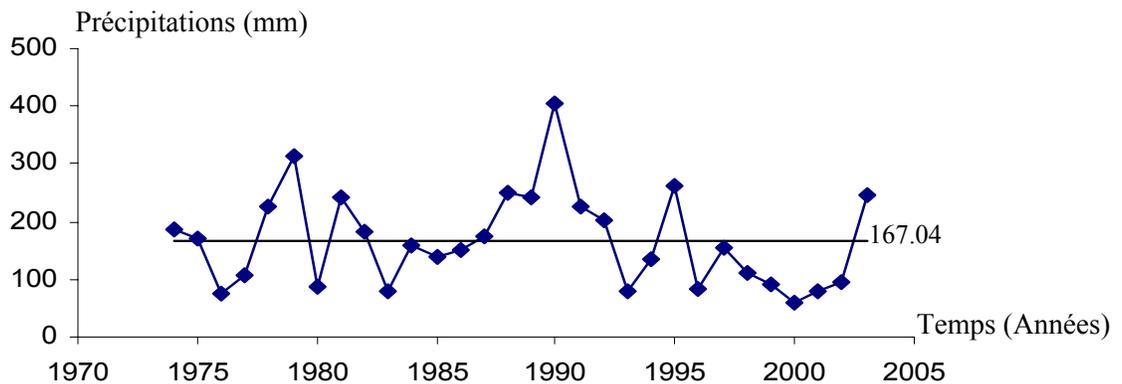


Fig. 22. a- Variations interannuelles des précipitations de la station de A. Babouche (1974-2003)

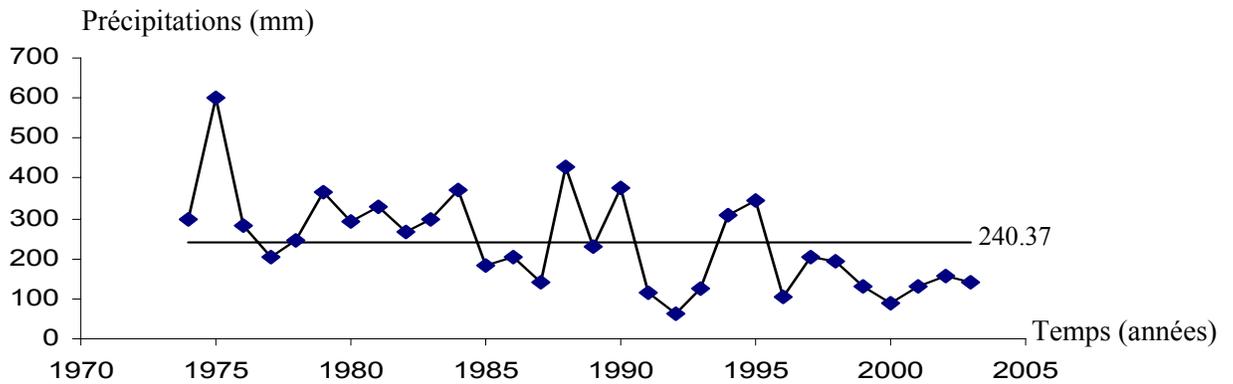


Fig. 22. b- Variations interannuelles des précipitations de la station de A. Troubia (1974-2003)

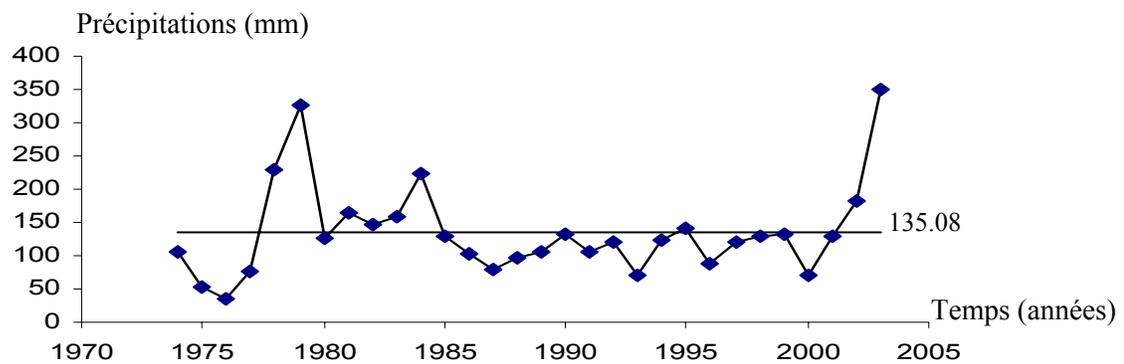


Fig. 22. c- Variations interannuelles des précipitations de la station De B. Mokkadem (1974-2003)

mois de septembre, octobre ou Novembre encadrant la saison sèche peuvent être le siège de très violents orages donnant des quantités importantes d'eau.

En période de basse eau on peut passer d'une pluviométrie quasiment nulle (juin 75) à une pluviométrie très élevée due à des orages très violents (juin 1996). Phénomène très récurrent dans la région.

4- Variation des températures

Malheureusement ce qui affaiblit l'étude climatique de la région est l'absence d'une station de mesure des températures, ceci nous a obligé d'utiliser les données de la station la plus proche qui est celle de Tébesa (X : 991,900 Y : 247,200 Z : 810) avec la correction des températures en fonction de l'altitude (Alain Godard et Martin Tabeud 2004).

La figure 24 représente la variation des températures moyennes mensuelles (1974 – 2003), dont le mois le plus chaud est le mois de Juillet (23,84°C) et le mois le plus froid est le mois de Janvier (4,7°C).

4. Le Digramme Pluviothermique (Gausсен et Bagnoulis)

Ce diagramme est le mieux placé pour visualiser les mois humides et les mois secs. Le mois le plus sec est celui où le total moyen des précipitations est inférieur ou égal au double de la température moyenne ($P \leq 2T$).

Les diagrammes dressés pour les stations d'étude (fig. 25) pour la période de 1975 à 2003 généralement révèlent :

La période humide s'étale sur cinq mois de novembre jusqu'au mois de mars pour les stations de Chéria, et Ain Troubia, par contre la période sèche caractérise le reste des mois de l'année hydrologique.

Pour la station de B. MokkaDEM seul le mois de janvier qui est humide

Les mois de janvier, février et mars représentent la période humide pour la station de A. babouche

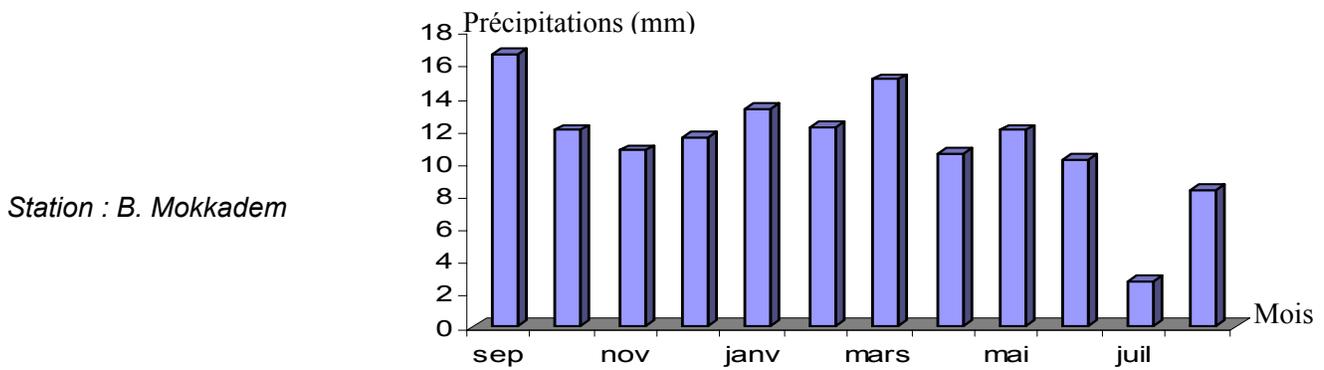
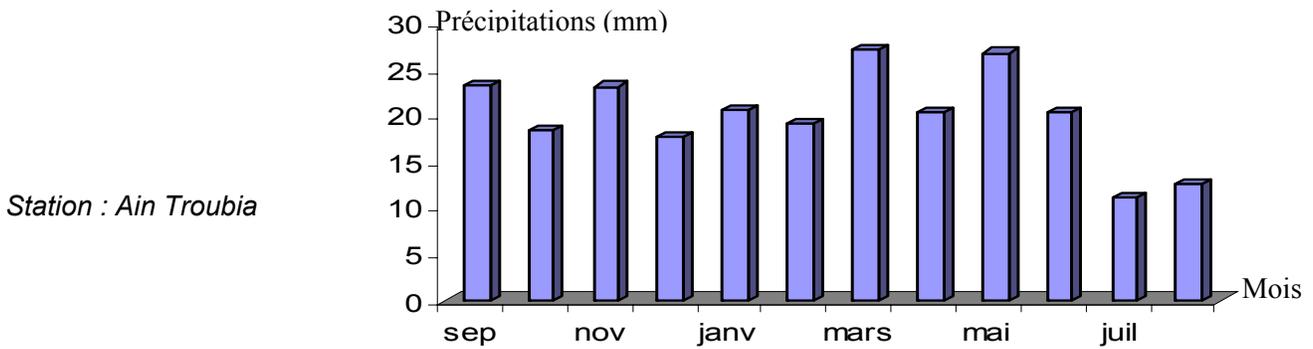
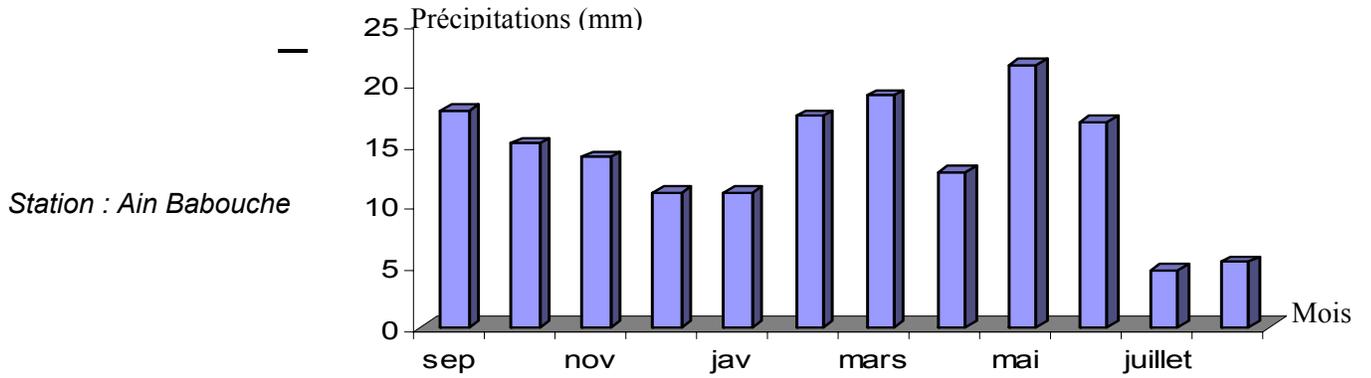
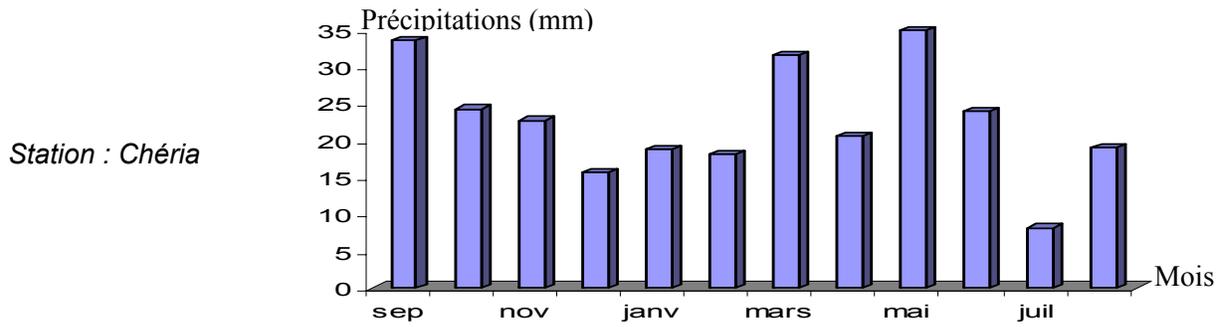


Fig. 23- Variation moyenne mensuelle des précipitations aux stations d'observation. Période 1974 - 2003

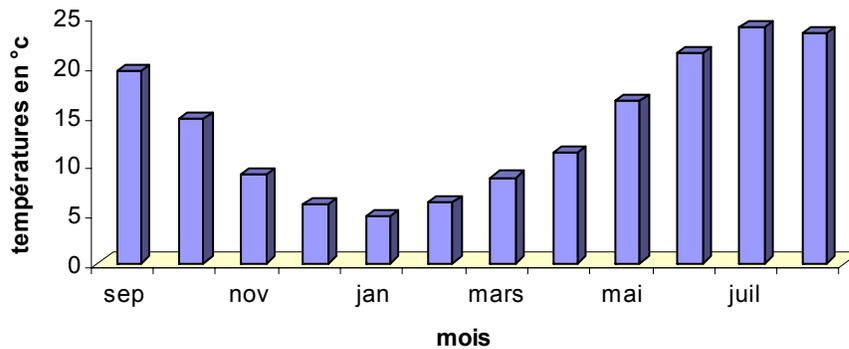


Fig. 23.1 – Variation des températures moyennes mensuelles (1974-2003). Station : Tébessa

6. EVAPOTRANSPIRATION

Les échanges d'eau entre la plante et l'atmosphère conditionnaient par une grande part la croissance du tissu végétal, ce qui était conclu au cours des travaux du botaniste et climatologue Américain Thornthwaite sur la croissance des végétaux. (Brochet, Gerbier 1975)

L'évapotranspiration correspond à la somme de la quantité d'eau évaporée par suite d'un déficit hydrométrique de l'air et de la quantité d'eau transpirée par la végétation. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour le calcul de cette paramètre.

6.1. Méthode de Coutagne

Les caractéristiques climatiques de la région d'étude ne répondent pas aux conditions d'application de cette méthode (in Baali 2000).

6.2. Méthode de Turc

En tenant compte de la température et de la durée réelle de l'insolation, cette méthode permet de calculer l'évapotranspiration moyenne mensuelle, comme suit :

$$ETP \text{ (mm)} = 0.40.T/T+15(Ig+50) ;$$

T : température de l'air ;

Ig : radiation solaire globale moyenne du mois (calories/cm²) ;

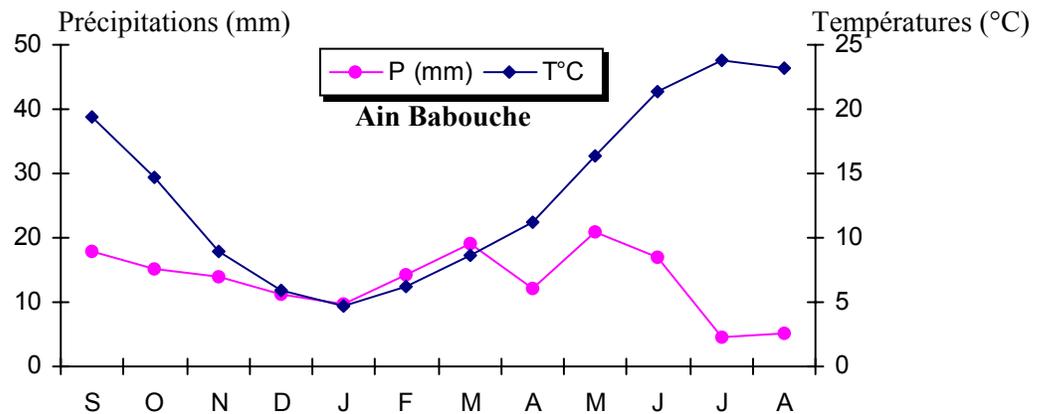
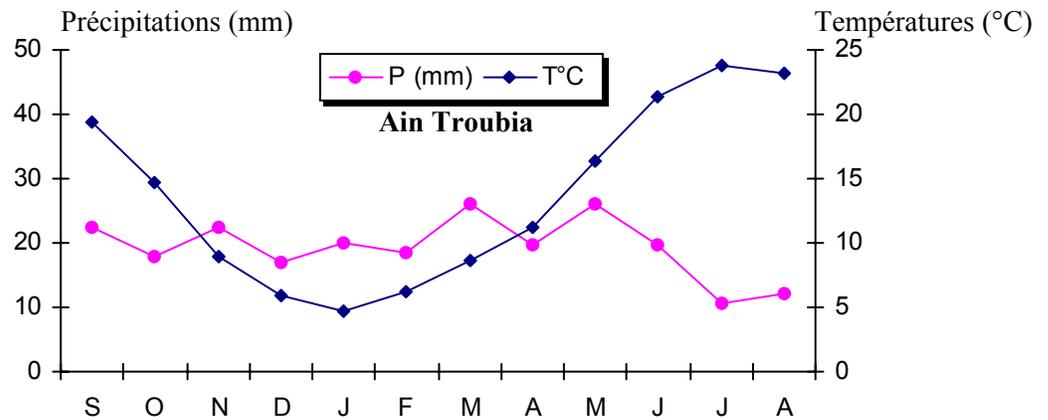
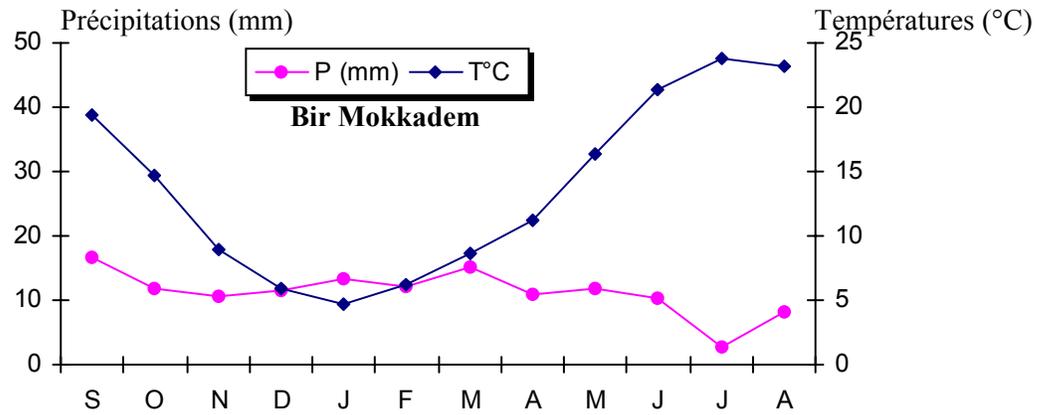
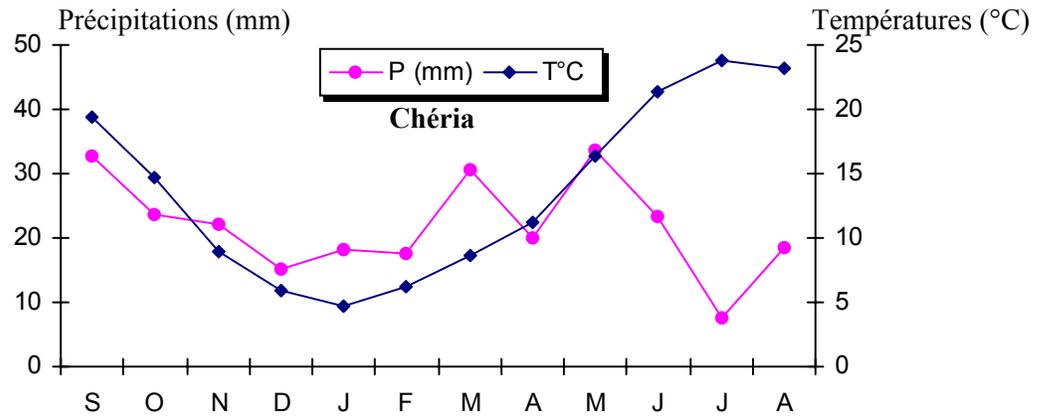


Fig. 25 – Diagrammes pluviométriques aux stations d'observations. Période : 1974 - 2003

6.3. Méthode de Thornthwaite

Cette méthode à relier l'évapotranspiration potentielle (ETP), à des paramètres facilement accessibles : la température moyenne de l'air, l'indice thermique et la durée théorique de l'insolation.

$$ETP \text{ (mm)} = 1.6(10T/I)^\alpha \cdot f(\lambda);$$

T: température moyenne mensuelle en °c;

I : indice thermique annuel tel que $I = \sum i$ (i : indice thermique mensuel)

$$i = (T/5)^{1.514}$$

$$\alpha : (1.6/100)I+0.5$$

$f(\lambda)$: facteur de correction intégrant la durée d'insolation et le nombre de jours du mois considéré

7. BILAN HYDRIQUE

Cette méthode permet d'établir un bilan hydrique à l'échelle mensuelle. L'évapotranspiration potentielle (ETP), et réelle (ETR) sont définies en fonction des pluies, de la température et de la latitude, en tenant compte de la variation mois par mois de la réserve facilement utilisable (RFU). (tableaux en annexes)

$$RFU \text{ (mm)} = [(C - F)/100].h.D+30\text{mm.}$$

C: capacité au champ ;

F : capacité au point de flétrissement ;

h : prof du sol ;

D : densité apparente ;

30 mm : enracinement capillaire

Vu l'absence d'une étude actuelle calculant les réserves facilement utilisables on prend la valeur de 25 mm calculé par le bureau d'étude Le Petit (étude agro-pédologique 1966 - 1967).

Aucun autre paramètre n'est nécessaire, contrairement à celle de Penman, c'est pourquoi seul la méthode de Thornthwaite a été utilisée (une comparaison avec la méthode de Turc a été réalisée). Le surplus (EX) fournissant l'eau d'infiltration et de ruissellement est déduit par soustraction selon $EX = \text{Pluie} - \text{ETR}$

7.1. Interprétation des bilans hydriques

On a calculé pour chaque des quatre stations (Ain Troubia, Bir Mokadem, Chéria et Ain Babouch) un bilan global (1974 – 2003), un pour l'année excédentaire et autre pour l'année déficitaire. Exceptionnellement pour la station de Chéria des bilan pour les cinq dernières années. Pour étudier les différentes situation climatiques (année sèche et humide). Ce qui nous a permet de tirer les conclusions suivantes.

Les bilans globaux (figures 26, 26a, 26b, et 26c) sont déficitaires car généralement les années déficitaires dépassent largement celles excédentaires et les moyennes des précipitations mensuelles sont calculées sur tous les jours du mois (jour pluvieux ou pas).

Les bilans des années humides montrent des excédents de 162mm pour l'année 1990 à la station de Chéria, 199,5 mm en 1975 à Ain Troubia, 55,4 mm en 2003 à Bir Mokadem et 00 mm pour Ain Babouch en 1979.

Pour les cinq derniers bilans de la station de Chéria (de 1999 jusqu'à 2003), dont on note un excédent de 35,6 mm, 46,7mm et 46,2 respectivement pour les années 1999, 2001 et 2003. ce qui permet de prévoir une décennie humide après les deux dernières sèches.

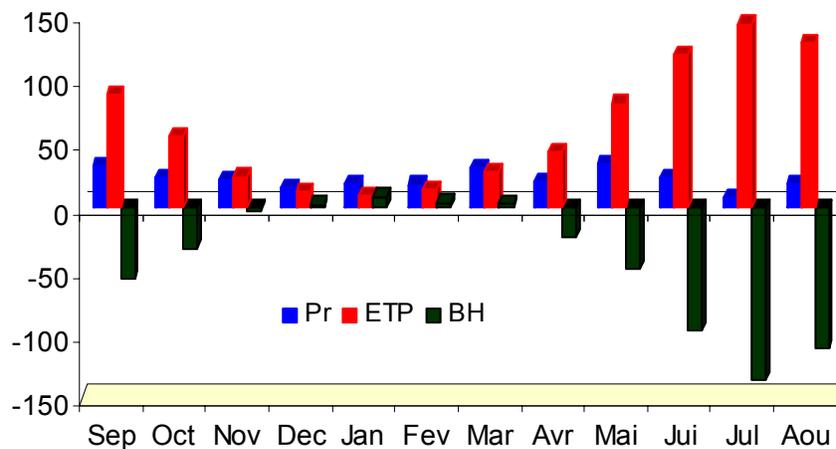


Fig. 26 - Variation de l'ETP de Thornthwaite en fonction des précipitations (mm) à la station de Chéria (1975 - 2003).

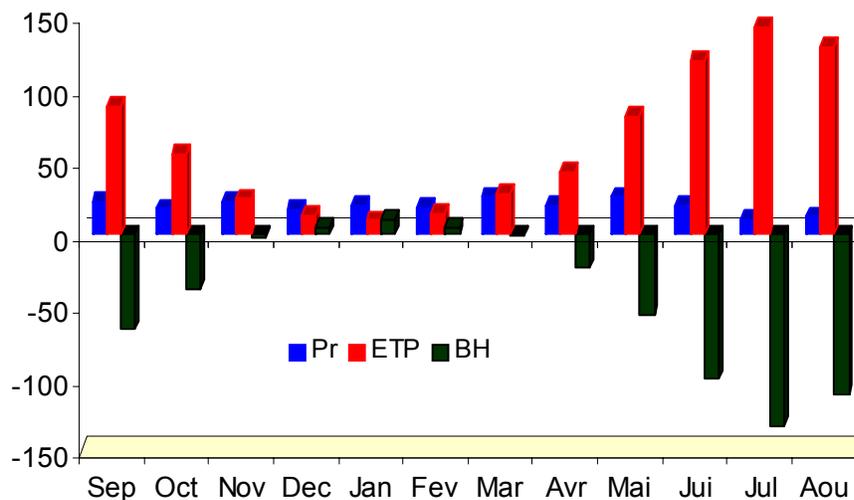


Fig. 26.a - Variation de l'ETP de Thornthwaite en fonction des précipitations (mm) A la station de Ain Troubia (1975 - 2003).

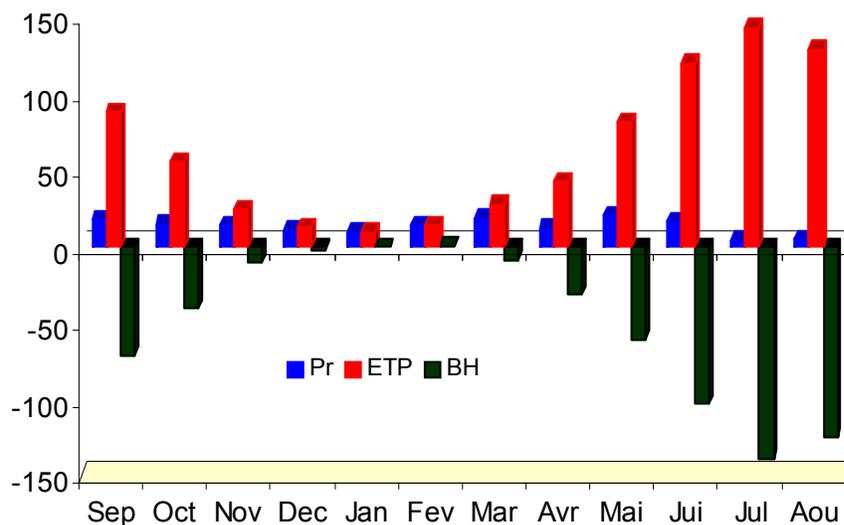


Fig. 26b - Variation de l'ETP de Thornthwaite en fonction des précipitations (mm) A la station de A. Babouche (1975 - 2003).

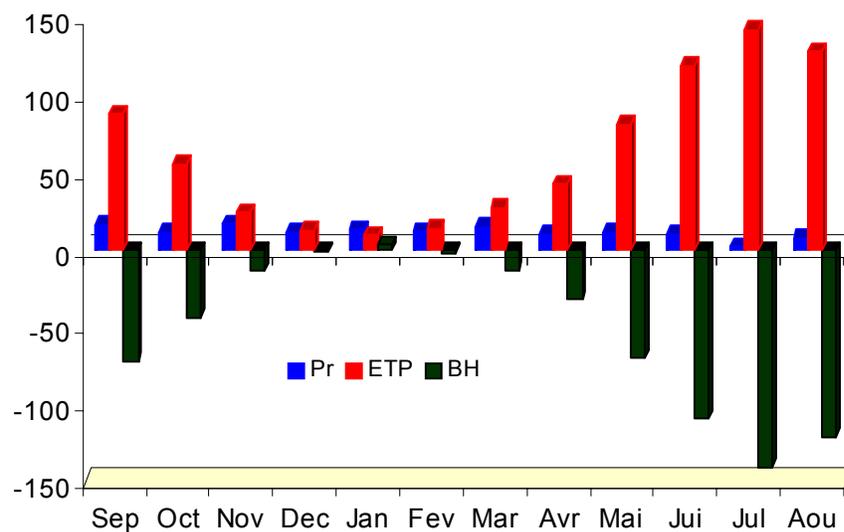


Fig. 26c - Variation de l'ETP de Thornthwaite en fonction des précipitations (mm) A la station de B. Mokkaadam (1975 - 2003).

HYDROLOGIE

1. Introduction

Le régime hydrographique du plateau de Chéria est très différent au Nord de ce qu'il est au Sud. Au Nord les oueds convergent des bordures vers la cuvette avec un nombre important des talwegs. Deux Oueds principaux collectent les eaux des orages et les drainent vers le centre de cette partie du plateau. Oued Blilia prend sa trajectoire depuis Dj Tazbent vers la route de Chéria El Hammamet (NE-SO). Oued Troubia partant de Dj Troubia pour une quinzaine de kilomètre et qui se perd dans la plaine de Bir Djelmda. Sauf pour les périodes de grandes crues leur écoulement peut atteindre la ville de Chéria.

Ces grandes crues provoquent une inondation de la ville, ce qui à mener les autorité de réaliser une digue de protection autour de la ville, et qui déverse dans l'oued Chéria.

Ce dernier sert de canal d'évacuation jusqu'au défilé de Mazraa, deux vallées affluentes l'encadrent : à l'Ouest, oued El Allouchet et à L'Est, Oued Tbagha.

Tous les oueds sauf celui de Chéria sont intermittents et sans intérêts.

Dans les années soixante dix plusieurs sources alimentaient le Réseau hydrographique de la région, qui sont disparues à cause de la sécheresse et l'exploitation excessive (Les sources du Nord : Tazbent, Oglat Eddieb, Gueriene et Bouchguifa. Celles du Sud : Chéria et Ain Babouche).

D'après ce qui précède notre approche hydrologique va être basé sur L'oued de Chéria.

2. Etude des caractéristiques physique du bassin versant de Chéria

L'objet de cette étude est d'exposer les diverses méthodes de mesure, de calcul, et de présentation employée pour caractériser, les principaux paramètres morphologiques qui agissent sur la variation du régime hydrologique.

2.2- Délimitation du bassin versant

Le bassin versant pour une section droite d'un cours d'eau définit comme l'espace de transformation des pluies en débits drainés par ce cours d'eau et ses affluents.

Les caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant dépendent du climat, de sa morphologie, de la nature de ses sols et de la couverture végétale. Chaque bassin versant est séparé des autres par une ligne de partage des eaux, dans notre cas, cette limite est tracée sur les cartes topographiques d'échelle 1/50.000 en suivant les lignes des crêtes bordant le bassin.

2.3- Etude des paramètres géométriques

2.3-1- Superficie du bassin versant

Sur une carte à l'échelle topologique 1/50.000 et par planimétrie, la superficie du bassin de Chéria est de l'ordre de 810Km².

2.3-2- Périmètre du bassin versant

L'intérêt essentiel du périmètre est de pouvoir déterminer l'indice de compacité de Gravellius (K_c). Le curvimétrie du bassin d'Oued Chéria bassin d'oued Chéria donne un périmètre de 148Km.

2.3-3- L'indice de compacité de Gravellius

On l'appelle aussi l'indice de forme du bassin, laquelle va avoir une influence sur l'écoulement global. Cet indice est défini comme le rapport entre le périmètre du bassin versant et le périmètre d'un cercle ayant la même surface.

$$0.28P / (S)^{-1/2}$$

$$K_c = \frac{0.28 P}{\sqrt{S}} ; \quad (\text{voir tableau n}^\circ \dots)$$

- Si : $K_c < 1$: ce ci implique que le bassin versant à une forme ramassée.
- Si : $K_c > 1$: ce ci implique que le bassin versant à une forme étalée.

Nous avons :

$$\begin{aligned} P &= 136 \text{ Km} \\ S &= 810 \text{ Km}^2 \\ K_c &= 1.34 > 1 \end{aligned}$$

C'est-à-dire le bassin versant de Chéria a une forme généralement étalée.

2.3-4- Rectangle équivalent : (Fig. n°)

Ce paramètre facilite la comparaison entre les bassins versants du point de géométrique dans laquelle :

- Le contour du bassin devient in rectangle de même périmètre ;
- Les courbes de niveau sont des droites parallèles à la largeur du rectangle ;
- L'exutoire est un des petits cotés du rectangle.

La longueur (L) et la longueur (l) sont données par :

$$L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right) \quad l = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right)$$

On aura donc :

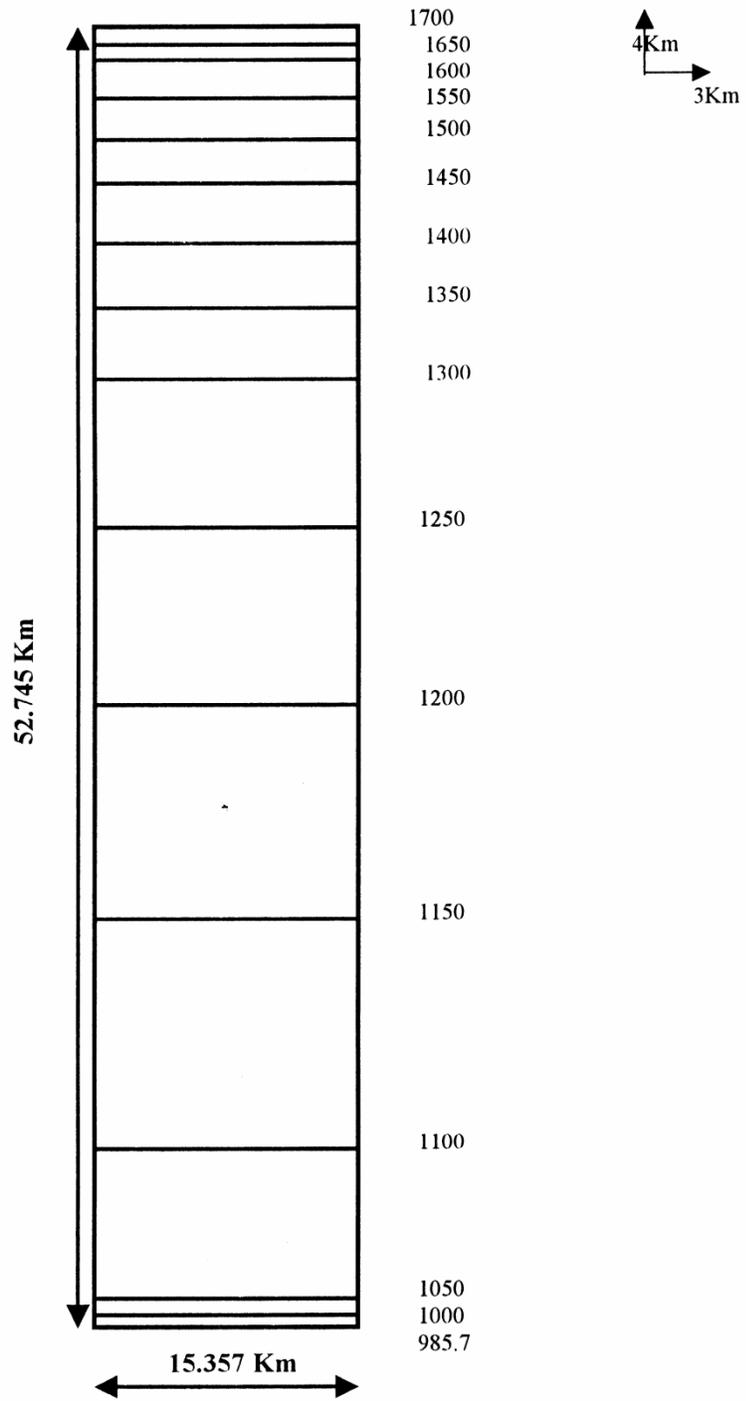


Fig.27 - Rectangle équivalent

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, c'est un capitale dans le comportement hydrologique d'un bassin, ces caractéristiques hypsométriques permettent d'aboutir à la classification du relief.

2.4-1- Courbe hypsométrique :

Le relief est caractérisé par sa courbe hypsométrique, celle ci nous renseigne sur la répartition de la surface en fonction de tranche d'altitude en portant ordonnée les tranches données et en abscisse la surface du bassin pour laque chaque point est une cote au moins égale à cette altitude, les surfaces en abscisse sont exprimées en pourcentage de la surface totale du bassin, la répartition altimétrique du bassin versant d'Oued Chéria est représenté sur le tableau N°.....

La courbe hypsométrique du bassin versant de Chéria montre une allure généralement irrégulière.

Tranches D'altitudes	Surfaces partielles	Surfaces Cumulées	Surfaces Partielles	Surfaces cumulées	Dénivelée	VaiHi (%)
H (m)	Sj (Km ²)	LSi (Km ²)	ai = Si / S (%)	Lai (%)	Hi (m)	
1700-1650	01.05	01.05	00.13	00.13	50	0.25
1650-1600	00.95	02.02	00.12	00.25	50	0.24
1600-1550	05.21	07.23	00.64	00.89	50	0.57
1550-1500	06.32	13.55	00.78	01.69	50	0.62
1500-1450	07.11	20.66	00.88	02.55	50	0.66
1450-1400	14.15	34.81	01.75	04.30	50	0.94
1400-1350	15.62	50.43	01.93	06.23	50	0.98
1350-1300	20.07	70.50	02.48	08.71	50	1.11
1300-1250	92.87	163.37	11.46	20.17	50	2.41
1250-1200	129.12	292.49	15.94	36.12	50	2.82
1200-1150	185.33	477.82	22.88	59.00	50	3.38
1150-1100	242.94	720.76	30.00	89.00	50	3.87
1100-1050	84.07	804.83	10.37	99.37	50	2.28
1050-1000	03.80	808.63	00.47	99.84	50	0.48
1000-985.7	01.37	810.00	00.17	100.00	14.3	0.16

Tab. 03 -: La répartition de la surface en fonction de la tranche d'altitude

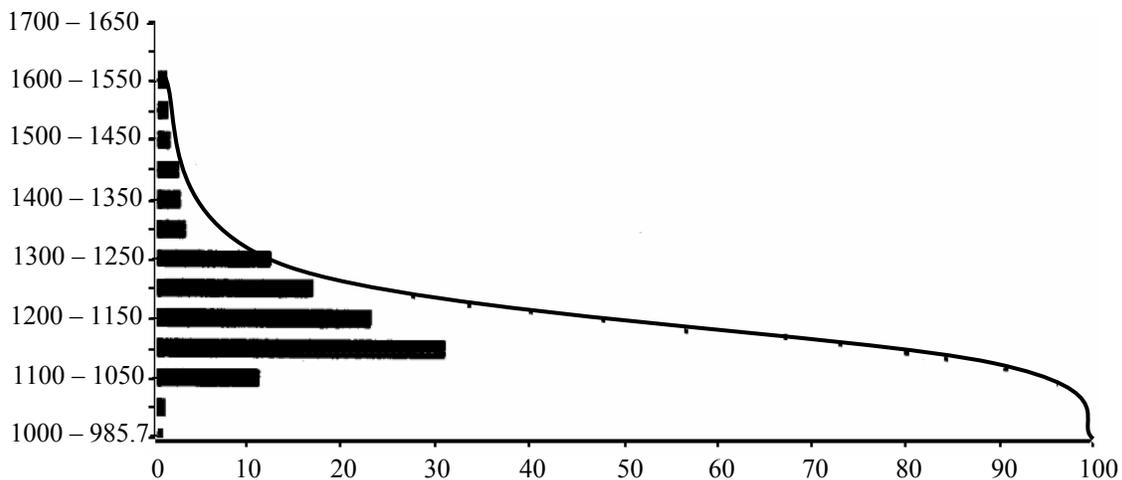


Fig. 27a – Courbe hypsométrique et des fréquences altimétriques

3.4-2- Les altitudes caractéristiques

Les altitudes caractéristiques nécessaires pour les calculs hydrologiques sont :

3.4-2-1- Altitude moyenne

Elle est obtenue par l'expression suivante:

$$H_{\max} = \frac{\sum V/S}{S} ; (\text{tableau n}^\circ \dots)$$

Sachant que :

$$V = [(h_1+h_2)/2]S_1 = H_{\text{moy}}S_1 ; \text{ Nous obtenons pour notre bassin: } H_{\text{moy}} = 1189.11\text{m.}$$

3.4-2-2- Altitude médium

L'altitude médium correspond au point d'abscisse $S/2$ de la courbe hypsométrique, pour notre bassin $h_{\text{soo}/o} = 1165$ m.

3.4-2-3- Altitude maximale et altitude minimale

L'altitude du bassin versant varie entre 985.70m et 1712m.

3.4-3- Les indice de pente

3.4-3-1- Indice de pente global:

Cet indice sert à classer le relief du bassin, il décroît lorsque la surface augmente, et il présente l'avantage d'être très simple.

$$I_g (\text{m/Km}) = H_u / L \quad (\text{Tableau n}^\circ 03)$$

$$H_u = H_{5\%} - H_{95\%} = 1370\text{m} - 1085\text{m} = 285\text{m} \rightarrow H_u = 285\text{m}$$

$$I_g = 285/52.745 = 5.4 \text{ m/Km d'ou } I_g = 5.4 \text{ m/Km}$$

Les zones montagneuses sont situées sur le contour elles sont caractérisées par un relief très accidenté ou les pentes varient entre 12.5% et 40% et s'étalent sur environ 30% de notre zone d'étude.

3.4-3-2- La dénivelé spécifique:

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{S} ; (\text{Tableau n}^\circ 03)$$

On a :

$$I_g = 5.4\text{m/Km} ; S = 810 \text{ Km}^2$$

$$D_s = 153.69 \text{ m}$$

La dénivelé spécifique permet d'utiliser la classification de L'O.R.S.T.O.M

(Office des Recherches Scientifiques dans les Territoires Outre Mer) qui permet définir les différents types de relief des bassins versant quelque soient leurs superficies. D'après la classification de L'O.R.S.T.O.M, notre bassin versant présente un relief assez fort (R5) car $100 < D_s < 250m$.

R _i	$D_s < 10$	Très faible
R ₂	$10 < D_s < 25$	Faible
R ₃	$25 < D_s < 50$	Assez faible
R ₄	$50 < D_s < 100$	Modère
R ₅	$100 < D_s < 250$	Assez fort
R ₆	$250 < D_s < 500$	Fort
R ₇	$D_s < 500$	Très fort

Tab. 04- : Classification du relief en fonction de «Ds» d'après L'O.R.S.T.O.M

Paramètres	Définition
P	Le périmètre du bassin versant de Chéria ; (Km)
K _c	Indice de compacité de Gravelius
S	La surface du bassin versant ; (Km ²)
L	La longueur du rectangle équivalent ; (Km)
L	La largeur du rectangle équivalent ; (Km)
H _{mov}	L'altitude moyenne ; (m)
IV	La Somme des volumes partiels (v) de chaque tranche de montagne, comprise entre les courbes de niveau ; (m ³)
S _T	La surface totale ; (Km ²)
H h ₂	Altitude des courbes ; (m)
S _i	La surface partielle entre deux courbes ; (Km ²)
H _{50%}	L'altitude médium ; (m)
(H _{50%} -H _{950/0})	Définit directement sur la courbe hypsométrique
le	Indice de pente global
Hu	La dénivelé (H _{50%} -H _{950/0}) déduit sur la courbe hypsométrique ; (m)
D _s	La dénivelé spécifique ; (m).

Tab. 05- : Définition des paramètres caractérisant le bassin versant de Chéria

4. SITUATION ET EQUIPEMENT DE LA STATION DE JAUGEAGE DE OUED CHERIA

La station de jaugeage de oued Chéria a commencé à fonctionner le 10/02/1974 sur l’affleurement des calcaire éocène, dans la gorge ; entre Dj Bou Kamech et Kef E’ Nsour, dont les coordonnées Lambert sont : $X = 953.000$, $Y = 216.000$, $Z = 1010$ m, avec le code : 06.23.08.

Elle est équipée d’un limnigraphe à air d’amplitude 5 m, une échelle de trois éléments de un mètre et un téléphérique pour les jaugeages. C’est ce qu’on appelle limnigraphe complet.

Nous signalons que nous disposons d’une série de données de débits d’une période de douze ans presque complète (1982 – 1994) et une série de jaugeage quatorze ans (03/1976 – 04/1990), mais on a préféré d’utiliser la série la plus complète malgré cette période réduite et ne pas utiliser la deuxième car les jaugeages sont effectués deux fois par mois.

5. Débits moyens mensuels interannuels (1982 – 1994)

Les débits ont été enregistrés d’une façon régulière et continue que pendant la période de 1982 jusqu’à 1994, après c’est l’arrêt de l’enregistrement jusqu’à nos jours, pour des mesures de sécurité

Les débits moyens mensuels interannuels (1982-1994) sont faibles pour presque tous les mois pour atteindre leurs maximums aux mois juillet et août (respectivement 3.025 m³/s et 2 m³/s). Ce qui peut être expliqué par les pluies torrentielles, qui caractérisent ces mois.

6. Débits moyens interannuels (1982 – 1994)

L’analyse des débits annuels montre une irrégularité très nette qui va de 0 m³/s à une centaine de mètres cube. On note des débits de l’ordre de 0 m³/s pour les premières années 1982, 1983 et 1984, il devient important pour le reste des années, pour atteindre 166 m³/s en 1990.



Fig. 28 – Moyenne mensuelle interannuelle des débits de l’oued Chéria (1982 – 1994)

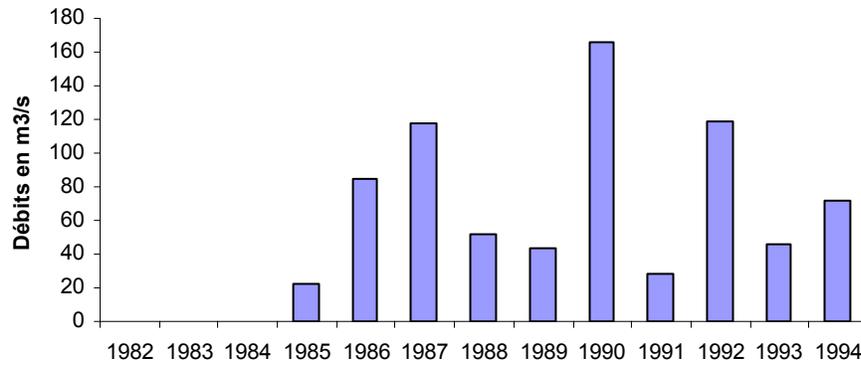


Fig. 28a – Evolution des débits interannuels de l’oued Chéria (1982 – 1994)

7. Variation mensuelle des débits de l’oued Chéria

Le graphique établi sur la station du bassin montre ; des débits généralement faibles rarement qu’ils dépassent 2,33 m³/s (juin 1987), ainsi que deux pics pour 38,34 et 22,69 respectivement en juillet et août (1992). Ces débits élevés par rapport aux restes, peut être expliqué par les orages et les pluies violentes d’été.

8. Variation des débits en fonction des pluies

On a tracé sur le même graphe l’évolution des débits de l’oued Chéria et les pluies de la station de Chéria à l’amont de l’oued, pour la période étalée entre 1982 et 1994.

8.1. Variation annuelle (1982 – 1994)

On peut noter que d’une façon générale existe une relation entre les débits et les précipitations. Au début de la période d’enregistrement des débits, les précipitations ont été faibles ce qui a donné un débit faible et lorsque la pluie est importante le débit est fort tel que le cas en 1990.

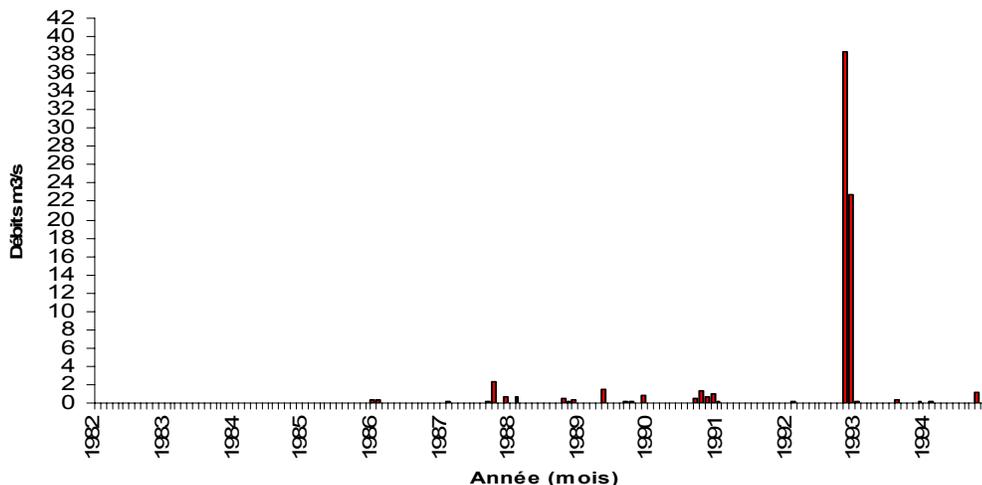


Fig. 28 -Variation mensuelle des débits de l’Oued Chéria.

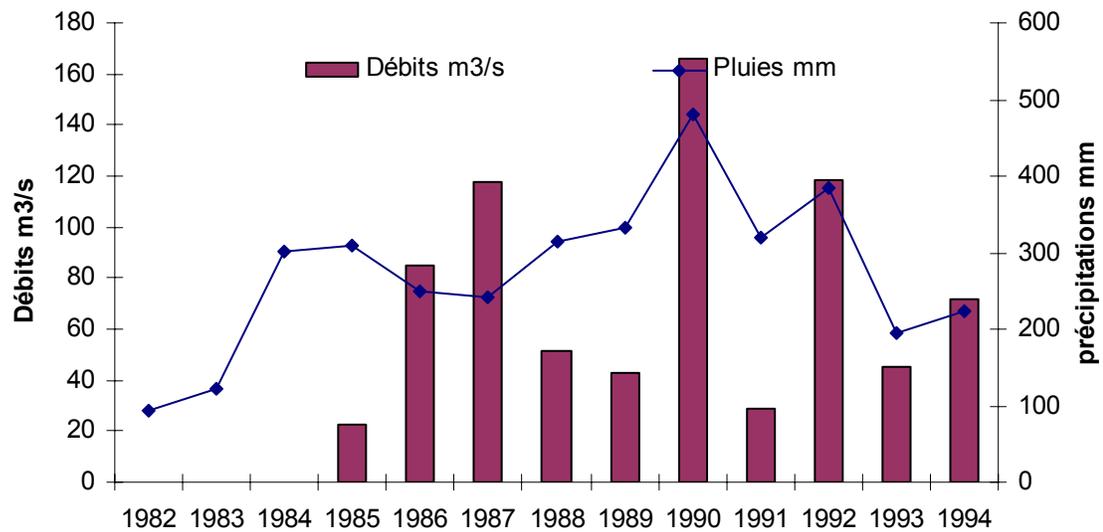


Fig. 29 – Variation des débits annuels en fonction des pluies : (1982 - 1994)

8.2 Variation mensuelle interannuelle

En terme des moyennes mensuelles interannuelles on note l'absence de relation entre les débits et les précipitations. Ce qui nous emmenons à étudier les variations pour l'année la plus humide et l'année la plus sèche et leur évolution.

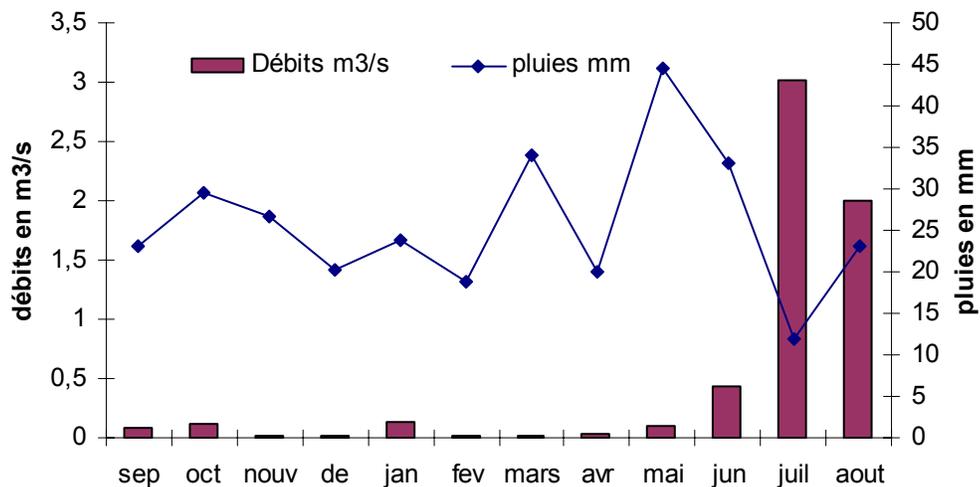


Fig. 30 - Variation des débits moyens mensuels en fonction des pluies (1982 - 1994)

8.3 Variation pendant l'année la plus humide (1990)

Pour cette année on note qu'au début on pour les mois de septembre au mois de mars la relation est nette et ponctuelle. Pour les mois de mai et juin, la réponse est en retard d'un mois presque, car on ne remarque l'augmentation du débit au niveau de l'oued en mois de mai q'après la hauteur importante de précipitation du mois d'avril (80

mm) et c'est le même cas pour mois de juin. Par contre pour les mois de juillet et août le débit est

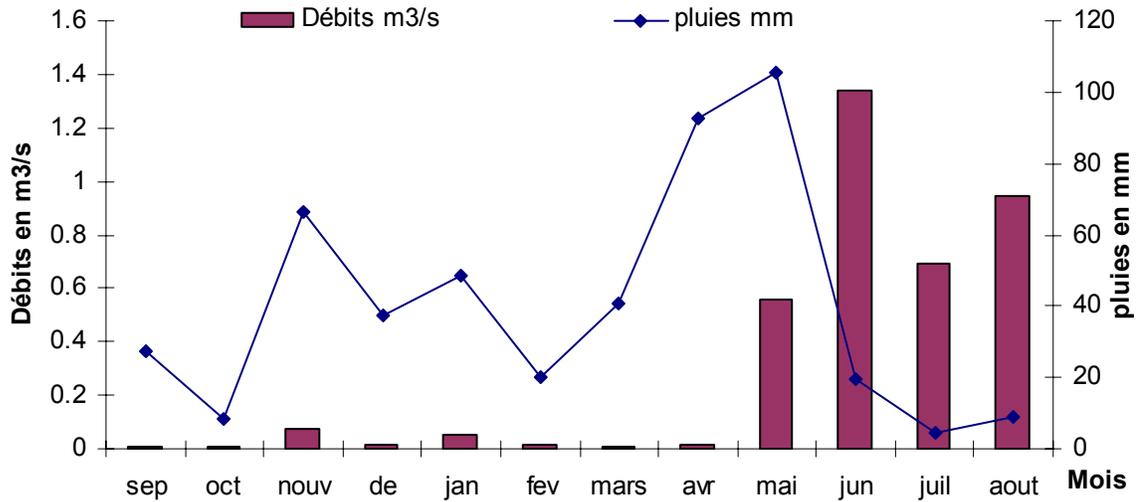


Fig. 31 - Variation des débits en fonction des pluies (1990)

toujours important mais les précipitations sont faible (étiage), ce qui nous permet de confirmer l'hypothèse qui dit que la résurgence de la nappe se fait par la source de Ain Babouche. Il est très difficile de distinguer les crues de la source de Ain Babouche issue des calcaires Eocènes (Gaud 1978).

8.4 Variation pendant l'année la plus sèche (2000)

Pour cette année les débits sont faibles pour toute l'année presque. On peut dire que la réponse remarquée en avril peut être due à la source de Ain Babouche car les pluies sont de l'ordre de 15 à 20 mm par mois et les débits sont très minimes pour la période entre octobre et mars. Ce qui pourrait le même cas pour le reste des mois de l'année.

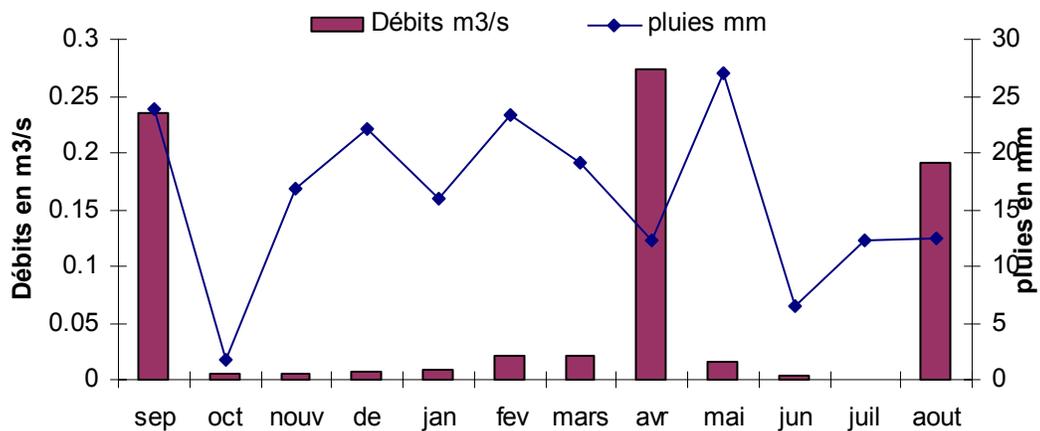


Fig. 32 - Variation des débits en fonction des pluies (2000)

8.5 Variation mensuelle pour la période entre 1984 et 1994

D'une façon globale on note l'absence d'une relation régulière entre les pluies et les débits. Dont on note des débits faibles de l'ordre de zéro, malgré les pluies qui dépassent par fois 120 mm de hauteur. Ainsi que des débits très élevés (38 m³) avec des précipitations qui ne dépassent pas les quarantaine de mm.

8.5.1 Débits d'étiage :

Le débit d'étiage est de l'ordre de zéro pour plusieurs mois dans la série d'observation.

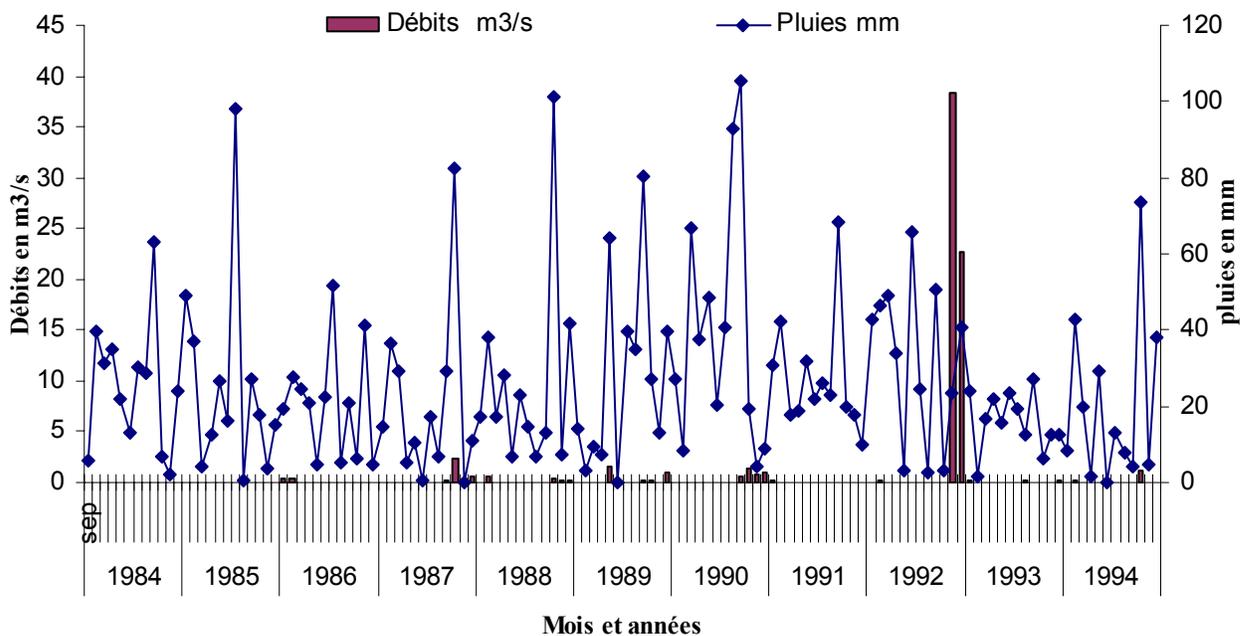


Fig. 33 – Variation mensuelle des débits en fonction des pluies (1984 – 1994)

8.5.2 Débits de crue

Pour cette période d'enregistrement plusieurs crues ont été observées, mais la plus remarquable c'est celle qui commence le 17 juillet 1993 par 81,6 m³/s, 104,2 m³/s pour le 18 et qui continue d'une façon décroissante jusqu'au 14 août du même année avec 25,7 m³/s

Les mois où les crues sont les plus fréquentes correspondent à la période d'été et le début automne (du mois de juin jusqu'au mois d'octobre), traduisant les pluies orageuses qui caractérise la région.

La décrue est très rapide. Elle dure en générale 3 à 4 jours, sauf pour celle déjà citée ci-dessus.

En général, les débits réellement enregistré au niveau de la station hydrométrique ne correspondent pas aux débits supposés reçus par la dite station étant donné les hauteurs des précipitations reçues par l'impluvium dont l'extension est d'une importance non négligeable

9. Jaugeages différentiels

Deux jaugeages ont été effectués pour voir l'évolution des débits le long de oued Chéria, (le 1^{er} le 20/02/2001 et le 2^{ème} le 08/05/2003) pour avoir une idée sur la relation oued nappe dans la région.

Les jaugeages ont été réalisés par micro-moulinet sur perche muni d'une hélice, dont la vitesse longitudinale de l'écoulement va provoquer sa rotation.

Le dépouillement des résultats s'est fait par exploration du champ de vitesse (soit une section S d'un cours d'eau ; le débit dans cette section se définit comme le flux du vecteur vitesse à travers S).

La représentation graphique des résultats des deux périodes révèle deux cas nettement différents.

Pour le 1^{er} cas, on constate une augmentation des débits, qui peut être due à une alimentation, dont l'origine reste probablement celui du niveau aquifère (fig.34). Ceci est particulièrement visible, surtout, au dernier point existant en aval. A ce niveau, la contribution de la source de Ain Babouche n'est pas à démontrer.

Pour le second cas, les mesures ont révélé une décroissance quant aux valeurs obtenues du point de vue débits. En effet, dans la partie amont les débits sont souvent supérieurs à ceux enregistrés dans la partie aval (fig.35). Ceci s'explique par l'existence d'un débit de fuite sur le tracé de l'oued Chéria. Un tel débit contribue largement et efficacement à l'alimentation de l'horizon aquifère en particulier celui des calcaires éocènes fissurés.

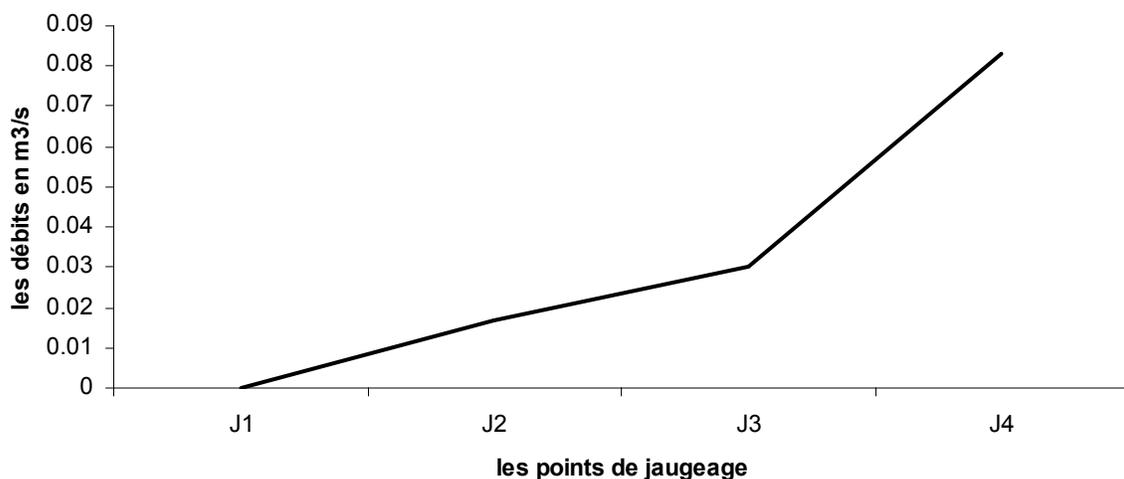


Fig. 34 - Evolution du débit le long de l'oued Chéria

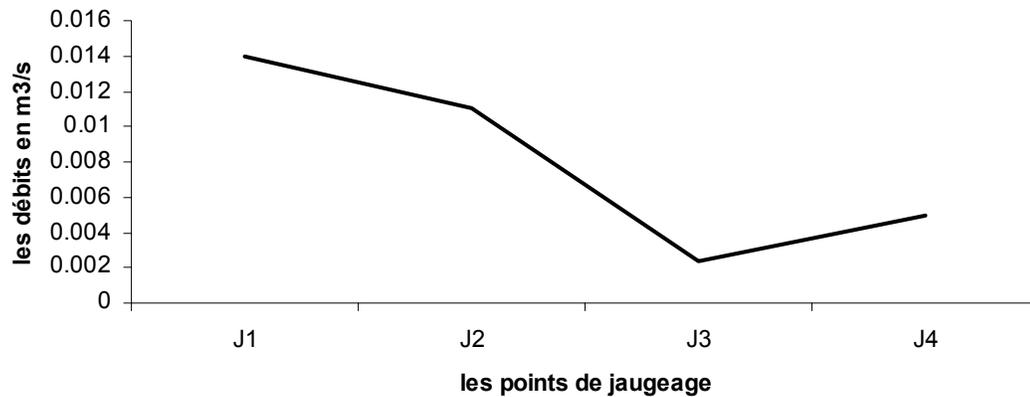


Fig. 35 - Evolution des débits le long de l'oued Chéria (20/02/2004)

10. Conclusion

La région de Chéria est soumise à un climat semi-aride, avec des précipitations d'une moyenne qui ne dépasse pas 200 mm/an, pour les différentes stations étudiées. Cette moyenne représente une chute de près de 44% par rapport à la moyenne calculée entre 1909 et 1046.

L'année 1990 est la plus pluvieuse pour les stations de Chéria et Ain Babouche avec 400 mm/an. Tandis que l'année 2000 est moins pluvieuse avec 100 mm/an.

Le mois de juillet est le sec pour toutes les stations, en l'occurrence le mois de mai est le plus arrosé pour les stations Ain Babouche et Ain Troubia (21, 27mm) et le mois de septembre pour Chéria et Bir Mokadem (35, 27mm).

Pour la même période d'étude le mois le plus chaud est le mois de juillet (23,84° C) et le mois le plus froid est le mois de janvier (4,7 °C).

La période humide, pour la plus part des stations Chéria, Ain Babouche et Ain Troubia, s'étale pour une durée du mois de septembre au mois de mai.

Les calculs du bilan hydrique en utilisant la méthode de Thornthwaite montre que les bilans globaux sont généralement négatifs.

L'étude hydrologique du bassin de L'oued Chéria (1982 – 1994) a montré des moyens mensuels interannuels très faibles, et qui peuvent atteindre par fois 3 m³/s en mois d'août, pour les moyennes annuelles sont aussi faible sauf pour l'année 1990 on enregistre 166m³/s.

Les graphiques reliant les précipitations et les débits ont relevée une réponse tardée de L'oued par rapport aux précipitations qui peut être expliquée d'une part

l'intensité des pluies et le temps de séjour ainsi que l'effet de la source de Ain Babouche qui n'est pas négligeable.

Les jaugeages différentiels effectués sur L'oued ont montré deux scénarios, l'un décroissant, signifie une alimentation de la nappe par l'oued et le deuxième croissant expliqué par le drainage de la nappe par l'oued.

Chapitre III

CARACTERISATION ET ETAT ACTUEL DES AQUIFERES

CARACTERISATION DE L'ETAT ACTUEL DES AQUIFERES

1. Introduction

Afin de caractériser le réseau fracturé utile, nous avons eu recours à diverses méthodes d'investigation, que nous allons décrire dans les paragraphes suivants.

Cette partie est une présentation succincte des méthodes et les principaux apports à notre étude.

Ainsi il faut comprendre par utilité de la méthode, la capacité de celle-ci à déterminer certains paramètres hydrodynamiques (sens d'écoulement, conditions aux limites, etc.). La procédure est la méthodologie mise pour recueillir les données brutes avant traitement. L'interprétation des données, et l'évocation des principaux types de résultats obtenus.

2. LA GEOMETRIE DE L'AQUIFERE.

Quatre terrains susceptibles d'être aquifère: aquifère des calcaires maestrichtiens, des calcaires éocènes, du remplissage de Mio-Plio-Quaternaire. (fig. 36).

2. 1. L'aquifère des calcaires maestrichtiens

Les différents forages qui ont atteint les calcaires maestrichtiens jusqu'à nos jours, ont montré que ces formations fissurées sont aquifères dans les bordures (fissures et parfois des cavités ouvertes rencontrées. F502, F503, F2, F521) et imperméables au centre du bassin (calcaires massifs sans fissures rencontrées. F533, F536).

La géophysique n'a pas pu déterminer les paramètres caractéristiques des calcaires maestrichtiens aquifères (des résistivités très voisines (300 à 500) indiquent à la fois des calcaires très karstifiés ou faiblement fissurés) mais quand on a plus de chances de rencontrer des zones fissurées ou karstifiées lorsque on se place sur des discontinuités tectoniques et dans les zones où les calcaires sont recouverts directement par le quaternaire (ou ils ont été émergés et attaqués selon la fissuration par les eaux de ruissellement)

Le nombre de forages ayant traversés les calcaires sous les marnes Dano-Montien étant très faible, il est difficile d'affirmer qu'il n'existe aucune fissuration donc aucune possibilité aquifère dans toute l'étendue du réservoir soumis à ces conditions.

2. 2. L'aquifère des calcaires éocènes

C'est l'aquifère principal de Chéria. Il a été reconnu par de nombreux forages spécialement autour de la ville de Chéria et fait l'objet d'une importante exploitation pour l'alimentation en eaux potable et pour l'irrigation. La perméabilité est donnée par des fissures et un karst bien développé autour de la ville.

Les caractéristiques des forages qui ont traversé ou touché les calcaires Eocène ont permis d'établir les remarques suivantes.

- les zones fissurées se rencontrent en générale dans les 100 premiers mètres de l'éocène et les zones karstifiées sont encore plus localisées dans les 50 premiers mètres.
- Pour la géophysique le même problème que pour les calcaires maestrichtiens (pas de différence de résistivités entre les calcaires fissurés et compacts) par contre pour le carotage électrique longue normale semble donner des résistivités de l'ordre de 200 ohm.m pour les calcaires fissurés et 400 à 600 ohm.m pour les calcaires non fissurés.

2. 3. L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire

Particulièrement cette aquifère rassemble deux aquifère:

- l'aquifère des niveaux sableux du Miocène : Le petit nombre de forages exécuté dans cet aquifère (523 et 524) rend les informations moins importantes. Le niveau compris entre 53 et 80 m est attribué aux graviers et sables quartzeux du Miocène.
- L'aquifère des alluvions quaternaires et actuelles. D'après la définition de Lambert on pouvait les classer en cailloutis fluviaux, de colmatage, de bas fonds, alluvions de piémont. Ces formations occupent la majeure partie du plateau de Chéria. Elles jouent dans la partie Nord le rôle d'alimentation des calcaires maestrichtiens et éocènes par infiltration.

Cet aquifère est devenu actuellement sans intérêt vu la sécheresse qui a sévi pendant les deux dernières décennies, ainsi que la sur-exploitation des ressources hydriques, ce volet sera traité ci-après.

3. HYDRODYNAMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

3.1. La piézométrie

La cartographie piézométrique à la base des relevés piézométriques (Par interpolation triangulaire en utilisons le logiciel *Surfer 8.01*, serial number *WS-055032-117 under Windows XP, Version 5.1 Service Pack* [http:// : www.goldensoftware.com](http://www.goldensoftware.com)), qui permet de déterminer les courbes d'égal niveau piézométrique et le sens d'écoulement (lignes perpendiculaires aux lignes piézométriques).

Plusieurs campagnes piézométriques effectuées pour cette étude (tn. n° 6).

Dates des campagnes	Nombre de puits	Observations
Juillet 2000	116	Réseau global (puits et forages)
Octobre 2000	116	
Mars 2002	33	Réseau réduit (puits et forages)
Septembre 2002	35	
Septembre 2003	45	
Avril 2004	30	
Février 2005	33	
Septembre 20025	54	

Tab. 6 – tableaux récapitulatif des campagnes piézométriques

La région est caractérisée par deux types de captages. Des puits domestiques peu profonds (10 – 30 m) et d'un diamètre important (1 – 2 m). Des forages profonds (50 – 120 m et plus). Avec une densité très importante et très remarquable. (la distance séparant deux puits est par endroit inférieur à 6 m). Ils sont plus de 200 actuellement. Une centaine de points a été prise comme un réseau de surveillance pour étude (fig.37).

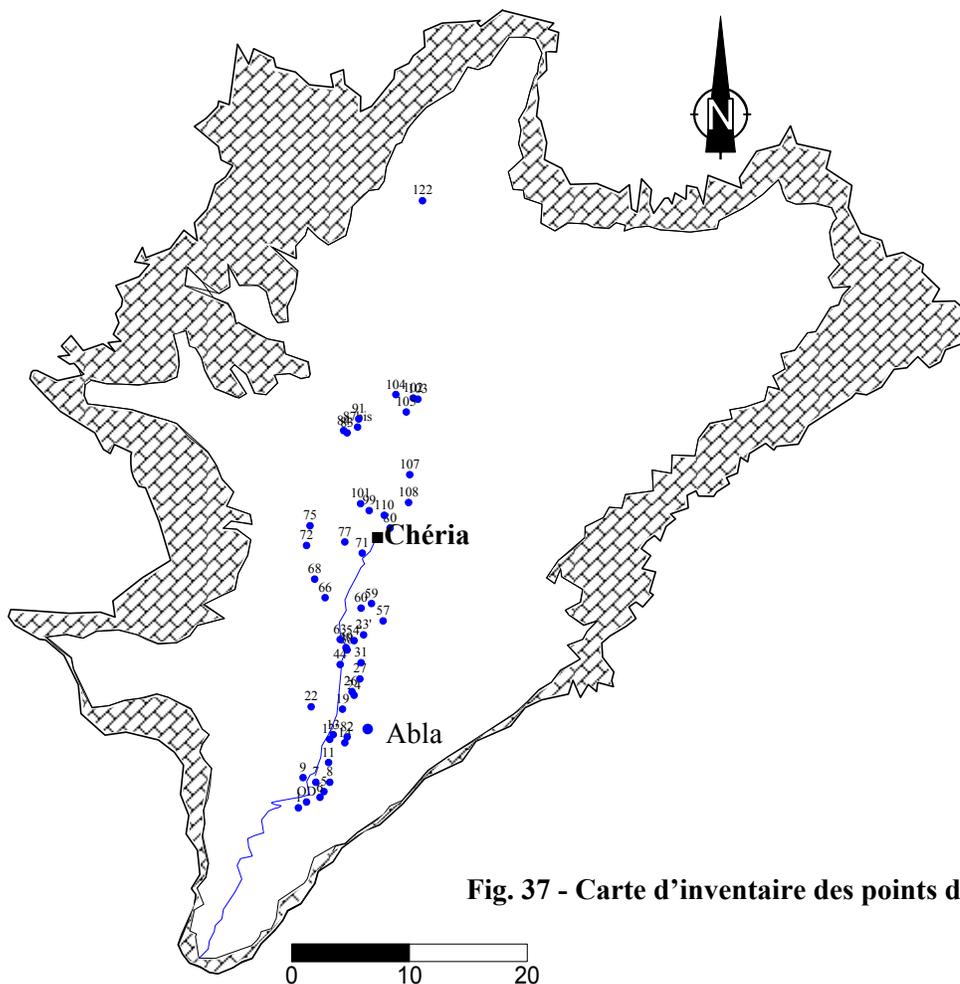


Fig. 37 - Carte d'inventaire des points d'eau

Ce nombre de points d'eau est relativement suffisant pour établir des cartes piézométriques.

Les mesures sont généralement effectuées dans deux périodes basses et hautes eaux (février, mars, avril et juillet, aout, septembre), pour différencier les périodes d'alimentation et de sécheresse.

Les différentes cartes piézométriques élaborées pendant cette étude (2000 – 2005) ont révélé deux sens d'écoulement, l'un dans la partie Nord (sous bassin nord) du Nord vers le Sud convergent avec un gradient hydraulique variable et un deuxième dans le sous bassin sud dont l'écoulement se fait de part et d'autre (de l'Est et de l'Ouest) vers un axe de drainage qui coïncide avec la trajectoire de l'oued.

Pour mieux visualiser la variation dans le temps des niveaux piézométriques, la cartographie qui suit, permet la mise à jour de toutes les situations qu'a connu l'aquifère pendant le période d'observation.

3.1.1. Campagne du mois de septembre 2002. (fig.38)

L'examen de la carte piézométrique dont les mesures remontent au début de la période d'observation (2002), fait ressortir deux zones distinctes :

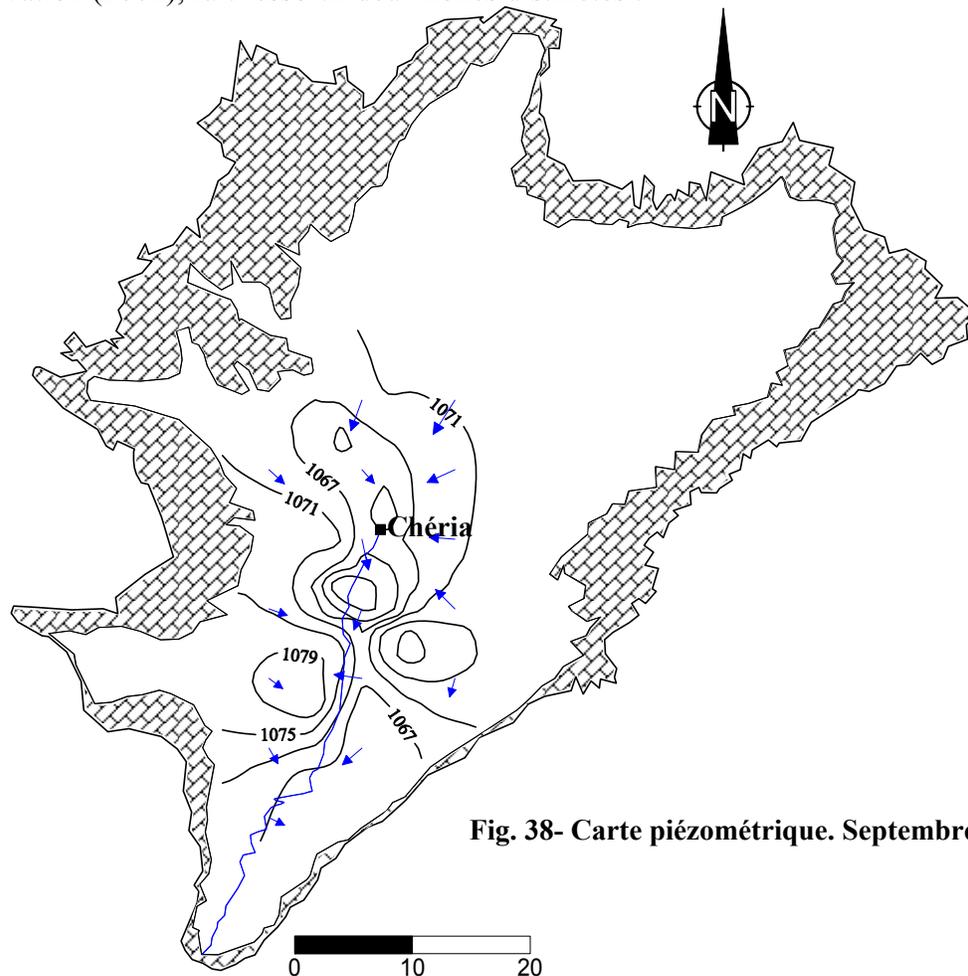


Fig. 38- Carte piézométrique. Septembre 2002

La première centrale caractérisée par une sur-exploitation marquée par une dépression au niveau de la ville et ces alentours, cette dernière est expliquée par le nombre de forages alimentant la population tel que le forage J8-9bis et le CH1.

La deuxième zone localisée en aval du plateau est aussi marquée par deux dépressions de part et d'autre de l'oued Chéria, où une partie de l'écoulement converge vers l'axe de l'oued.

L'écoulement se fait de manière générale du Nord vers le Sud. Le gradient hydraulique qui varie entre 0.28 et 1.6.

3.1.2. Campagne du mois de septembre 2003. (fig.39)

Pour cette période d'observation, la carte établie est presque identique à la précédente sauf pour de faits très importants, qui sont la recharge de l'aquifère en cette année et l'importance du gradient hydraulique. L'épuisement dans l'aquifère pour la même raison qu'en 2002 est nettement visible, car les forages déjà signalés continuent à alimenter la ville de Chéria ainsi que le nombre des puits forés dans le cadre du programme FNDRA.

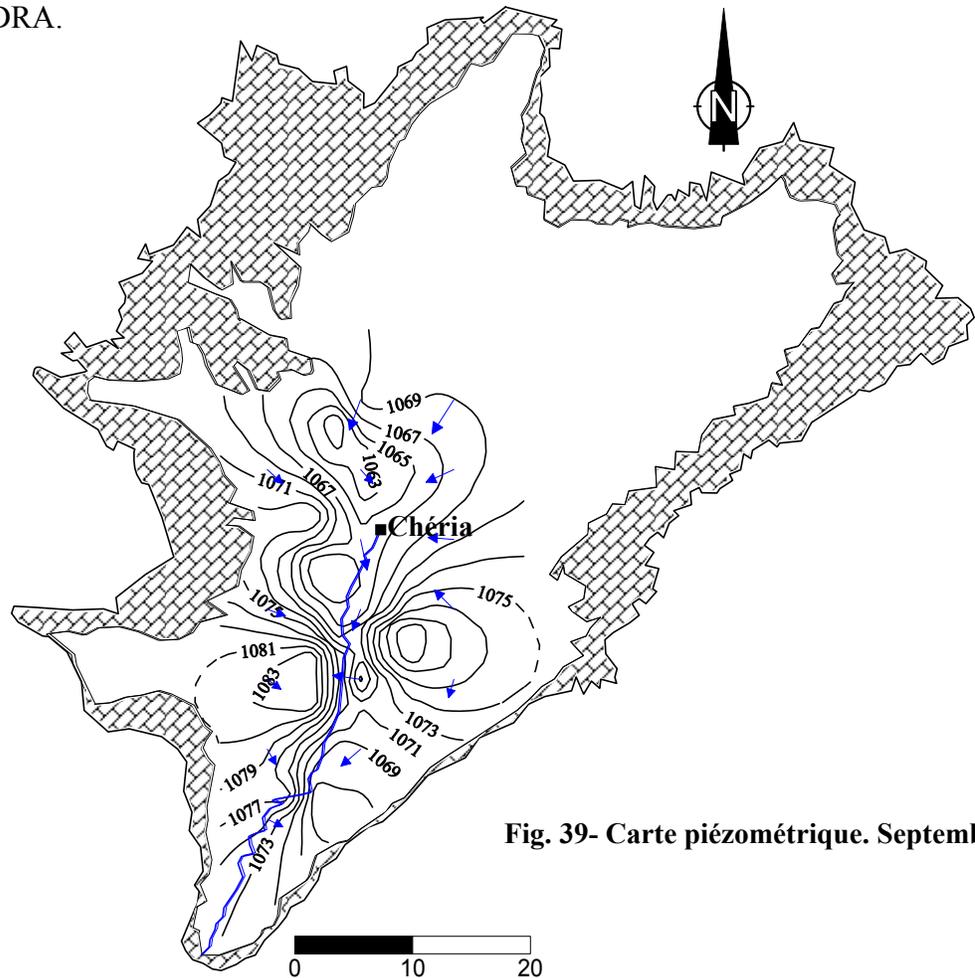


Fig. 39- Carte piézométrique. Septembre 2003

3.1.3. Campagne du mois de février 2005. (fig.40)

L'examen de cette situation piézométrique, montre le même axe principal de l'écoulement Nord-Sud. Dans le sous bassin nord avec un gradient hydraulique de l'ordre de 0.7, avec une convergence localisée dans le secteur de Bhiret M'chental où d'importantes quantité d'eau sont livrée pour l'irrigation de la pomme de terre en cet endroit, tan disque dans la partie Sud l'écoulement se fait dans deux sens opposés du Sud-Ouest et sud-est vers l'axe de drainage (oued Chéria)

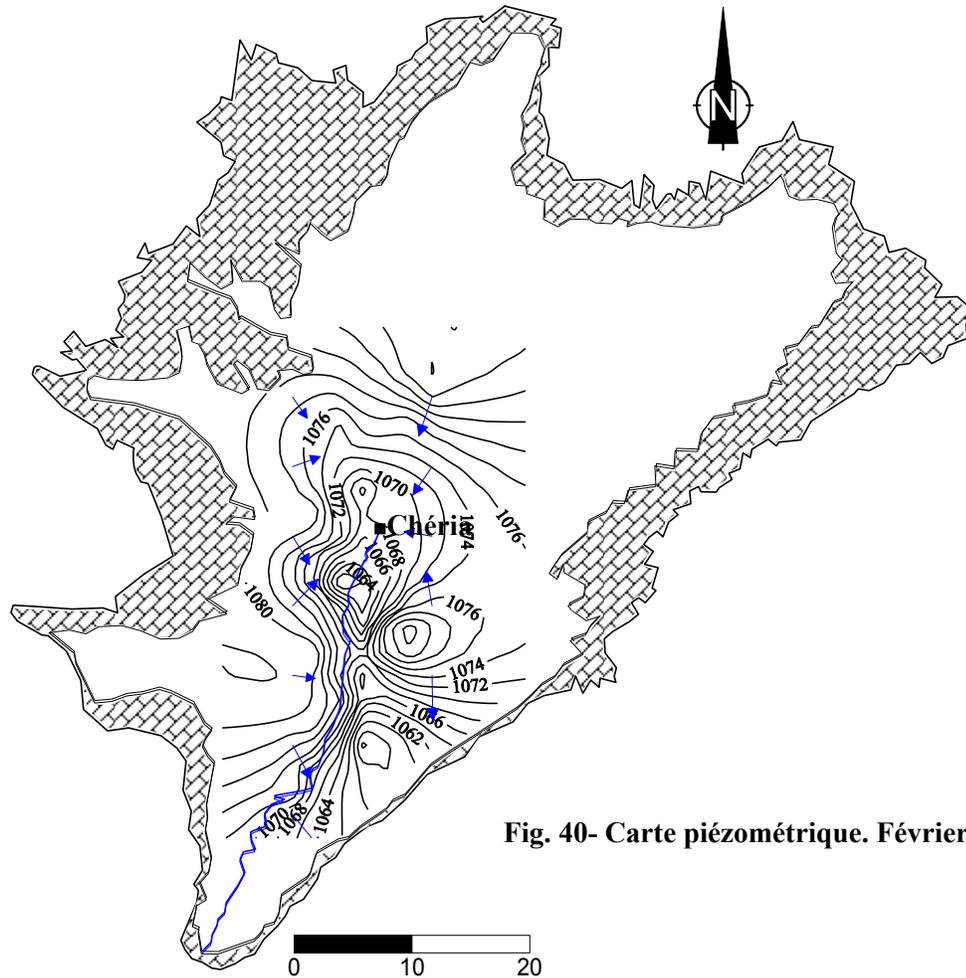


Fig. 40- Carte piézométrique. Février 2005

3.1.4. Campagne du mois de septembre 2005. (fig.41)

Pour cette carte, le scénario est caractérisé par un écoulement nord-sud au nord avec des courbes isopièzes très serrées témoignant l'importance de la vitesse d'écoulement et en aval au Sud avec des courbe espacées signifiant un écoulement lent. Une zone de surexploitation très remarquable au centre. Le resserrement est probablement lié à la diminution de la section d'écoulement.

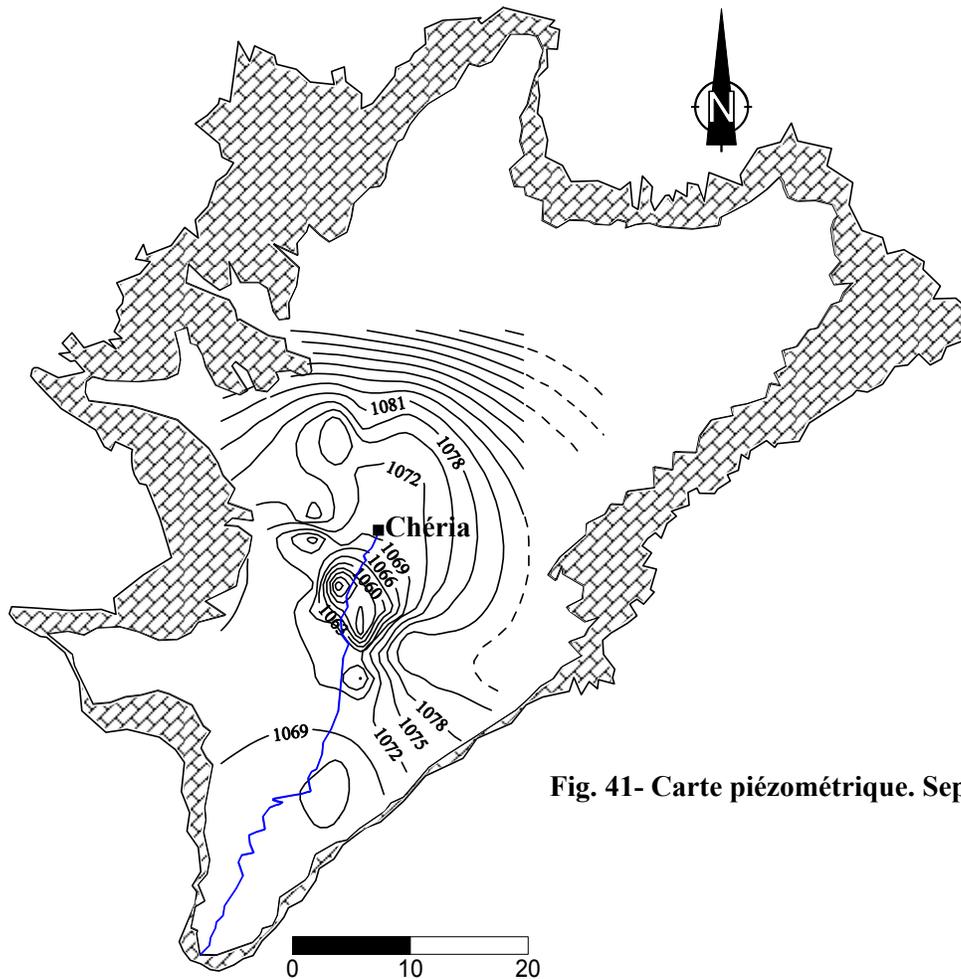


Fig. 41- Carte piézométrique. Septembre 2005

Il est bien noté que l'or de l'étude hydrogéologique de Gaud (1978) sur la région a pu conclure que les calcaires éocènes alimentaient le Mio-Plio-Quaterner spécialement dans la périphérie de Chéria vu les niveaux légèrement plus élevés dans les calcaires éocènes que dans le quaternaire. Alors que dans notre cas on a trouvé l'inverse, ce qui peut confirmer la sécheresse aiguë qui a touché la région.

3.2. Evolution de la profondeur du plan d'eau dans le temps et dans l'espace

Pour cet objectif, on a pu dresser des graphiques de l'évolution de la profondeur en eau, pour les puits 33, 48, 89, 40, 99 et 18 depuis 1993 jusqu'à septembre 2005. Deux autres profils en long, le premier du Nord-Est au Sud-Ouest, et du Nord Nord-Ouest au Sud Sud-Est d'une période de cinq ans de juin 2000 à septembre 2005.

D'une façon générale ce qu'on peut remarquer pour les figures 42,43 et 44 que le niveau d'eau est en abaissement pour la période entre 2000 et 2005 ce qui peut être expliqué par la sécheresse qui a touché la région. Pour les figures la variation n'est pas régulière et qui peut être du, soit à une alimentation temporaire ou à une surexploitation et un manque de précipitation.

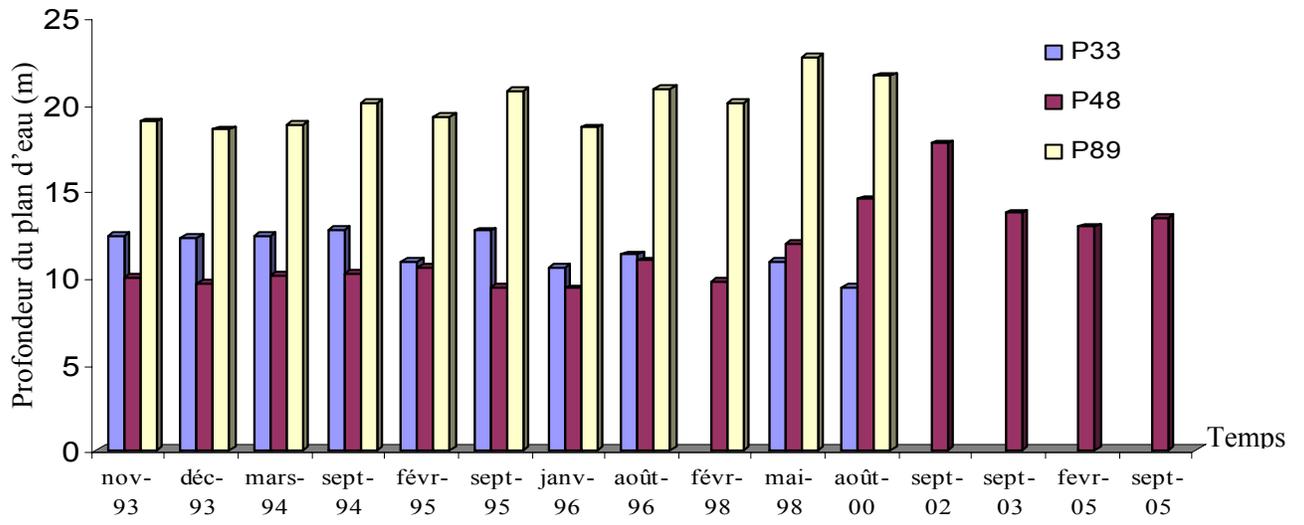


Fig. 42- Evolution de la profondeur du plan d'eau dans le temps : (1993 - 2005)

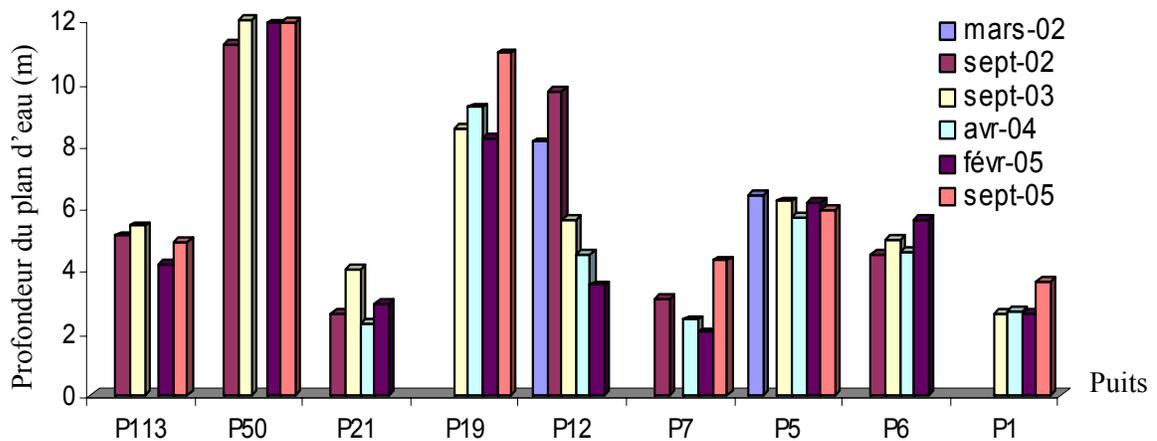


Fig. 43- Evolution de la profondeur du plan d'eau dans le temps et dans l'espace : (1993 - 2005)

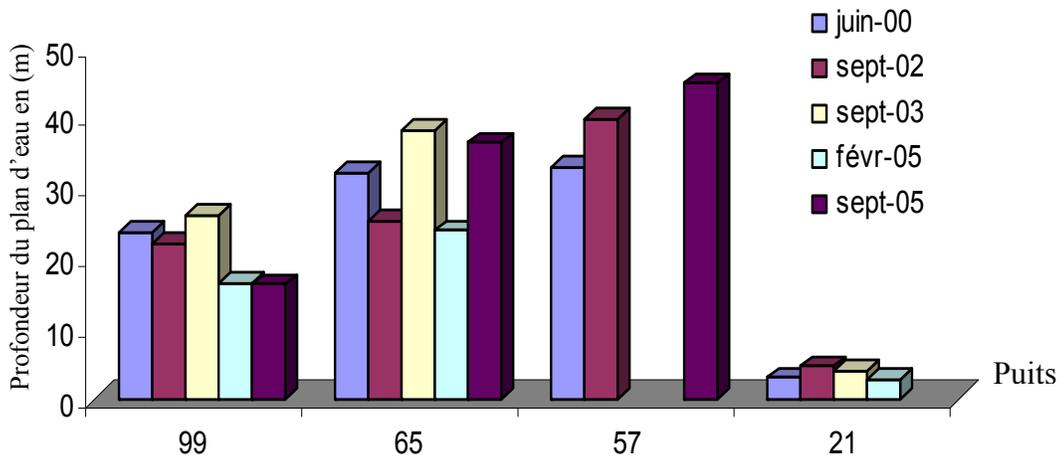


Fig. 43- Evolution de la profondeur du plan d'eau dans le temps et dans l'espace : (1993 - 2005)

3.3. Les conditions aux limites. Figure 45

Les forages implantés dans les calcaires maestrichtiens ont montré que cette horizon est aquifère aux bordures et stérile au centre du plateau (sondage J8-9 800 m de profondeur) ce qui permet un écoulement vers le Nord et donne naissance à des importantes sources tel que la source de la grotte de Bouakkous.

Cet horizon serait important de l'étudier dans le fossé d'effondrement de Tébessa el Hamamet. Notons que l'écoulement est Nord Sud pour le quaternaire qui surmonte les calcaires maestrichtiens.

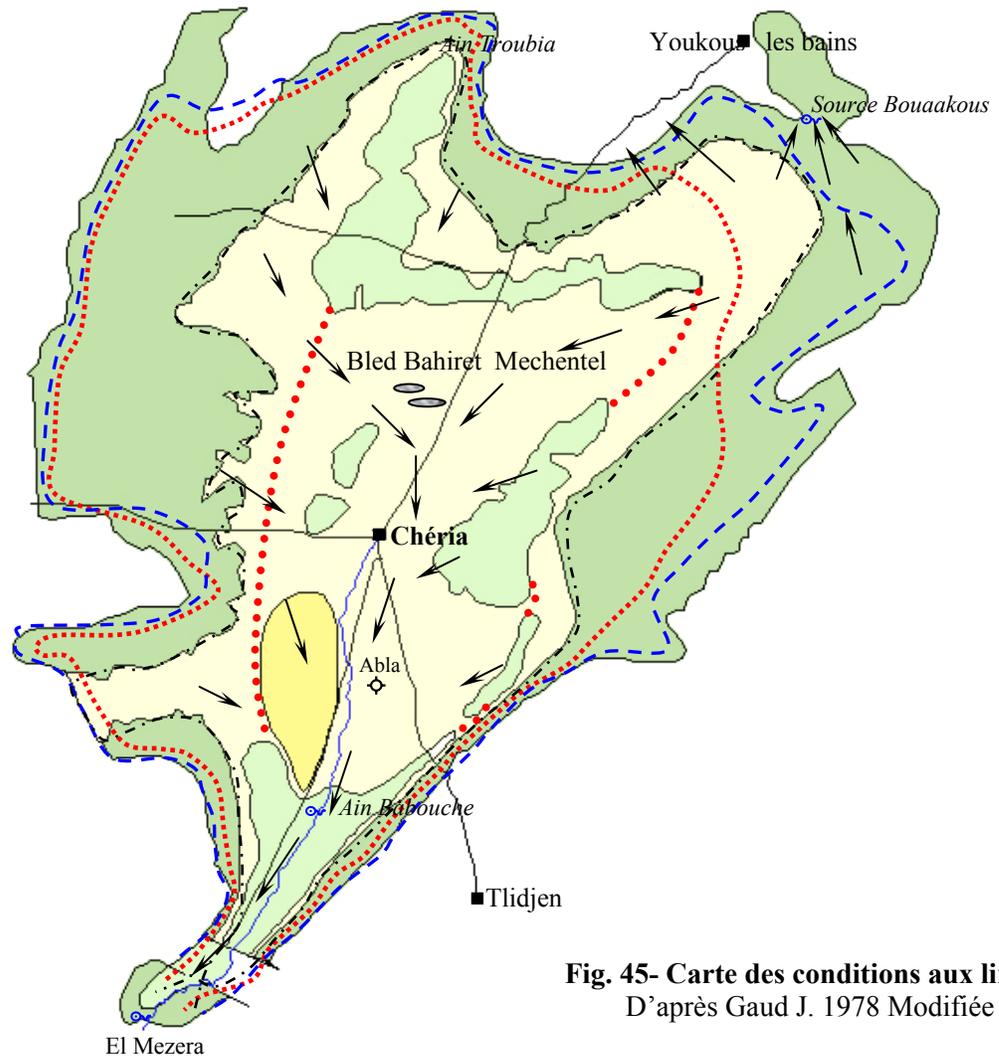


Fig. 45- Carte des conditions aux limites.
D'après Gaud J. 1978 Modifiée

Légende :

- | | | | |
|---|--|---|--------------------------|
|  | : Limite du bassin versant nappe Maestrichtienne |  | : Calcaire Maestrichtien |
|  | : Limite à flux nul |  | : Calcaire éocène |
|  | : Limite perméable nappe éocène |  | : Plio Quaternaire |
|  | : limite souterraine des calcaires éocènes (perméable) |  | : Sables miocènes |
|  | : Sens d'écoulement |  | : Affaissement |

Les calcaires éocènes sont en contact avec les alluvions quaternaires aquifères (qui souvent drainent les calcaires maestrichtiens). Il y a donc une limite perméable d'alimentation.

Vers le Sud on doit admettre une limite de fuite souterraine si l'on arrête le sens d'alimentation d'Outa Oum Khaled.

La nappe du Mio-Plio-Quaternaire est alimentée directement par la pluie et l'éocène adjacent.

3.4. La transmissivité et coefficient d'emménagement.

Les valeurs de la transmissivité dont on dispose sur la région sont déterminées sur forages, à partir des pompages d'essai, réinterprétés par la méthode du BRGM. Elles varient dans une très large gamme (annexes),

4. L'HYDROCHIMIE DES AQUIFERES

L'étude de la chimie des eaux souterraines, apporte un concours précieux à l'hydrogéologie. C'est une méthode simple de prospection qui complète utilement les cartes piézométriques. Elle permet de comparer les eaux entre elles et de résoudre, pour une couche aquifère donnée ou une structure hydrogéologique, des problèmes d'alimentation, de drainage et d'écoulement (Castany, 1968).

Une eau souterraine renferme une teneur en substance minérale dissoute d'origine naturelle géologique : le bruit de fond (Castany, 1982). Cette composition est le résultat d'un ensemble de mécanismes d'interaction entre l'eau et le réservoir (dissolution, précipitation, échange ionique). Afin d'obtenir des informations de reconstruire le cheminement géochimique qui a donné la qualité actuelle des eaux.

Les phénomènes hydrogéologiques et hydrochimiques sont étroitement liés et le choix de la méthode pour caractériser et classer les eaux souterraines est fonction de la qualité et la quantité des données disponibles, de leur répartition dans l'espace et dans le temps et évidemment du type de problème à étudier.

Cette partie fera l'objet de la caractérisation hydrochimique des eaux souterraines karstiques, et la détermination de l'origine d'éventuelle pollution.

4. 1. Échantillonnage et analyse

Plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été réalisées au cours de cette étude (huit campagnes, entre 2002 et 2005), d'un pas de temps respectant généralement les périodes basses et hautes eaux). En plus des campagnes chimiques des études antérieures qui vont être prise comme référence (les études de : Gaud, 1978 et Zenati 1993 ANRH Tébessa).

Le choix et le nombre de puits étudiés n'a pas été régulier, d'une campagne à l'autre, car nous étions limités par la distribution non régulière des puits (la densité dans le sous bassin sud est beaucoup plus importante qu'au sous bassin nord), l'accès aux puits (présence de propriétaire, route inaccessible après les pluies), la possibilité d'échantillonnage (équipements des puits à diamètre réduit, puits à sec...etc.).

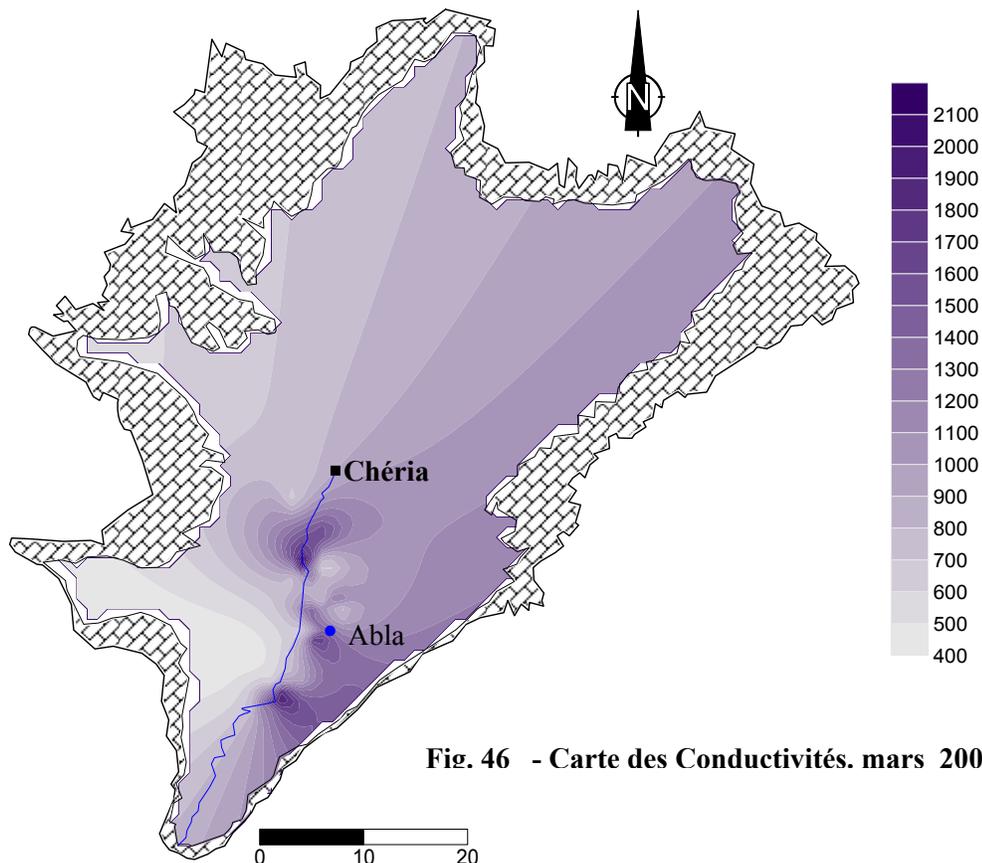
Les échantillons d'eau destinés aux analyses chimiques ont été recueillis dans des bouteilles en polyéthylène et les paramètres physico-chimiques ont été déterminés in situ. Les prélèvements destinés au dosage des nitrates ont été filtrés sur membrane millipore à l'aide d'une pompe à vide manuelle et ont été conservés à $\text{pH} = 2$ avec de l'acide sulfurique pour inhiber l'activité bactériologique, les mesures des nitrates ainsi que les chlorures, bicarbonates et les sulfates ont été effectuées avec un spectrophotomètre (wtw2000). Elles ont été complétées par celles des autres éléments majeurs (Ca, Mg, Na, K, B, Po_4 ...) dosés par chromatographie en phase liquide. Les analyses chimiques des eaux ont été réalisées au laboratoire de Chimie de l'université de Lille1.

4. 2. Les paramètres physico-chimiques

Il s'agit des paramètres utiles pour la détermination de l'état chimique de l'eau.

4. 2.1. Conductivité électrique

La relation entre la conductivité électrique et la composition chimique est basée sur le fait que la conductivité électrique d'une solution saline complexe est la somme des conductivités attribuées à chacun des ions qu'elle renferme (H. Schoeller, 1962).



Les valeurs enregistrées montrent que pour la quasi-totalité des points d'eau (puits et forage) dépassent la norme recommandée pour les eaux d'alimentation en eaux potables et la cartographie de ce paramètre montre une élévation remarquable dans la partie sud du terrain (2000 – 5000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et peut atteindre parfois même 10000 $\mu\text{s}/\text{cm}$, septembre 2005 (fig. 49))

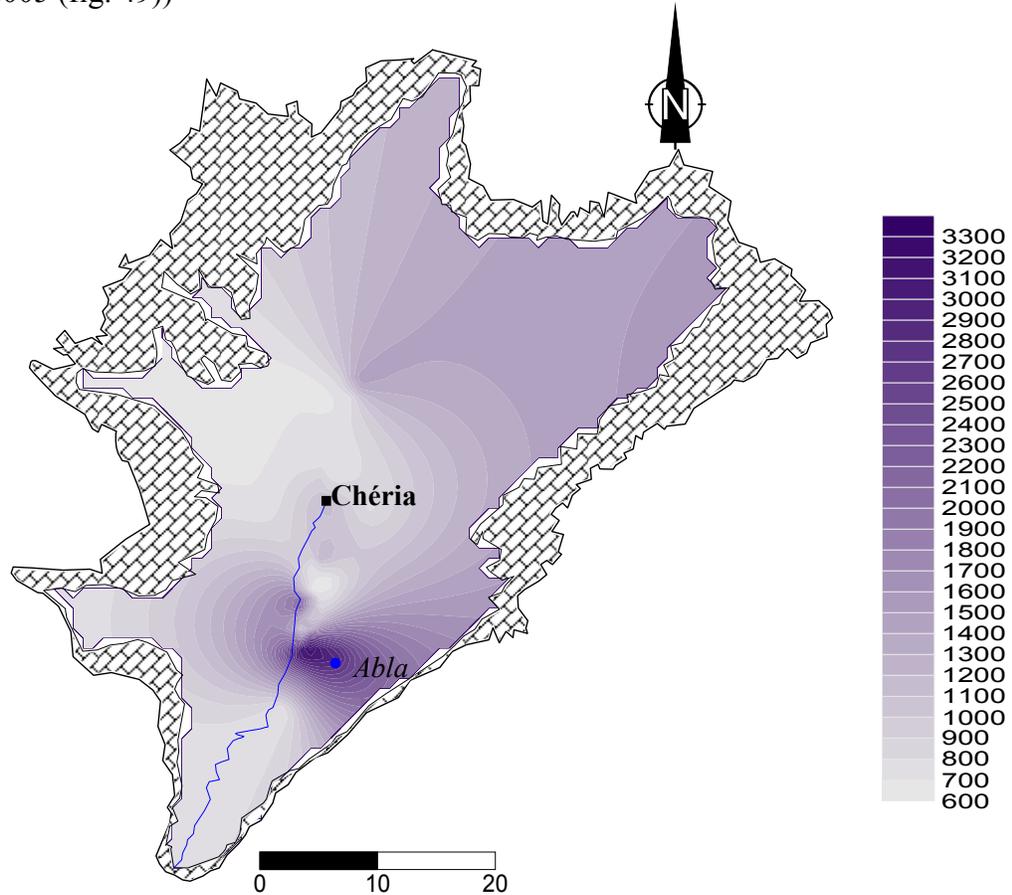


Fig. 47 - Carte des Conductivités Septembre 2002

La variation de la conductivité est très remarquable au Sud, notamment au lieu dit *Abla*, qui peut être expliqué par plusieurs facteurs d'ordre hydrodynamique tel que la recharge en cet endroit et les écoulements du Nord qui sont très chargés et qui permettent la concentration des éléments chimiques, ainsi qu'une éventuelle contamination par les eaux de l'oued Chéria qui draine les eaux usées de la ville du même nom.

Les valeurs de la conductivité, sur la figure 47 ont été doublées par rapport aux valeurs de la carte 46, du probablement au phénomène de l'évapotranspiration.

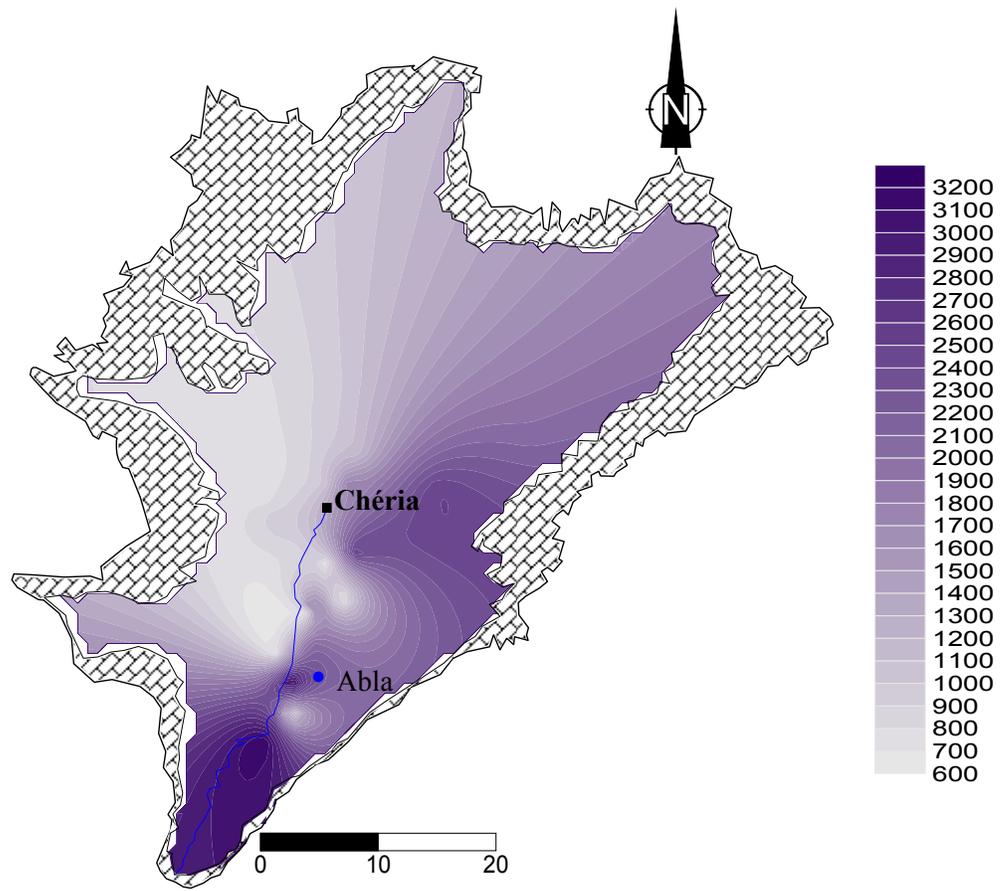


Fig. 48 - Carte des conductivités Février 2005

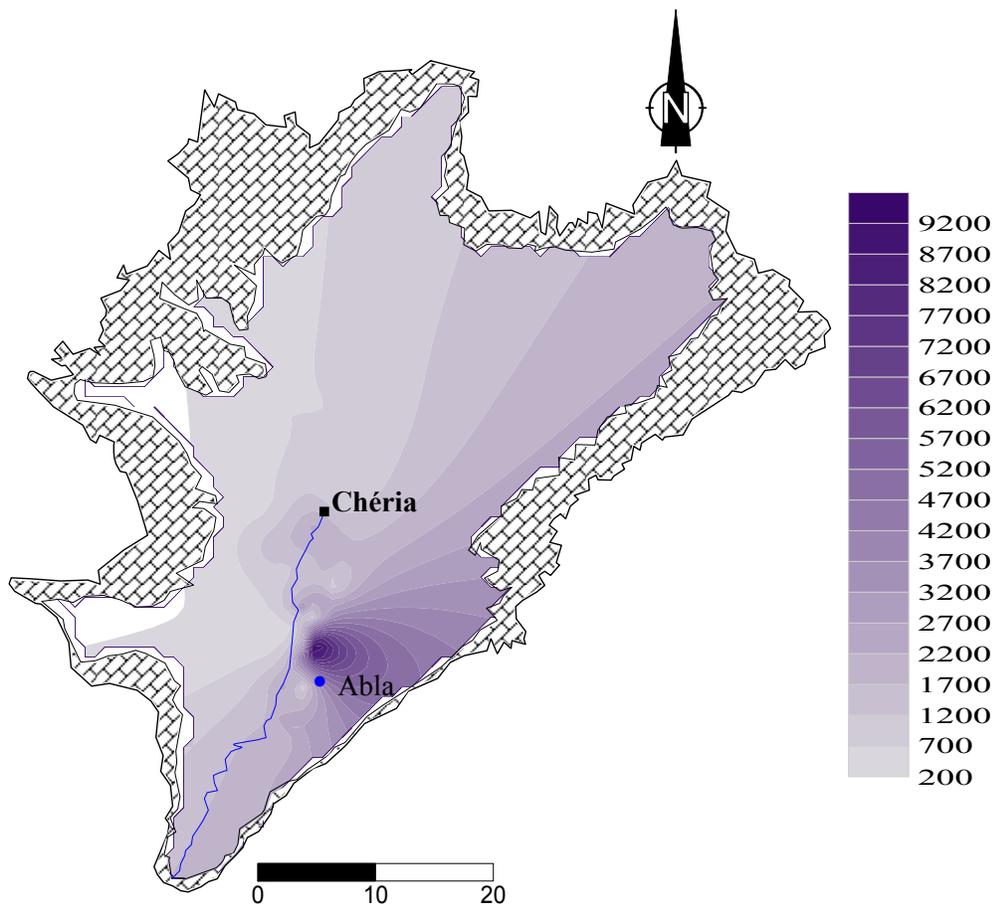


Fig.49 - Carte des conductivités Septembre 2005

4. 2.2. Le potentiel hydrique (pH)

On l'utilise pour déterminer l'alcalinité et l'acidité des eaux. Le pH est cologarithme de (H⁺) et correspondant à la concentration $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$. Cependant, certains auteurs ont de bonnes raisons de penser que, H⁺ étant une particule subatomique, un proton ne peut exister à l'état libre. Il faudrait remplacer la notion d'ion H⁺ par celle d'ion H₃O⁺, l'hydroxynium ou hydronium (H. Schoeller 1962). Presque toutes les eaux de la région d'étude étaient admissibles pour l'alimentation humaine, car elles oscillent dans les compagnes de mesure entre 6,5 et 8,5.

4.3. Les paramètres chimiques

4.3.1. La cartographie chimique

Les données de l'hydrochimie sont représentées sur des cartes, les principales cartographiées dans notre étude, sont les éléments majeurs (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, HCO₃⁻, SO₄⁻, Cl⁻) voir annexe N° D'une manière générale, la cartographie chimique, pour tous les éléments étudiés, dans ce travail, révèle clairement deux zones distinctes. Une au Nord pour des concentrations moins importantes que dans la seconde zone au Sud, le théâtre des concentrations élevées et dans la majorité des cas au-dessus des seuils de potabilité.

4.3.2. Les faciès chimiques

Pour mieux déterminer le faciès chimique des eaux de la région d'étude, une représentation graphique sur le diagramme triangulaire de PIPER (Fig.50. a, b, c, d) a été effectuée à partir des résultats analytiques obtenus pour les compagnes septembre 2002, avril 2003, février et septembre 2005. Cette représentation a montré une dominance remarquable du faciès chloruré magnésien ou chloruré calcique, qui masque le faciès bicarbonaté dans les eaux de la région, connues par une présence abondante de la roche carbonatée (calcaire maestrichtien et éocène):

4.3.3. Etude de l'évolution des minéraux et des éléments dissous

Cette étude est relative aux points d'eau échantillonnés pendant le mois de février 2005, un calcul de l'indice de saturation des minéraux dissous dans l'eau a été mené en utilisant la loi de DEBYE-HUCKEL. Le calcul de cet indice par le logiciel WATEQ (in Plummer et al 1984).

L'indice de saturation atteint une valeur zéro, quand la saturation est en équilibre avec une phase solide. Un indice de saturation positif indique une sursaturation et un indice négatif indique une sous-saturation vis à vis des minéraux. Sachant que ces derniers peuvent influencer la composition chimique de l'eau (in Guefaifia, O 1996)

- On constate que pour l'aragonite, la calcite et la dolomite presque le même scénario, car une sursaturation au niveau des puits 21, 39 et 40 et un équilibre aux puits

25bis, 50, 59 et 63. Tandis que pour le reste des points c'est la sous-saturation de ces minéraux qui règne (fig. 51).

- Pour le gypse et l'anhydrite une sous-saturation aux niveau de tous les points d'eau échantillonnés.

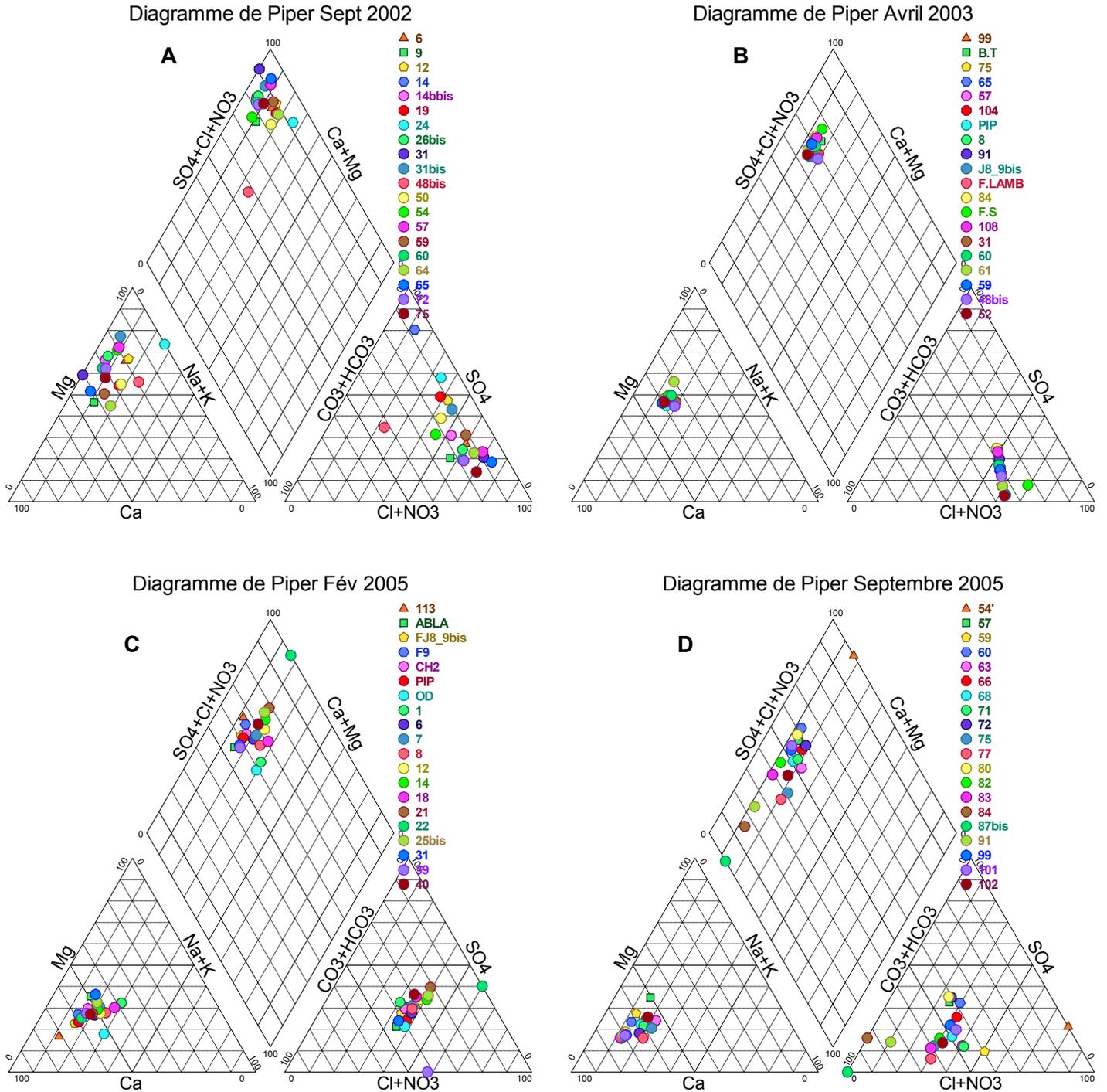


Fig. 50 – Les diagrammes de Piper

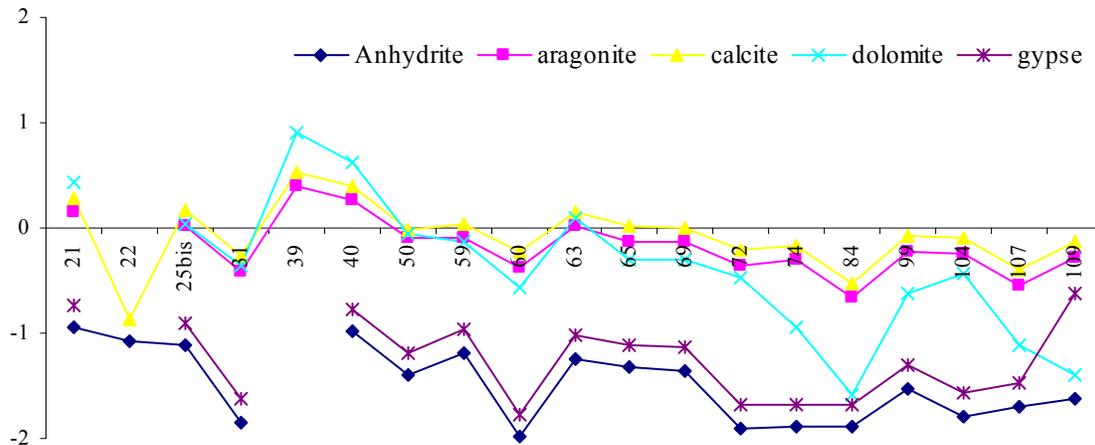


Fig. 51 -Evolution de l'indice de saturation des minéraux février 2005

La répartition dans l'espace de l'indice de saturation de la calcite montre, que la sursaturation ou l'équilibre se fait dans la partie nord ce qui explique la dissolution de la calcite due à la présence des formations calcaires de l'éocène, contrairement à la partie aval (sud) où la présence des formations Mio-Plio-Quaternaire (des alluvions) (annex).

La cartographie de l'indice de saturation des gypses, montre un scénario tout à fait différent, que celui de la calcite (la saturation du gypse au Sud). Cette dernière est due à la présence des formations Mio-Plio-Quaternaire, qui peuvent contenir des passages argileux, l'origine de la dissolution des gypses.

4.3.4. Représentation en composante principale (ACP)

Pour comprendre les mécanismes régissant la qualité des eaux de la région, nous avons utilisé l'outil statistique particulièrement l'analyse en composantes principales. Cette dernière met en évidence les liens qui semblent exister entre les éléments chimiques (Travi et Mudry, 1997). Deux ACP ont été effectués sur les observations réalisées sur les eaux de la région :

4.3.4.1. ACP1 (Mars 1993 fig.52. a) :

Le cercle formé par les axes F1 et F2 (71% de l'information totale), montre une opposition entre les eaux fortement minéralisées et les eaux faiblement minéralisées. NPK.

Selon l'axe F2, les eaux riches en nitrates et potassium, accompagnées par les bicarbonates et le magnésium, s'opposent aux eaux riches en Na et Cl. Cette distribution indique probablement une opposition entre deux minéralisations, l'une endogène d'origine géologique (Na, Cl) et l'autre exogène due aux nitrates engendrées par les engrais de type NPK.

4.3.4.2. ACP2 (Octobre 2000 fig.52. b) :

Ce traitement prend en compte les nitrates, les nitrites et l'ammonium. L'axe F1 (avec 48.5 % de l'inertie totale), indique une opposition entre les eaux fortement minéralisées caractérisées par les bicarbonates (HCO_3), le calcium (Ca), le sodium (Na), les chlorures (Cl) et le magnésium (Mg). Selon l'axe F2 il existe une opposition entre les

nitrate, le potassium, l'ammonium d'un coté (partie positive de l'axe) et les nitrites de l'autre (partie négative de l'axe).

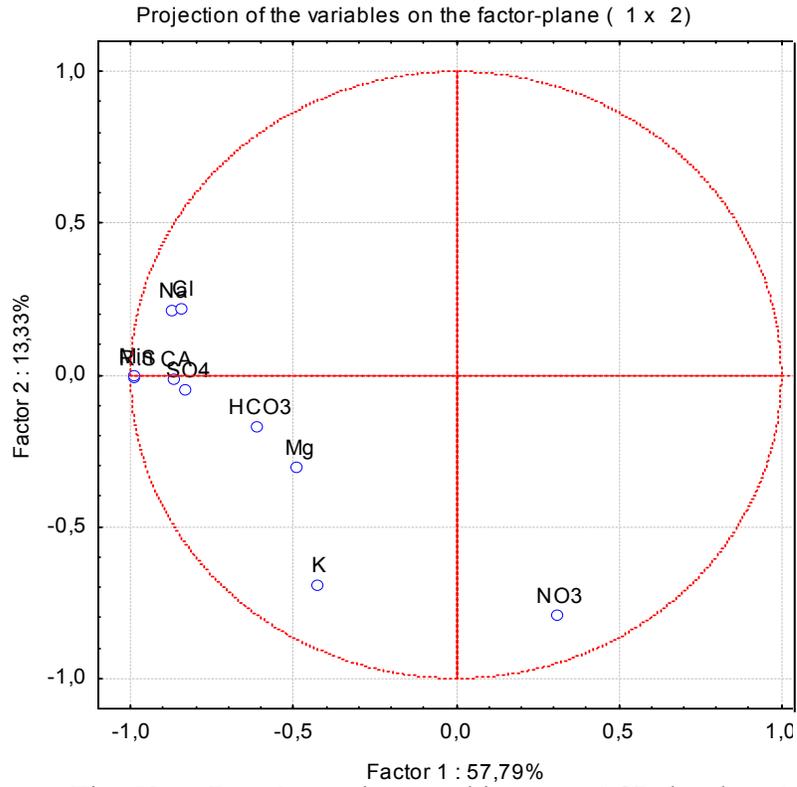


Fig. 52.a - Représentation graphique en ACP des données

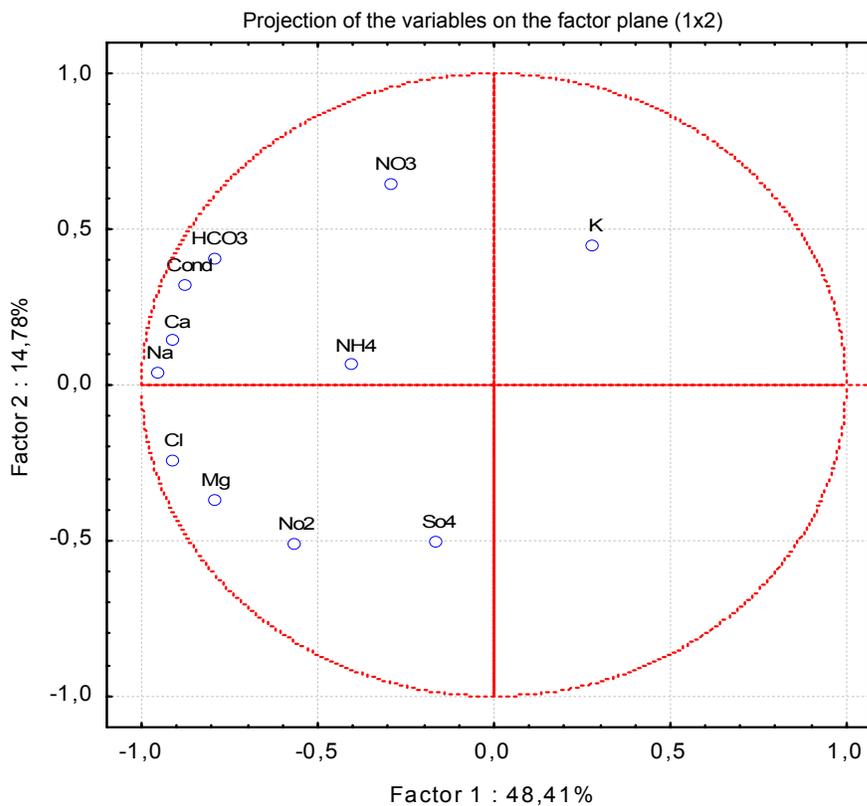


Fig.52.b - Représentation graphique en ACP des données chimiques octobre

L'interprétation de l'analyse en composantes principales a mis en évidence une pollution des eaux de la plaine de Chéria par les nutriments.

4.3.5. Etude des rapports caractéristiques

On appelle rapport caractéristique, le rapport de certains éléments chimiques exprimé en quantité en réaction. Ces rapports donnent de précieuses indications sur l'alimentation et le sens d'écoulement.

Dans cette étude on a utilisé les données de 4 campagnes chimiques (septembre 2002, avril 2003, février et septembre 2005), pour cette même raison pour pouvoir tirer le maximum d'information qui peuvent donner.

4.3.6. 1. Carte du rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$

Le rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ présente différents états au cours de la période d'observation, il est inférieur à l'unité en septembre 2002 et en avril 2003 (fig. 53 et 54) ce qui montre une dominance du Magnésium.

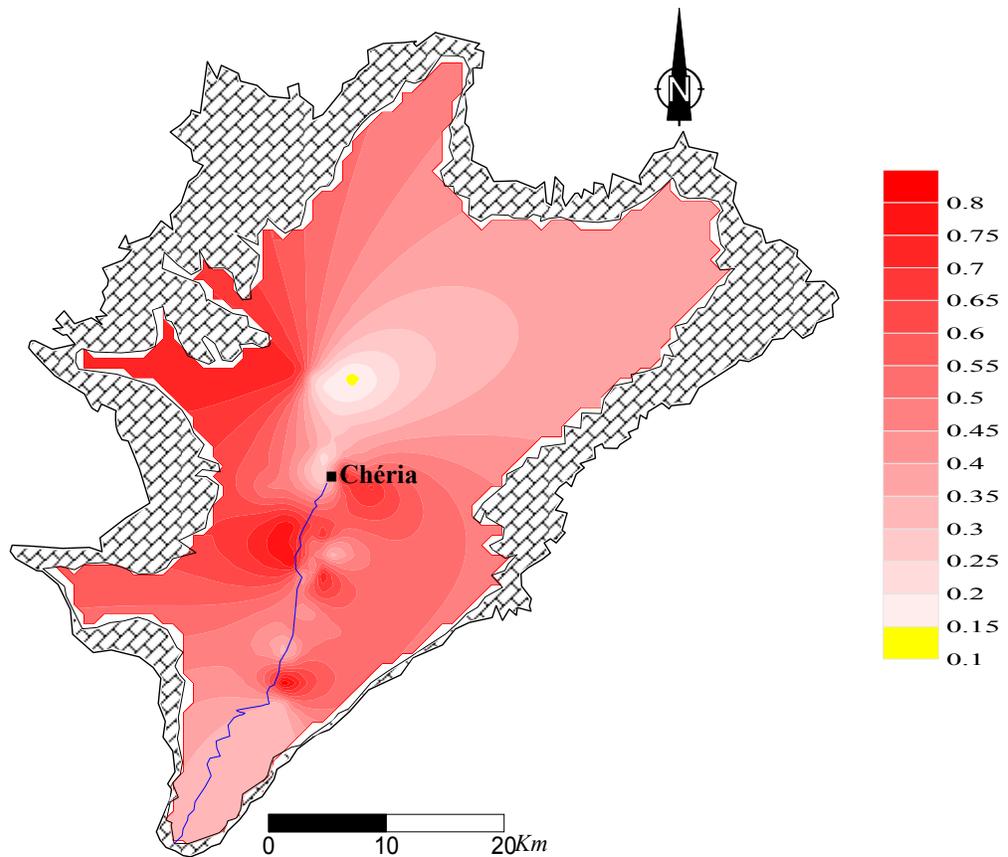


Fig.53 – Carte du rapport caractéristique $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$. Septembre 2002.

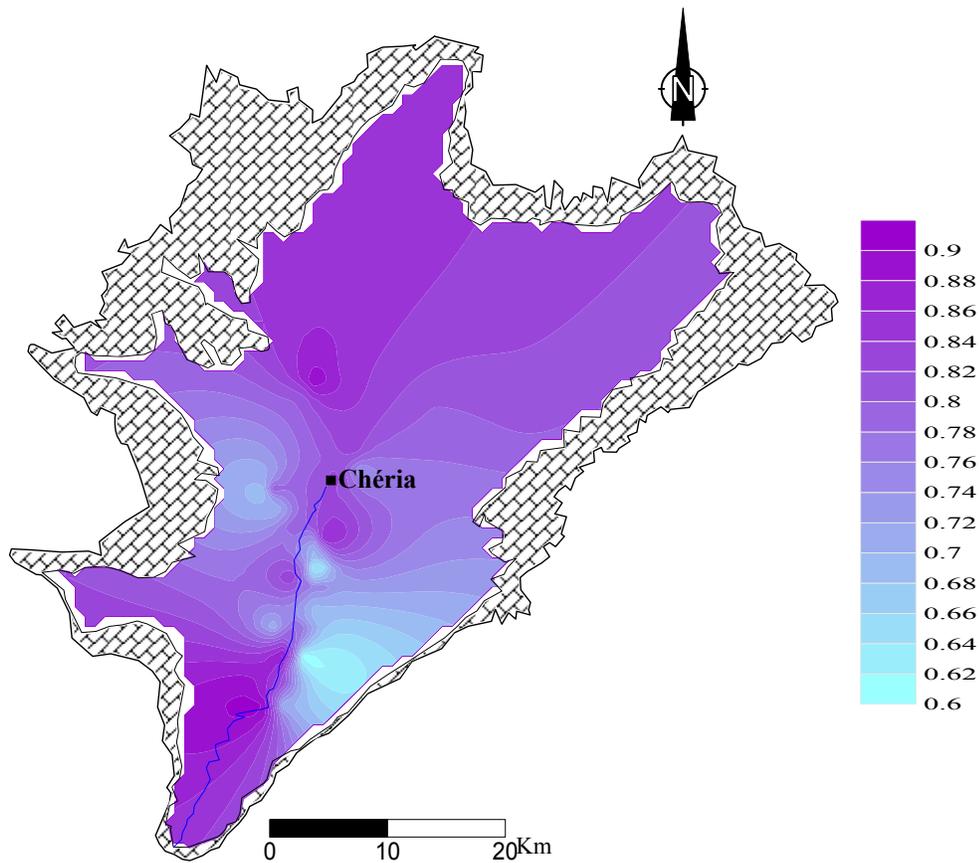


Fig.54 – Carte du rapport caractéristique Ca^{2+}/Mg^{2+} . Avril 2003.

Pour les autres périodes; février et septembre 2005 (fig. 55 et 56), le rapport est supérieure à l'unité ce qui confirme la dominance du sodium.

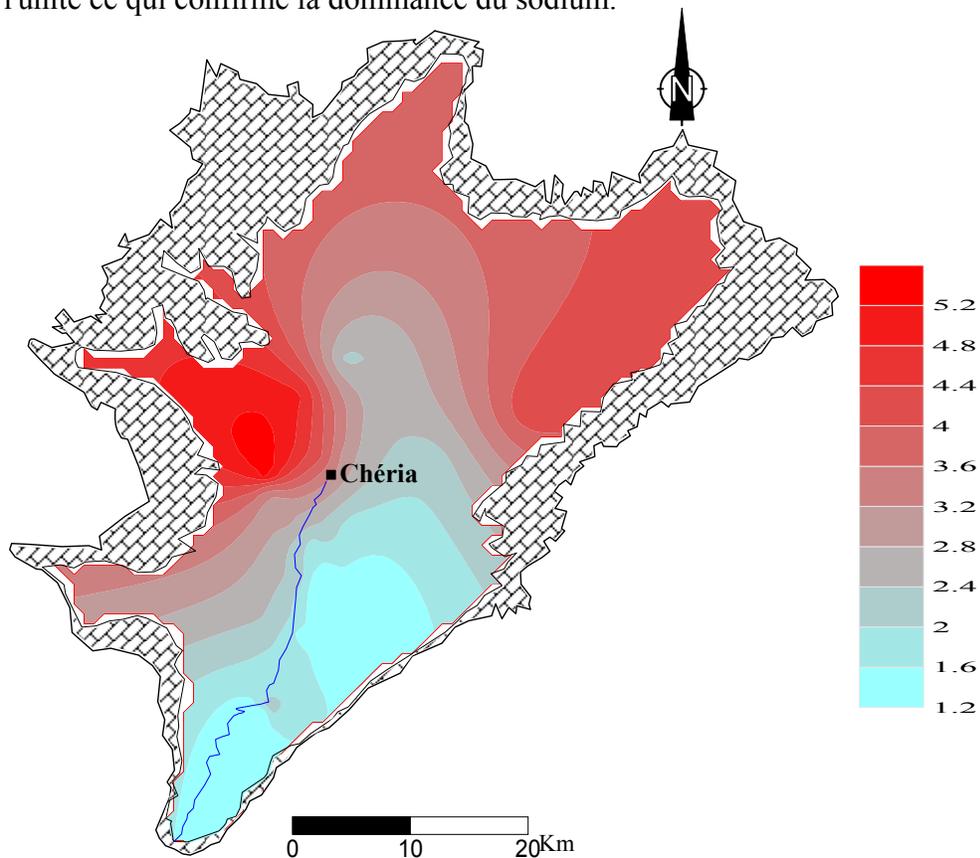


Fig.55 – Carte du rapport caractéristique Ca^{2+}/Mg^{2+} . Février 2005.

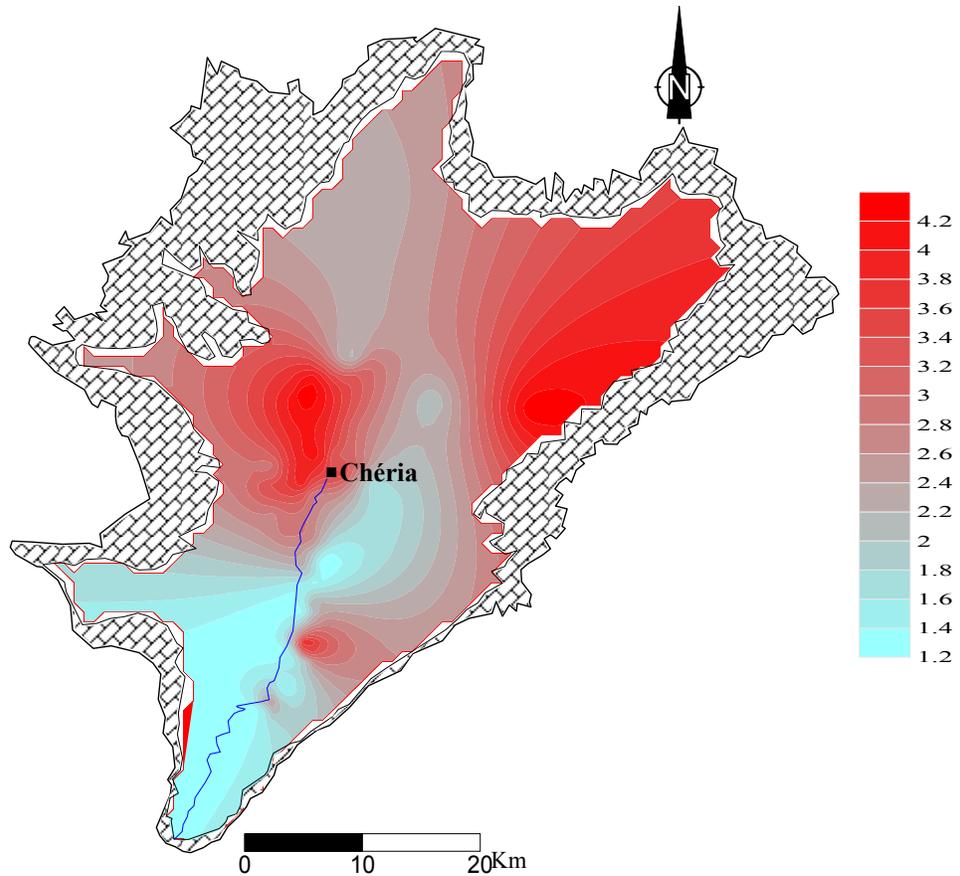
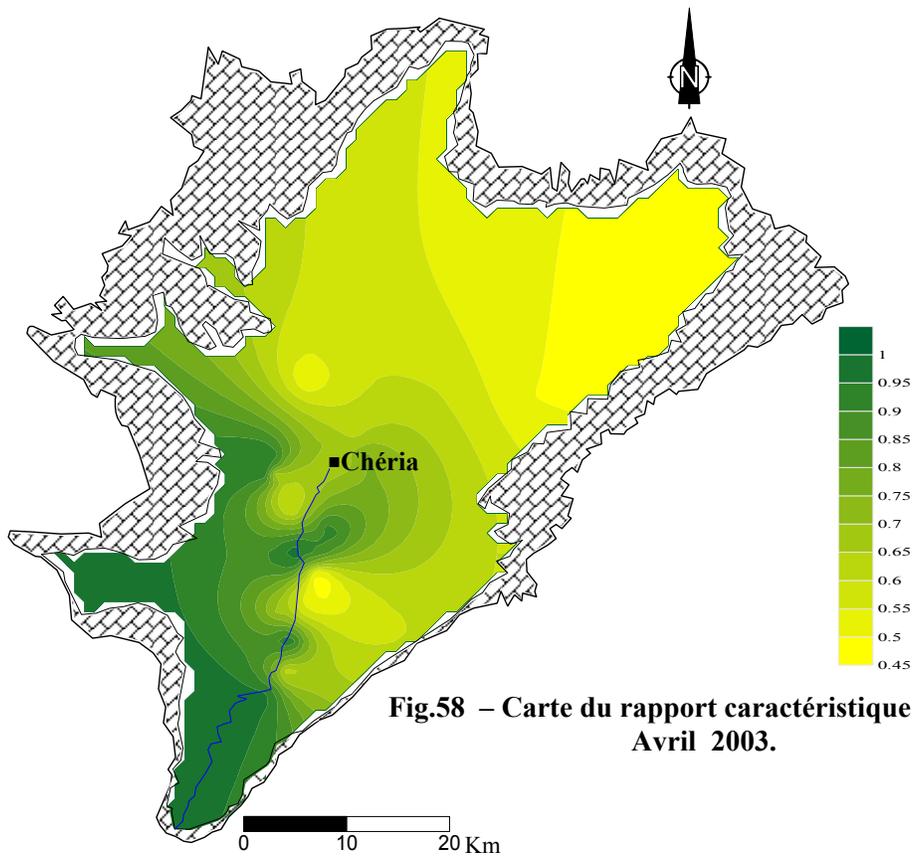
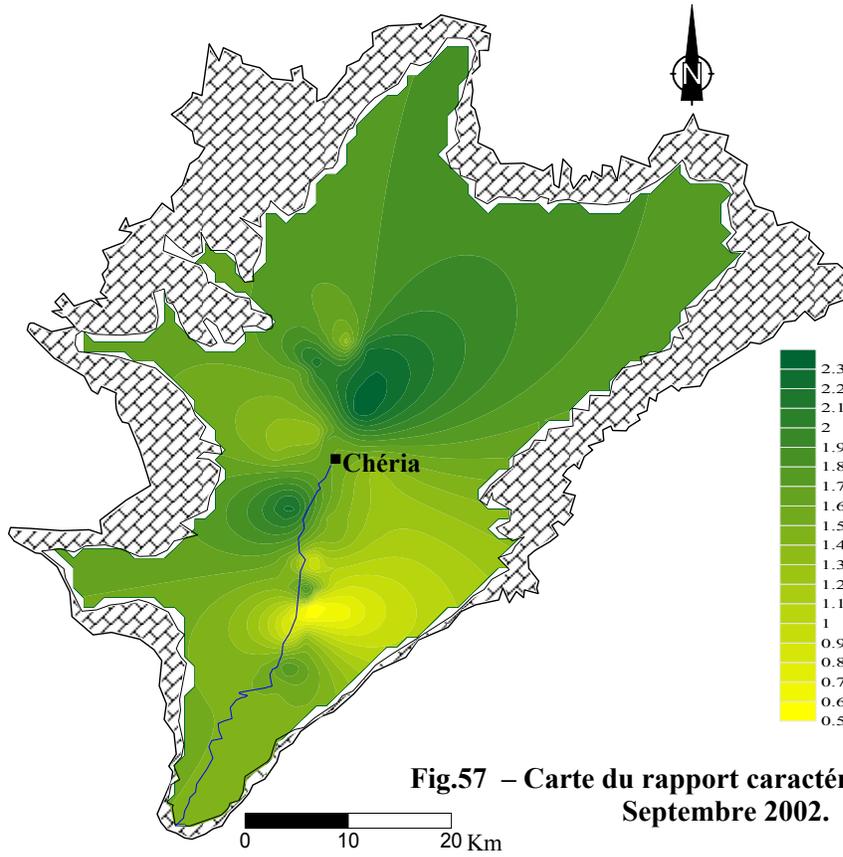


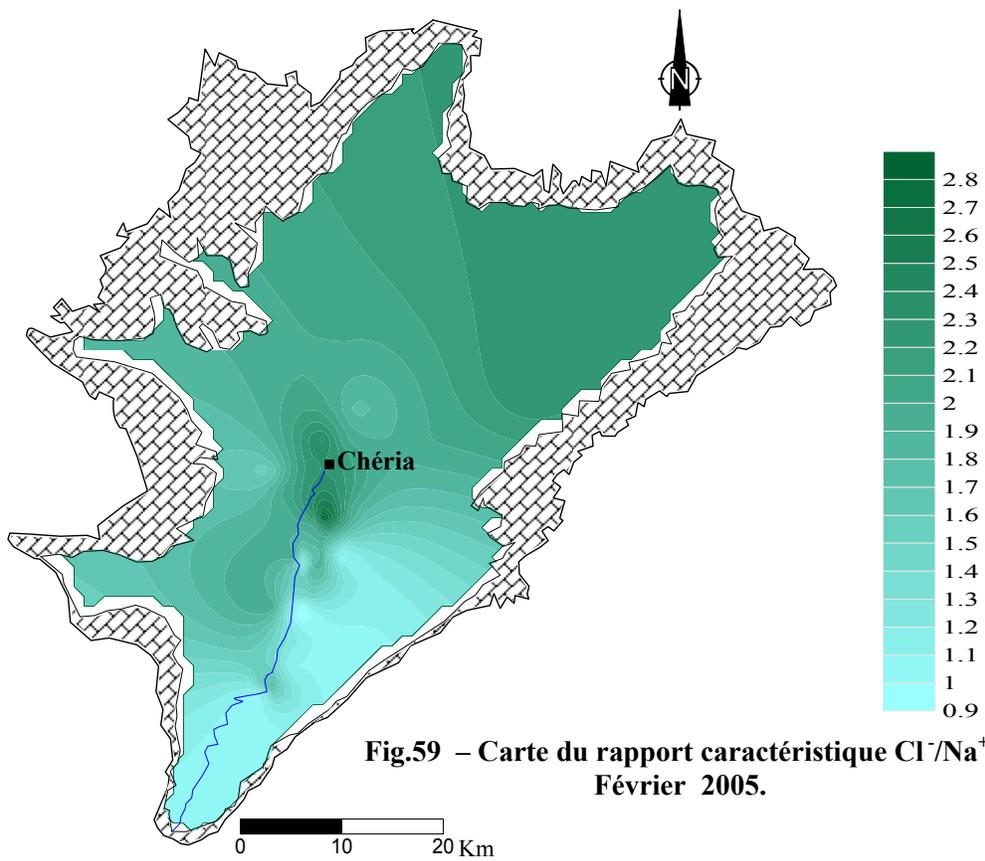
Fig.56 - Carte du rapport caractéristique $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$. Septembre 2005.

4.3.6. 2. Carte du rapport Cl^-/Na^+

La cartographie du rapport Cl^-/Na^+ , montre que les valeurs inférieures à l'unité se situent nord pour la période de septembre 2002, et à l'extrême sud pour la période avril 2003. Signifiant une dominance du sodium alors que des valeurs inférieures à l'unité au sud pour la période de septembre 2002 et au nord pour la seconde période, traduisent la dominance des chlorures. (Fig. 57 et 58).

Pour les deux autres périodes (février et septembre 2005) une dominance totale des chlorures est remarquable, sauf à l'extrême sud où le sodium domine. (Fig. 57 et 58),





**Fig.59 – Carte du rapport caractéristique Cl^-/Na^+ .
Février 2005.**

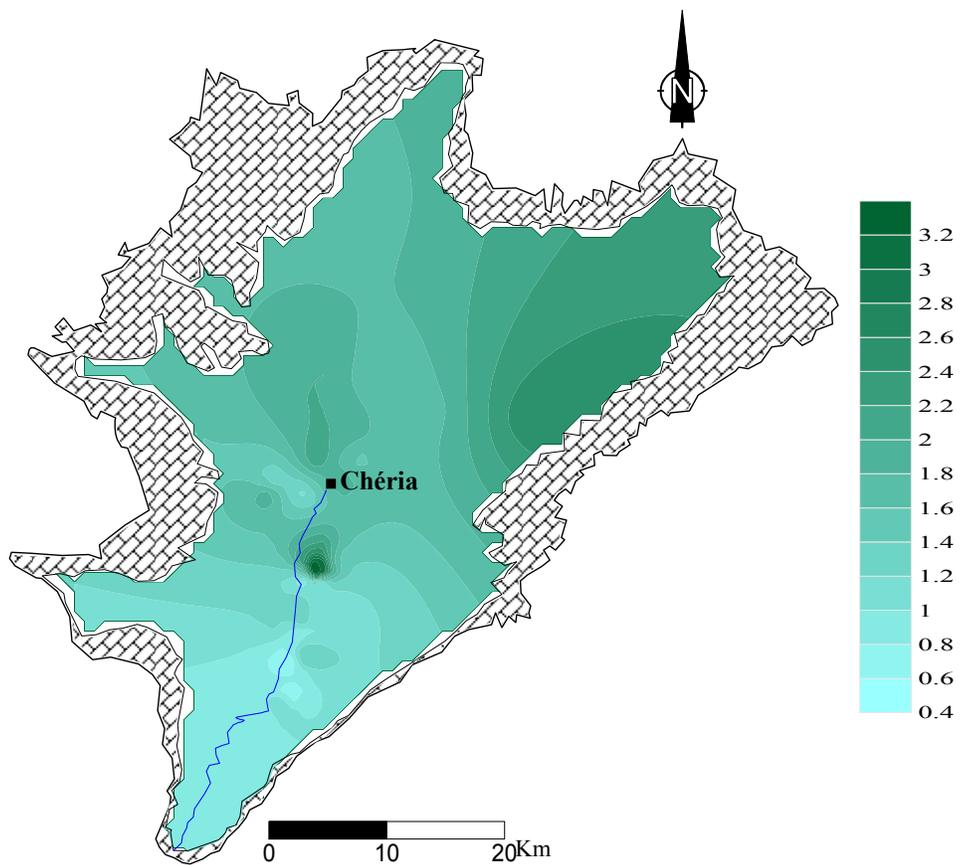
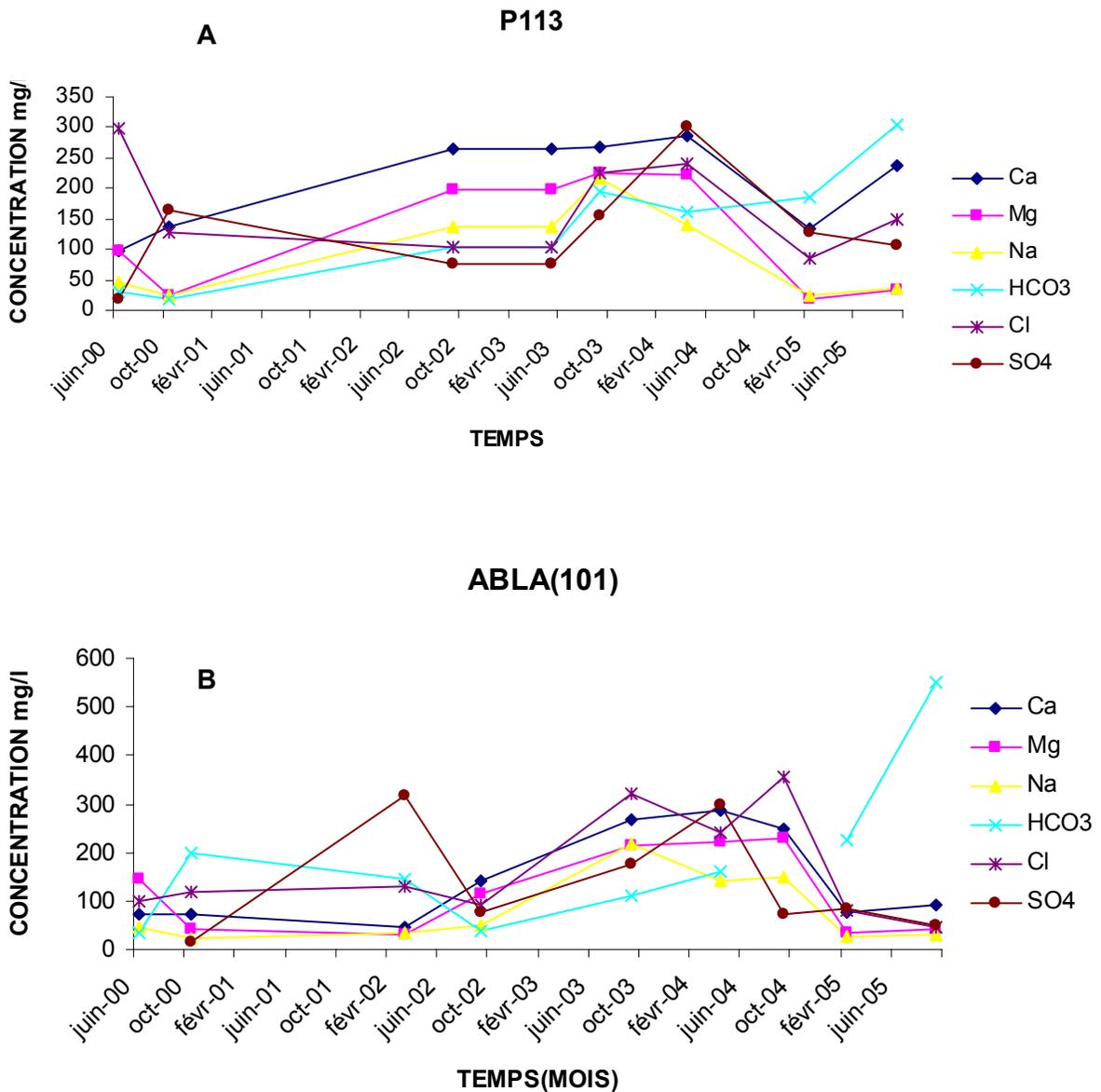


Fig.60 - Carte du rapport caractéristique Cl^-/Na^+ . Septembre 2005.

5. Evolution chimique des eaux souterraines

Pour cet objectif on a sélectionné quelques points d'eau, de l'amont en aval qui ont été suivis depuis les débuts des travaux en juin 2000. Ces profils montrent l'évolution des cations et des anions dans le temps.

Une constatation générale pour les profils établis (Fig. 61. a, b, c, d) montre qu'une tendance à l'augmentation des anions et des cations pour la première période entre 2000 et 2003. par contre, pour le reste de la période de suivie une décroissance des éléments représentés.



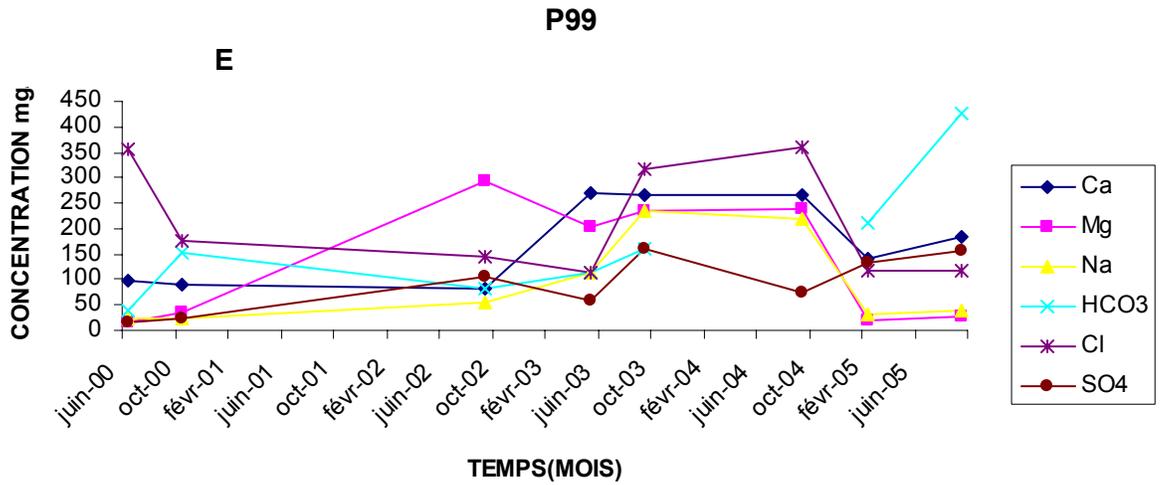
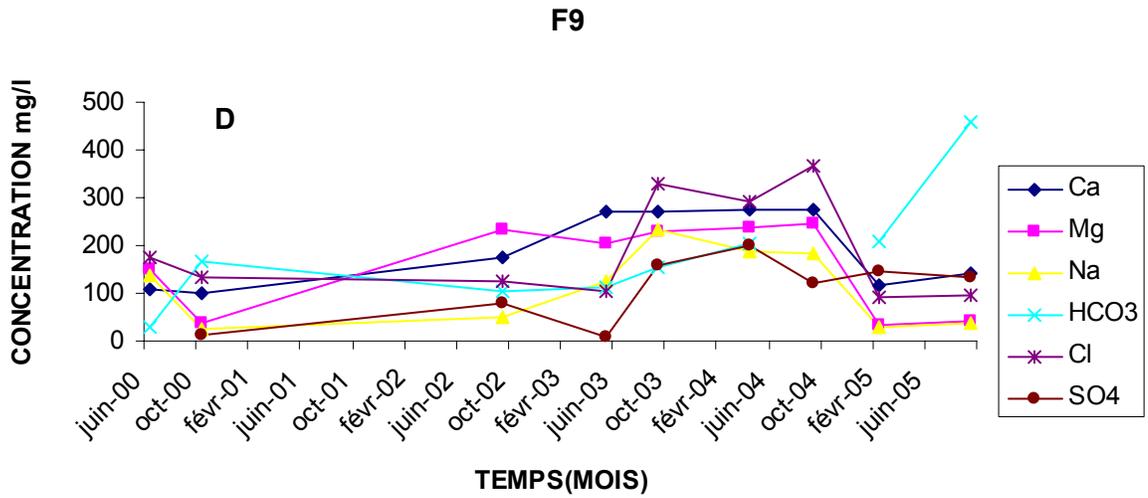
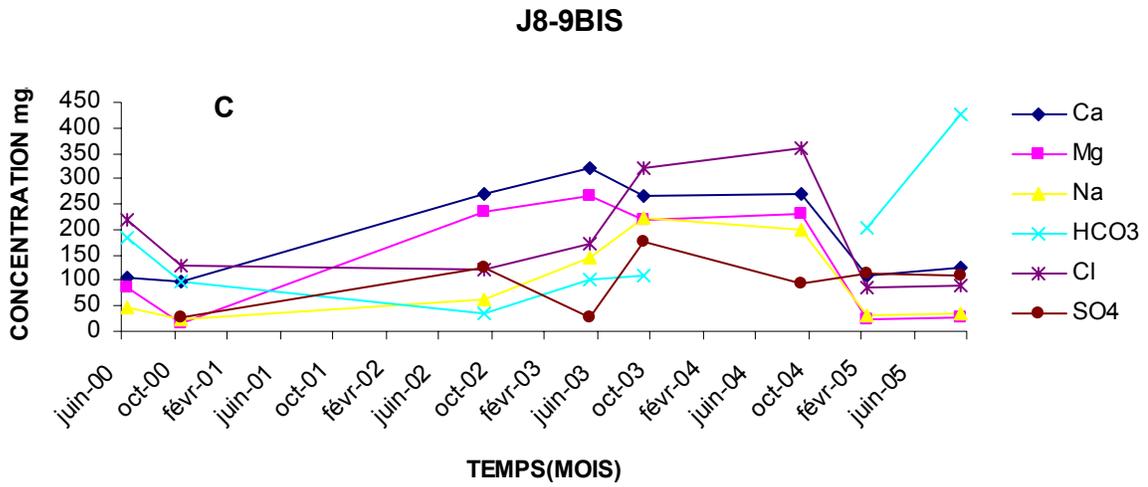


Fig. 61. (a,b,c,d et e) – Evolution du chimisme des puits dans le temps

5.1. La représentation graphique sur le diagramme de Schoeller Berkalff

Cette représentation nous permet de classer les eaux de la région en fonction des concentrations des éléments chimique analysés. Qui peut nous donner des renseignements sur la qualité chimique des eaux, on projetant cette dernière sur le diagramme de potabilité des eaux (B.R.G.M 1993). Cette dernière permet de qualifier les eaux souterraines de la région, dans la classe de potabilité permanente, mais de médiocre à mauvaise (fig. 62. a, b, c, d)

En ce qui suit les diagrammes correspondant à chaque campagne de terrain, dresser sur la base des résultats d'analyse.



Fig. 62.a – Diagramme de Schoeller Berkaloff. Période, septembre 2002

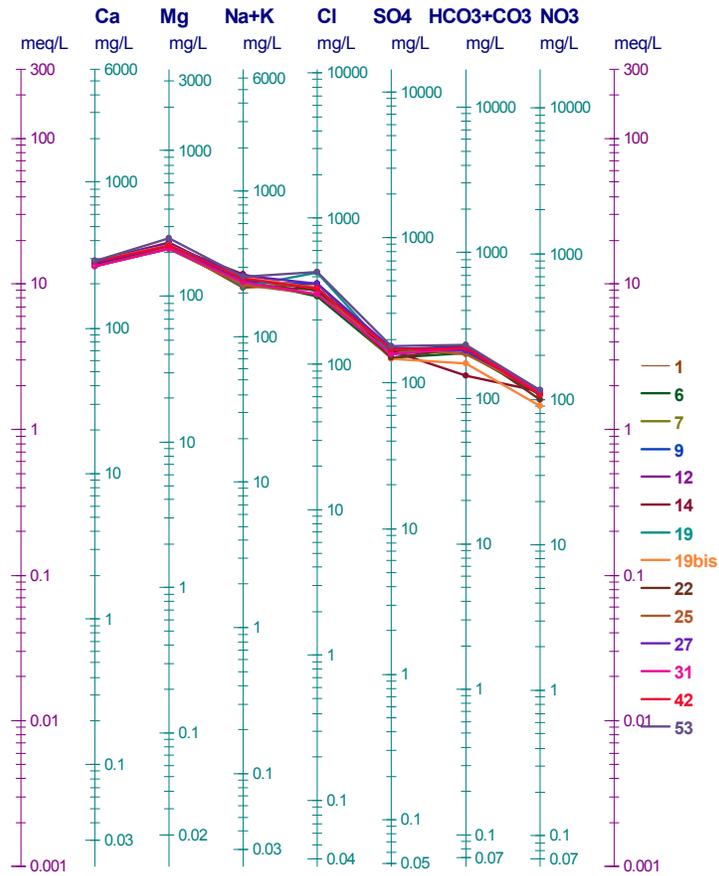


Fig. 62.b – Diagramme de Schoeller Berkalof. Période, septembre 2003

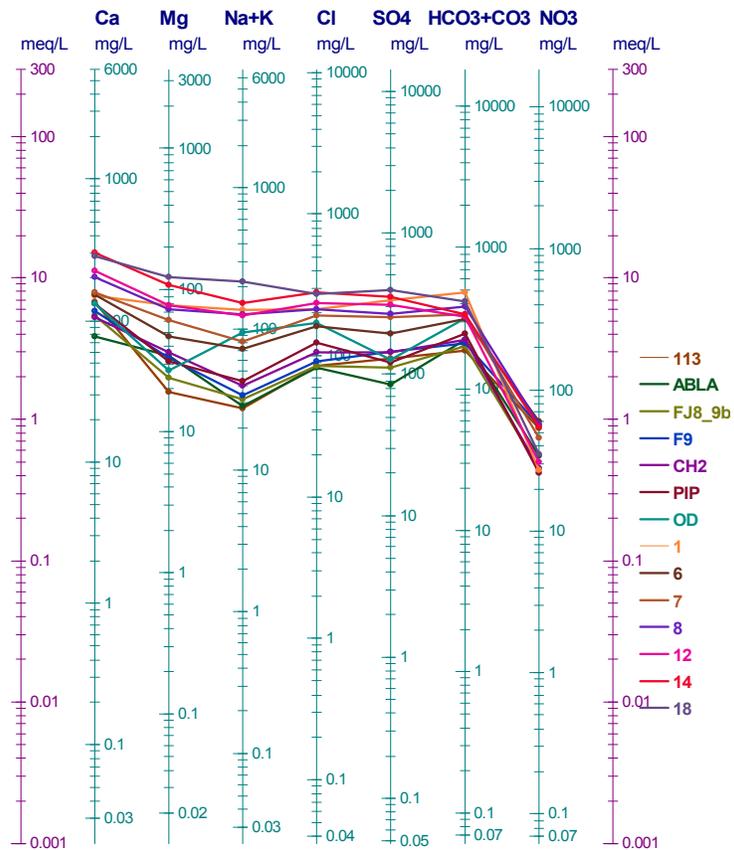


Fig. 62.c – Diagramme de Schoeller Berkalof. Période, Février 2005

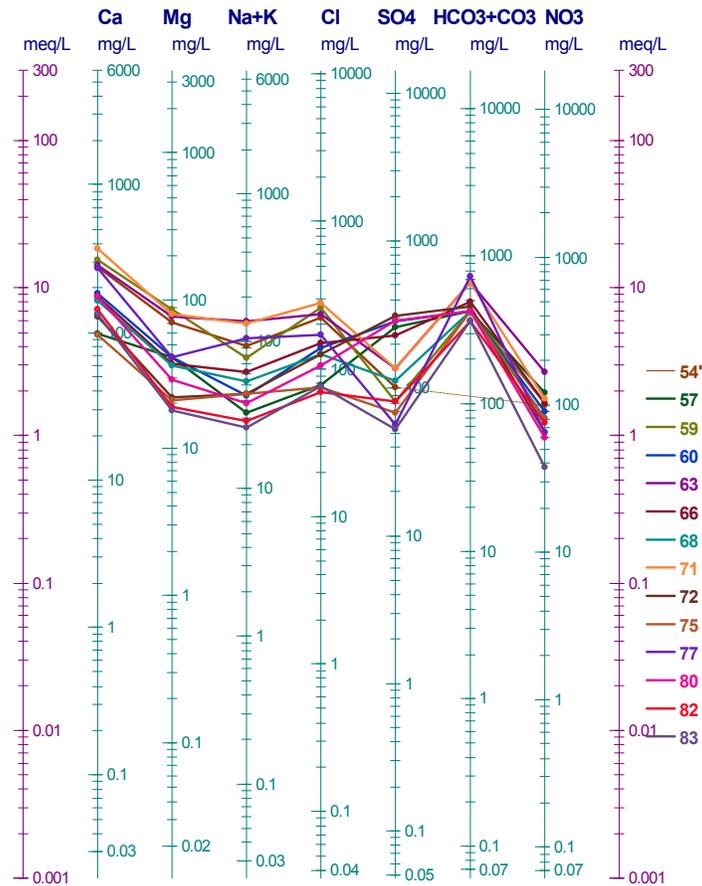


Fig. 62.d – Diagramme de Schoeller Berkalof. Période, Septembre 2005

6. Utilisation agricole des eaux souterraines

Une étude chimique détaillée des eaux pour l'irrigation est nécessaire pour mettre en évidence le danger que présente certains éléments chimiques pour les plantes. Classification des eaux en fonction du pourcentage du sodium absorbé par l'eau : méthode de Wilcox. Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium.

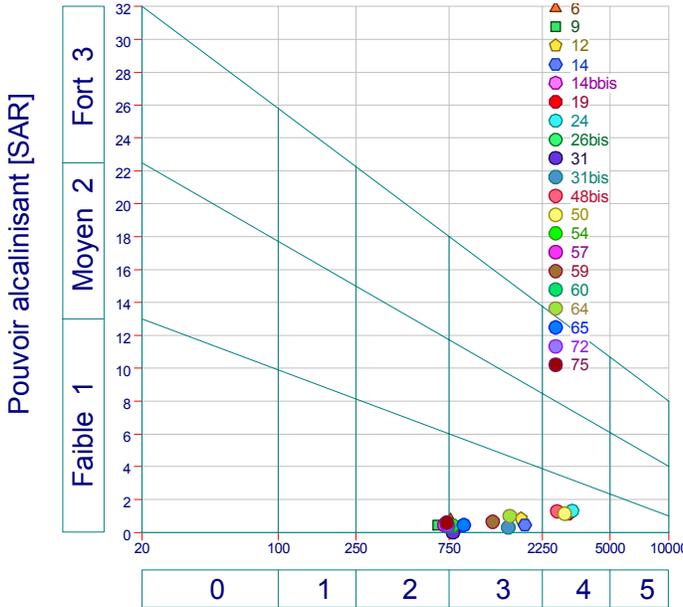
Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable, « Sodium Absorption Ratio : SAR ». Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé.

Cette classification fondée sur la conductivité électrique et le SAR dans l'eau, défini par la formule ci-après :

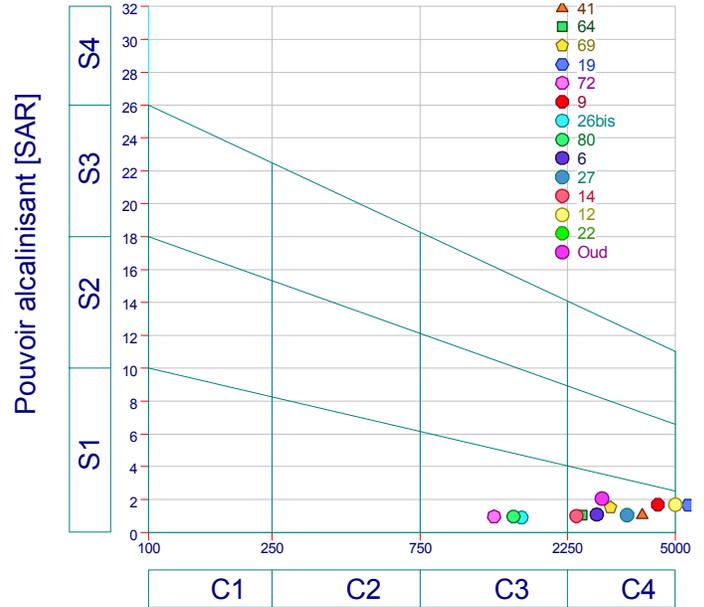
$$SAR = \frac{Na^{++}}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}}$$

Cinq classes d'eau ont été définies: excellente, bonne, admissible, médiocre, mauvaise comme le montre le diagramme de la figure 63.

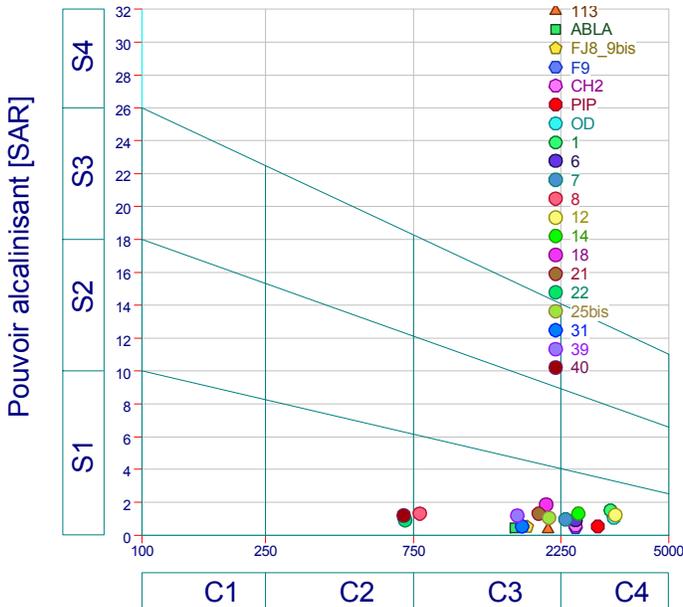
On a représenté les eaux des périodes septembre 2000, avril 2003 et Février, septembre 2005, sur le diagramme de Wilcox, qui nous a permis de déduire que les eaux de la région, appartiennent généralement à la troisième et quatrième classe. En général ces eaux sont soit convenable à l'irrigation de culture tolérante aux sels sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit être contrôlée. Soit des fortement minéralisées, pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels, bien drainées et bien lessivées.



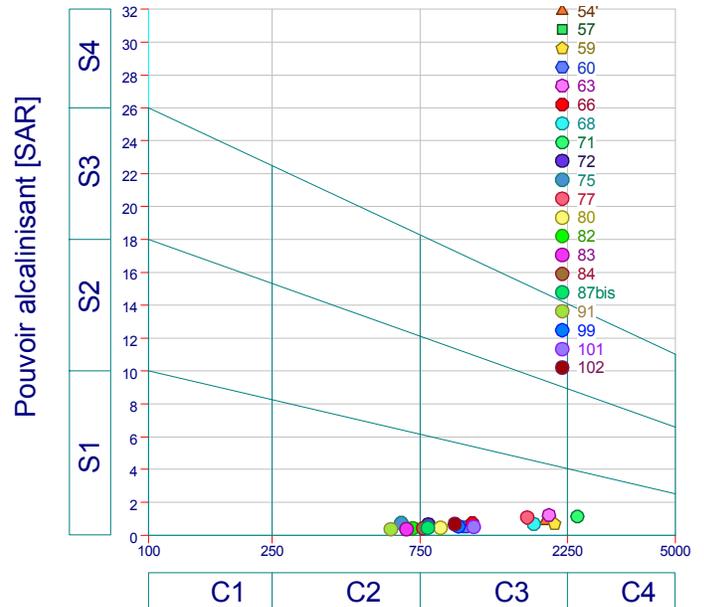
Conductivité en $\mu\text{S/cm}$
Septembre 2002



Conductivité en $\mu\text{S/cm}$
Avril 2003



Conductivité en $\mu\text{S/cm}$
Février 2005



Conductivité en $\mu\text{S/cm}$
Septembre 2005

Fig. 63- Diagrammes de Wilcox

7. Etude isotopique

Les isotopes d'un même élément, sont seulement différents par leur nombre de masse, noté symboliquement par un exposant, qui représente le nombre de protons et de neutrons (H^1 et H^2 , O^{16} et O^{18}). Cette technique peut fournir des renseignements précieux concernant l'âge, l'origine des eaux souterraines et l'origine de la minéralisation.

L'expression de ces paramètres est par partie pour mille :
 δ isotope = [(rapport de l'isotope simple – le rapport de l'isotope lourd) / le rapport de l'isotope simple] * 1000

Malgré toutes les difficultés pour utiliser ces paramètres (coûts et disponibilité) ; on a pu analyser le deutérium et l' O^{18} pour onze points entre puits et forage pour le mois d'Aout 2004, selon deux profils de l'amont vers l'aval.

7.1. Relation de l'oxygène 18 en fonction de l'altitude (Fig. 64)

Sur la figure nous avons reporté l'altitude des points d'eau et en ordonnée les δO^{18} . On remarque que δO^{18} diminue en fonction de l'altitude, ce qui peut être expliqué par la relation inverse qui existe entre les O^{18} et le gradient thermique ($0,5^\circ C$ adiabatique sèche) (Novel 1995)(fig. 64).

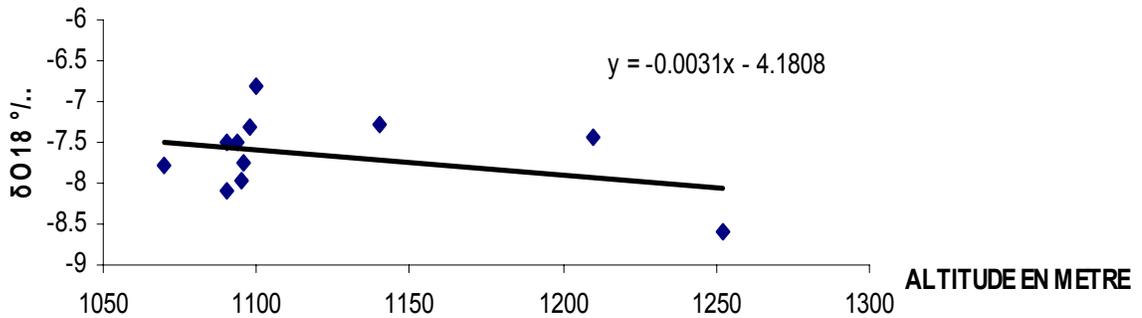


Fig. 64- REPRESENTATION GRAPHIQUE DE O^{18} EN FONCTION DE L'ALTITUDE

7.2. Origine des eaux souterraines de la région d'étude

Pour montrer la relation entre les teneurs en deutérium et l'oxygène 18, une représentation graphique a été établie (fig. 65).

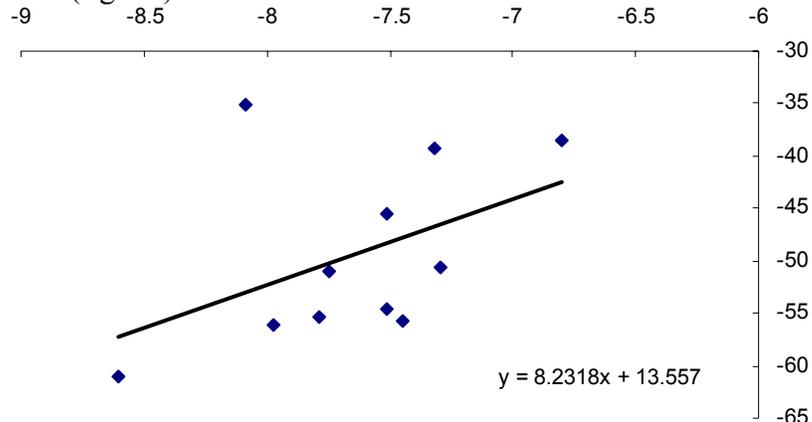


Fig.65 – Représentation graphique du deutérium en fonction de l'oxygène 18.

Cette représentation montre une relation entre ces deux paramètres traduite par une équation de corrélation comme suit :

$$\delta H^2 = 8.23 \delta O^{18} + 13.56$$

Qui ressemble à la droite météorique mondiale établie par Craig en 1961. La pente 8 traduit l'équilibre entre la pluie et la masse nuageuse. L'excès de deutérium correspond au fractionnement cinétique au moment de l'évaporation. Cet excès est lié à une humidité relative (Jouzel 1986).

8. Conclusion

Le plateau de Chéria est constitué essentiellement, par trois aquifères : un premier caractérisé par les calcaires du Maestrichtien, perméables aux bordures et stériles au centre. Un second qui est le plus important pour la région et sa périphérie, les calcaires de l'Eocène, d'une épaisseur qui s'étale de quelques dizaines à une centaine de mètres. Le troisième, l'aquifère Moi-Plio-Quaternaire qui devenu sans intérêt hydraulique, à cause de la sécheresse aigue des dernières décennies, qui a touché la région.

Les cartes piézométriques de la région établies pour les différentes périodes de suivie, ont révélé un sens d'écoulement général Nord Sud, un gradient hydraulique très variable d'une période à l'autre et plusieurs dépressions piézométriques, qui peuvent être expliquées par le sur-pompage ou l'interférence des horizons Aquifères difficile à déterminer sur le terrain.

Un calcul des paramètres hydrodynamiques (transmissivité T), en utilisant la méthode BRGM (1993) a donné des résultats entièrement différents de ceux calculés par les méthodes de Theise et Jacob.

Une étude hydrochimique de la région a permis de tirer plusieurs conclusions entre autres :

Une salinité importante traduite par les valeurs excessives de la conductivité, notamment dans la partie aval au Sud de la région

Des concentrations élevées pour la quasi-totalité des éléments chimiques, particulièrement dans la partie Sud.

Un faciès chimique chloruré magnésien ou calcique dominant.

Une potabilité médiocre à mauvaise (diagramme de potabilité BRGM)

Pour l'utilisation de ces eaux à l'irrigation, soit soit convenable à l'irrigation de culture tolérante aux sels sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit être contrôlée. Soit des fortement minéralisées, pouvant convenir à l'irrigation de certains espèces bien tolérante aux sels, bien drainées et bien lessivées.

Chapitre IV

POLLUTION ET VULNERABILITE

1. Introduction

La pollution de l'eau souterraine est le risque permanent de limitation de la ressource en eau dans un proche avenir.

La pollution de l'eau résulte de l'activité humaine il faut donc exclure la détérioration naturelle sous l'action des agents géologique.

L'action polluante d'une substance est déterminée par sa dose et le volume d'eau véhiculé de transport

Le polluant transporté est propagé par l'eau souterraine. Les deux principales actions sont l'autoépuration naturelle et la dilution.

La vulnérabilité de l'eau souterraine à la pollution s'exprime par des cartes de vulnérabilité dont l'échelle et la précision sont adaptées aux problèmes à résoudre.

La prévention est le seul moyen de lutte efficace contre la pollution de l'eau souterraine

(Castany 1992).

Dans notre étude à partir de l'étude physico-chimique sur la région montre une contamination des eaux souterraines de la région, particulièrement superficielle.

Dans ce chapitre on va essayer de déterminer les conditions, les conséquences, et l'origine de cette dernière.

2. Les chlorures

La cartographie des chlorures des eaux souterraines de la région (annexes), montre des concentrations élevées dépassant parfois largement les limites de potabilité particulièrement au Sud. Sachant que les concentrations excessives des chlorures peuvent être d'origine anthropiques, géologiques ou industrielles. La troisième origine est à éliminer car la région est dépourvue d'activité industrielle. Pour étudier les deux autre origine on a procédé comme suit :

Relation conductivité/chlorure.

On a tracé des profils liant les chlorures et les résistivités pour les périodes de février et septembre 2005 (Fig.66)

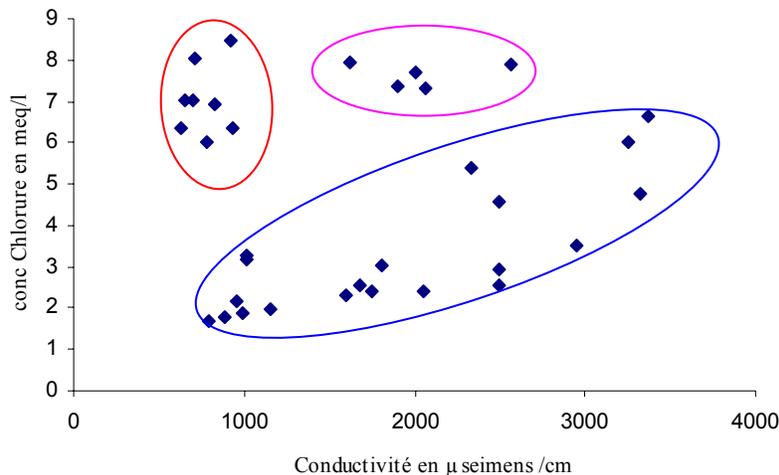


Fig. 66- Chlorures en fonction des conductivités. Février 2005

Ce qui nous permet de déduire une corrélation entre les chlorures et la conductivité. Elle peut être interprétée pour déterminer l'origine des deux paramètres et comme la cartographie de ces deux derniers éléments montre que les valeurs en excès se remarquent généralement dans la partie sud de la région (annexe).

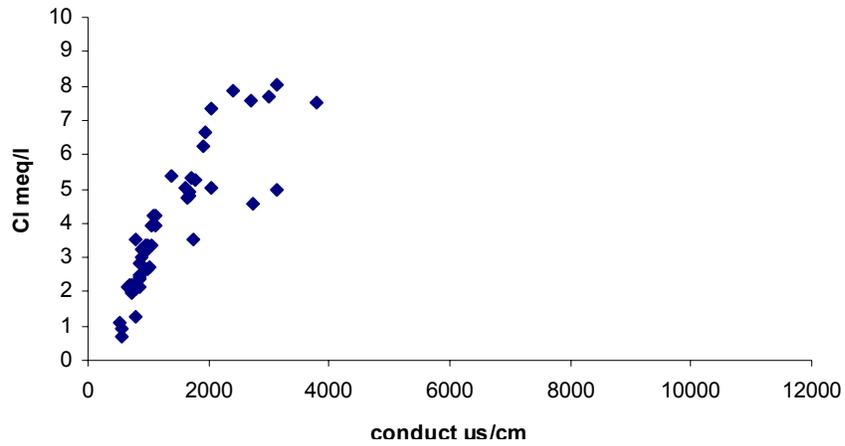


Fig. 67- relation Chlorures et conductivités. Sept. 2005

3. Strontium Sr²⁺

Le dosage du strontium au laboratoire de chimie à polytechnique Lille, France. Permet de trancher entre une origine naturelle ou une pollution anthropique.

Le strontium est un métal alcalino-terreux, qui peut être trouvé dans la nature sous forme de strontianite SrCO₃ et de célestite SrSO₄. La célestite accompagne généralement les formations évaporitiques.

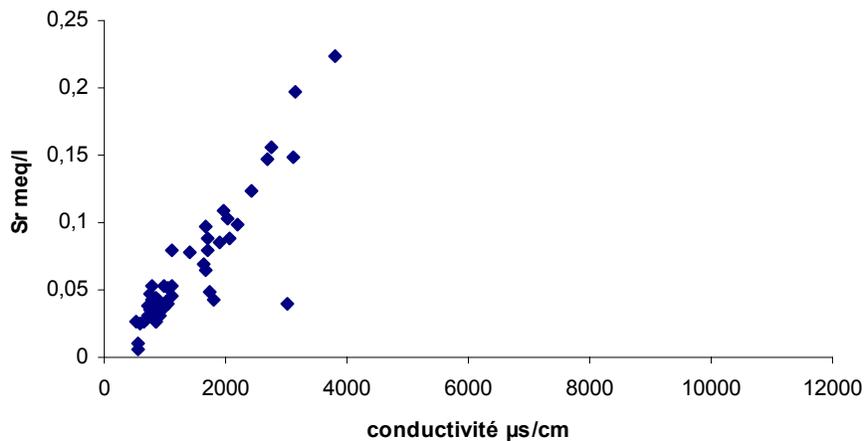


Fig. 68- Relation Strontium (Sr) et conductivités. Sept. 2005

Pour la première période une bonne corrélation est individualisée entre le Strontium est la conductivité, tandis que pour la seconde la corrélation n'est pas significative. Ce qui montre la diversité des origines.

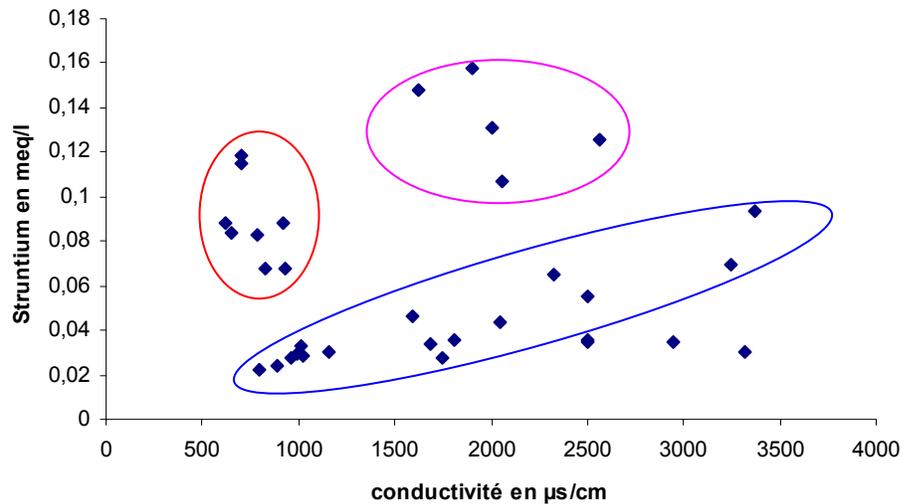


Fig. 69- Strontium en fonction des conductivités. Sept. 2003

3.1. Cartographie du Strontium

Les cartes établies visualisent deux zones bien distinctes, l'une au Nord avec des concentrations faibles (0.5 à 4 mg/l), la seconde au Sud avec des concentrations plus importantes que la précédente qui varient entre 4 et près 7 mg/l (fig. 70).

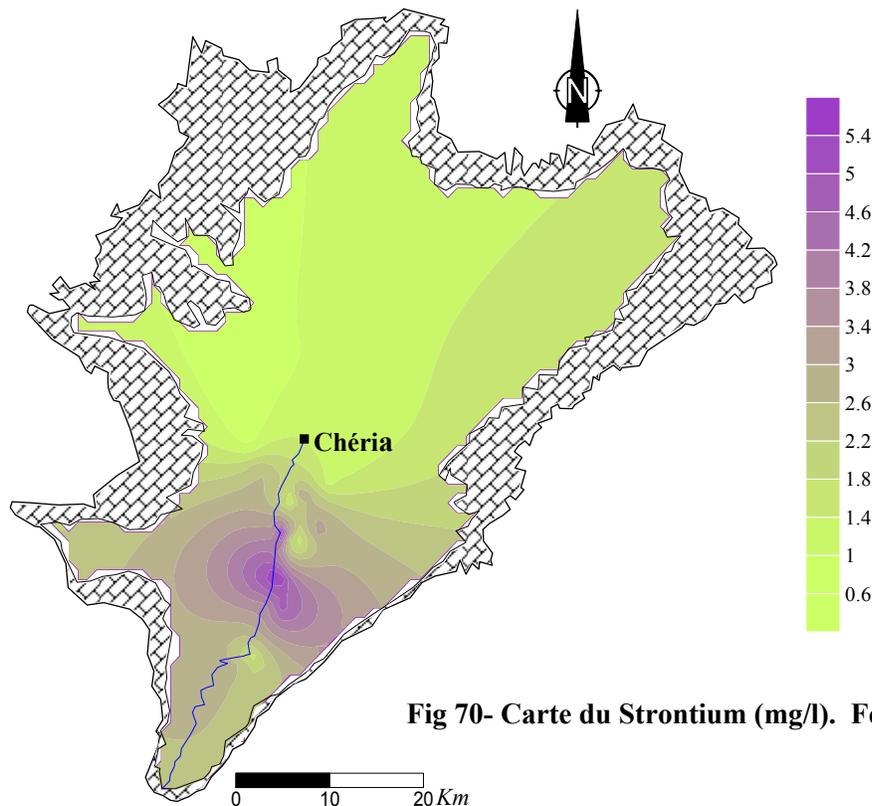


Fig 70- Carte du Strontium (mg/l). Février 2005

Le contenu en strontium dans les roches varie en fonction de la lithologie, et peut être affecté, par le processus d'adsorption à la surface des argiles, ce qui donne une idée sur la faible mobilité et par l'échange ionique (Turékian, op. cit. ; Kennedy et al, 1985 Morgan et al., 1981 Castillo et al., 1988 ; citer par El Achheb 2002)

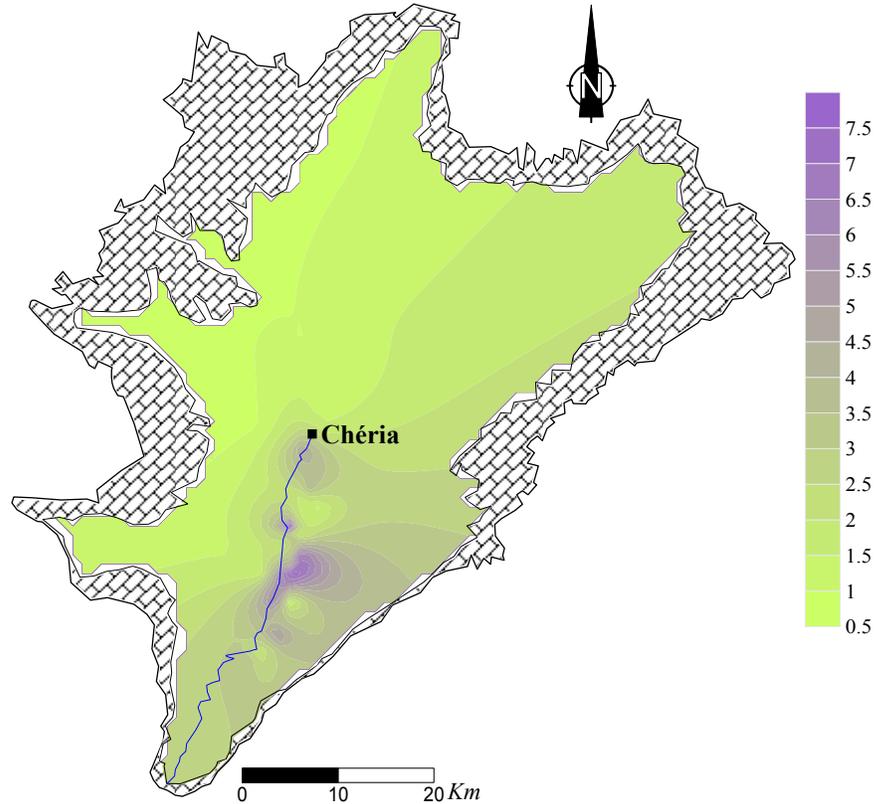


Fig. 71- Carte du Strontium (mg/l). Sept 2005

3.2 Le rapport Sr/Ca

Dans les eaux souterraines les concentrations varient dans un large domaine de 0.2 et 1 mg/l (Castillo et morell, 1988).

Cependant, la solubilité des carbonates, des sulfates et du strontium est très élevée pour permettre des concentrations détectables dans les eaux naturelles (White, 1957). Les fortes teneurs en strontium dans les eaux dans les eaux des roches évaporitiques et des roches carbonatées ne s'expliquent donc que par la dissolution de la célestites et des carbonates.

Le calcul du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} pour les deux campagnes sur citées fait apparaître deux groupes le premier inférieur à 0.01 au Nord et un second au Sud 0.0035 jusqu'à 0.01 (fig. 72, 72a)

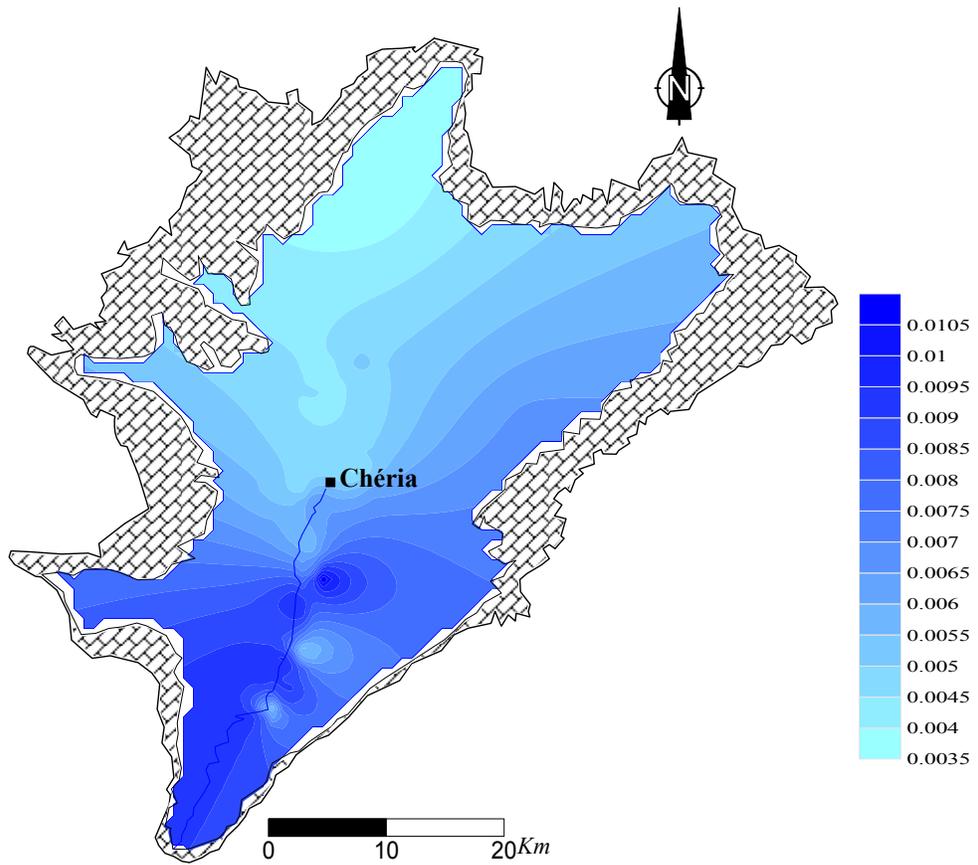


Fig. 72 - Carte du rapport caractéristique Sr^{2+}/Ca^{2+} . Septembre 2005.

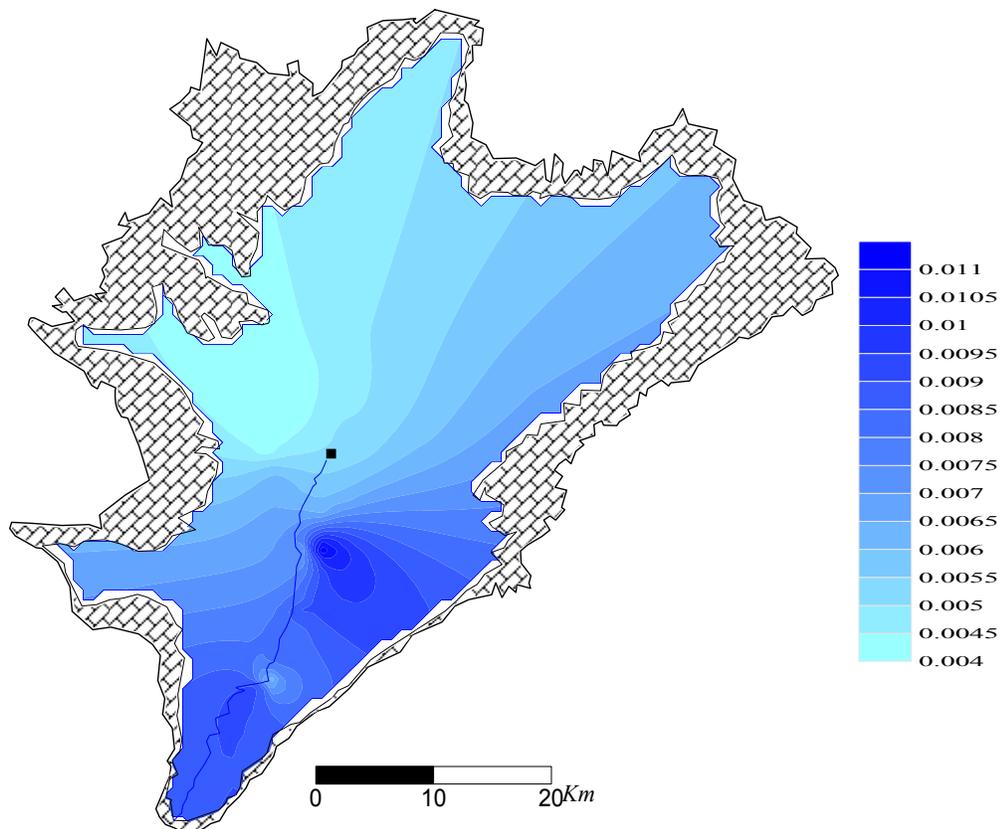


Fig. 72.a - Carte du rapport caractéristique Sr^{2+}/Ca^{2+} . Février 2005.

4. Le cycle de L'azote : (Nitrate, Nitrite et Ammonium)

Dans nombreux pays, la démographie croissante et le développement de l'industrie et l'agriculture intensive ont accru le volume de rejets, entraînant la pollution des eaux souterraines et superficielles par diverse substances, notamment les nitrates (Fritsh et al., 1985 in Somlette, 1998)

La région d'étude n'est pas à l'abri de cette situation, car les campagnes de terrain et d'analyse au laboratoire ont présentés plusieurs scénarios de variation des concentrations en ces éléments, que nous allons décrire dans ce qui suit :

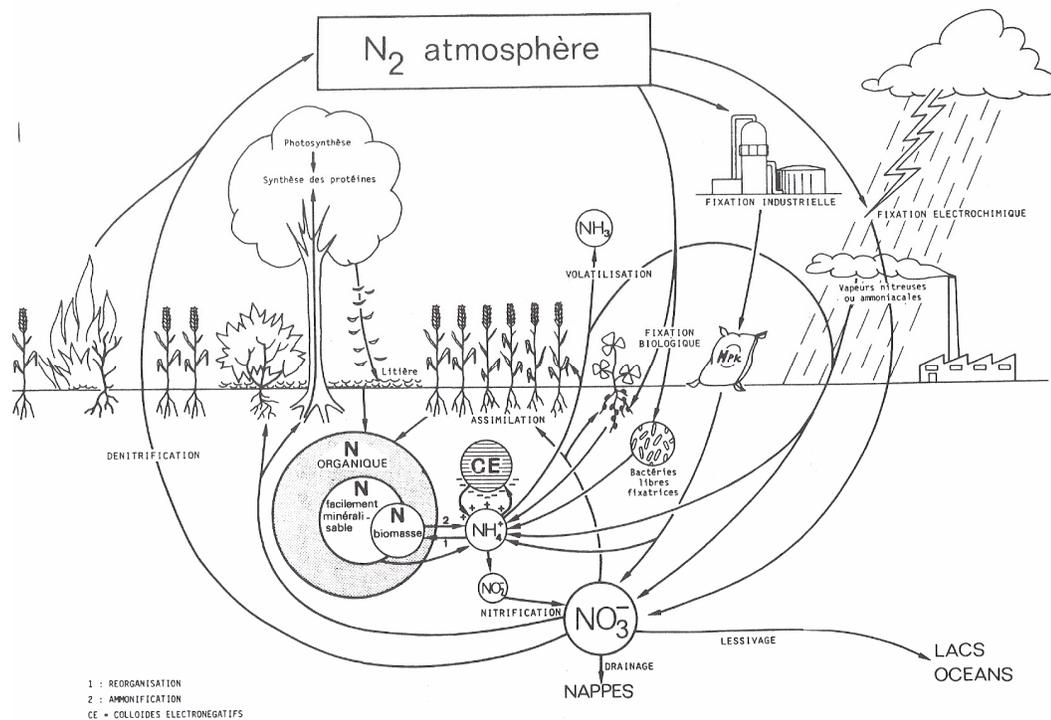


Fig. 73 - Cycle de l'Azote. (Mariotti, 1982)

4.1. Répartition des nitrates en mars 2002

Au cours de cette campagne, la répartition des teneurs en nitrates paraît très alarmante, partout sur le terrain on observe un dépassement de la norme (50 mg/l OMS), Pour le secteur sud la situation peut être expliquée par la contamination par les eaux usées de l'oued Chéria. Alors que pour le reste du terrain il s'agira des retours d'eau d'irrigation vers la nappe.

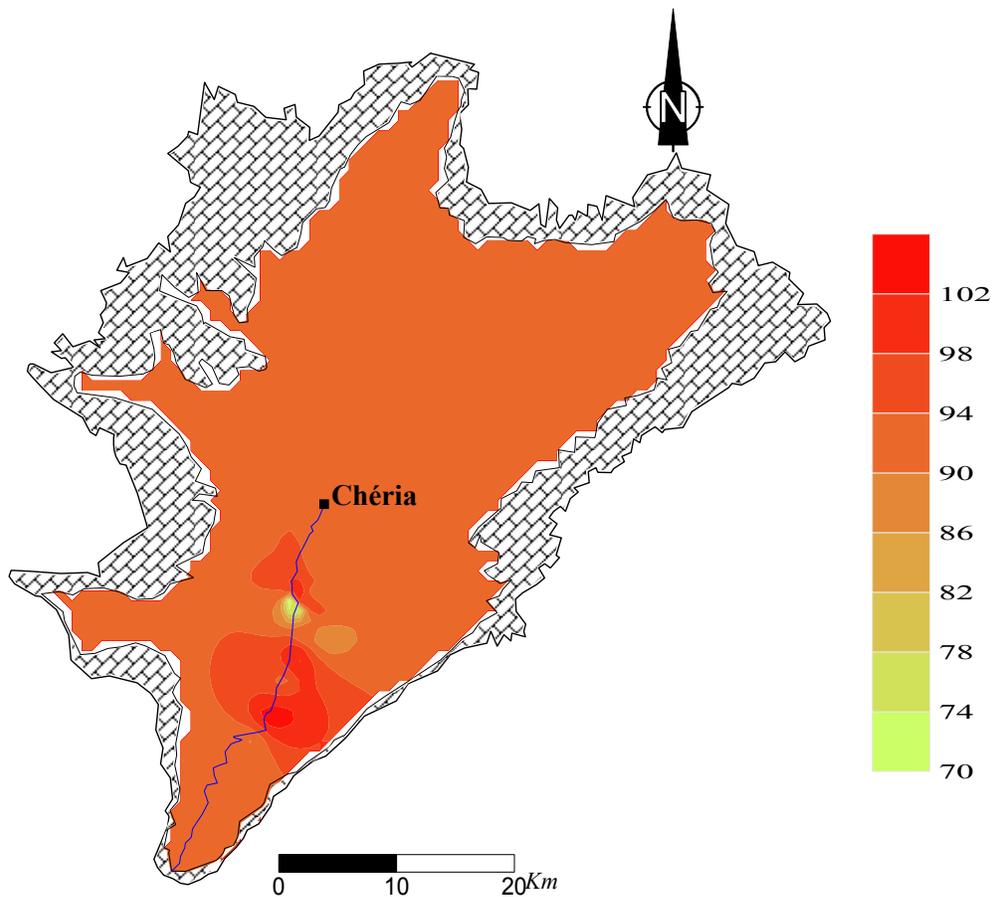


Fig. 74- Carte des Nitrates (mg/l). mars 2002

4.2. Répartition des nitrates en Septembre 2002

En cette période la répartition des nitrates est tout a fait l'inverse de la précédente, et le fait marquant cette période est le cycle agricole qui prend fin en cette période, situation confirmée par les teneurs qui ne dépassent pas les normes

4.3. Répartition des nitrates en Septembre 2003

La carte de cette période (fig75) confirme l'interprétation précédente, celle ou les concentrations sont alarmantes, mais la ou on est en présence de mélange on peut observer une dilution, le cas de la partie centrale au niveau de M'Chentel et au Sud sur des secteurs ponctuels représentant des forages profonds (P70, Forage Abla et P60)

4.4. Répartition des nitrates en Avril 2004

En cette période, les concentrations en nitrates se subdivisent en deux classes différentes des cas précédents, car on peut facilement observer les secteurs qui offrent des eaux dont les teneurs en nitrates ne dépassent pas les normes et ceux qui la dépassent (plus de 50mg/l).

Cette situation est , principalement due, a l'effet de chasse provoquée par des eaux non polluées au niveau de la partie ouest et au niveau de l'exutoire

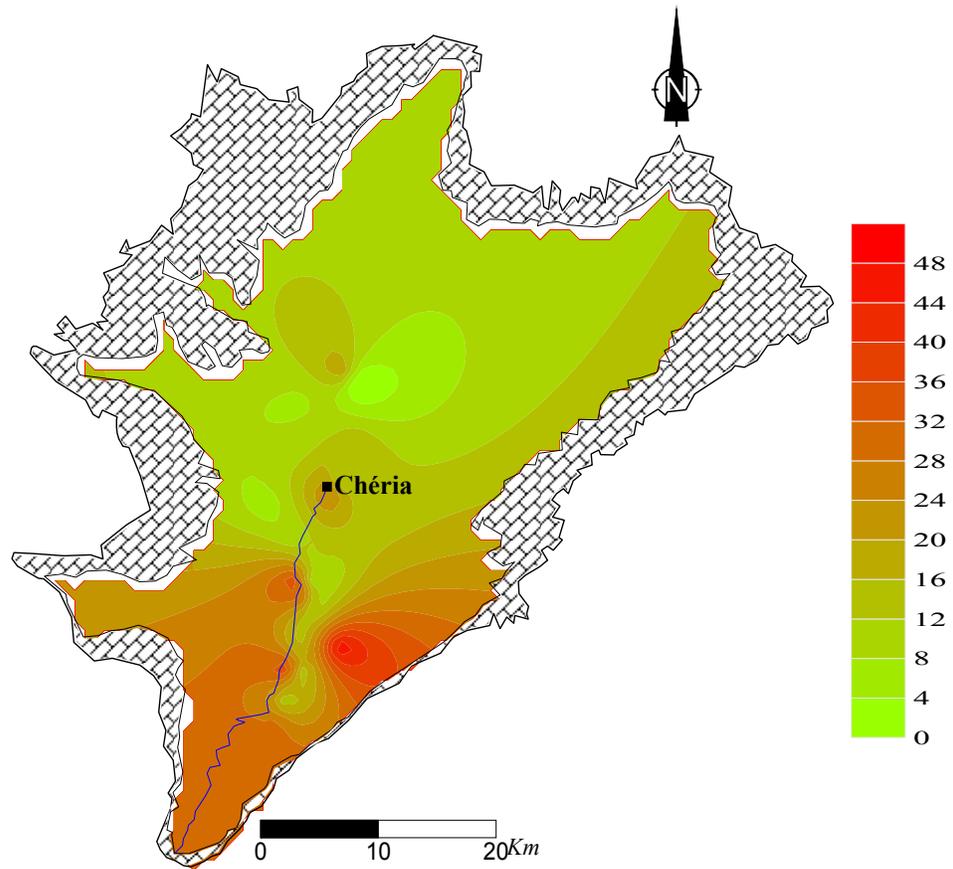


Fig. 75 Carte des Nitrates (mg/l). septembre 2002

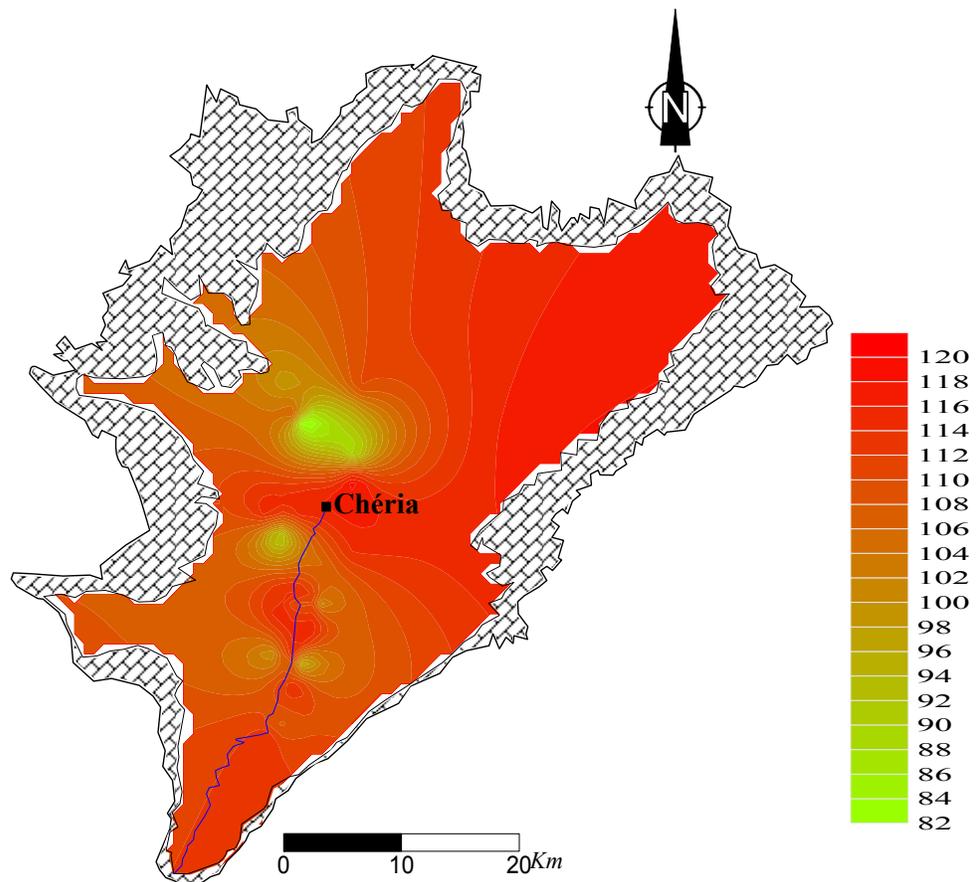


Fig. 76- Carte des Nitrates (mg/l). Septembre 2003

4.5. Répartition des nitrates en Février 2005

En cette période, la répartition des concentrations en nitrates présente un scénario confirmant le sens d'écoulement présenté par les cartes piézométriques, on voit bien que sur le tracé des eaux qui circulent à une vitesse plus ou moins importantes. Les concentrations sont trop faibles alors que dans les secteurs où le gradient hydraulique est faible on remarque une augmentation dans les teneurs qui ne dépassent pas les normes.

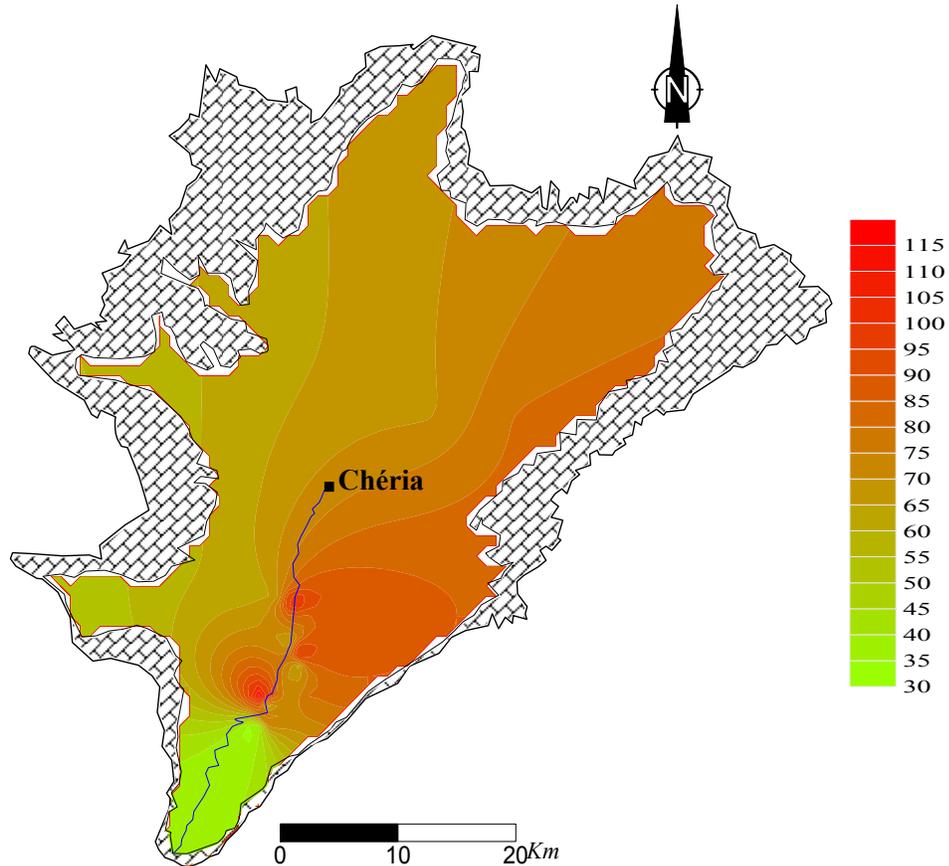


Fig. 77 Carte des Nitrates (mg/l). Avril 2004

4.6. Répartition des nitrates en Septembre 2005

En cette période des concentrations en nitrates dépassent généralement 50 mg/l et notamment dans la partie sud, qui peuvent atteindre plus de 150 mg/l, seuls le secteur Ouest les concentrations représentent les normes, car les captages sont plus profonds (plus 100 m de profondeur).

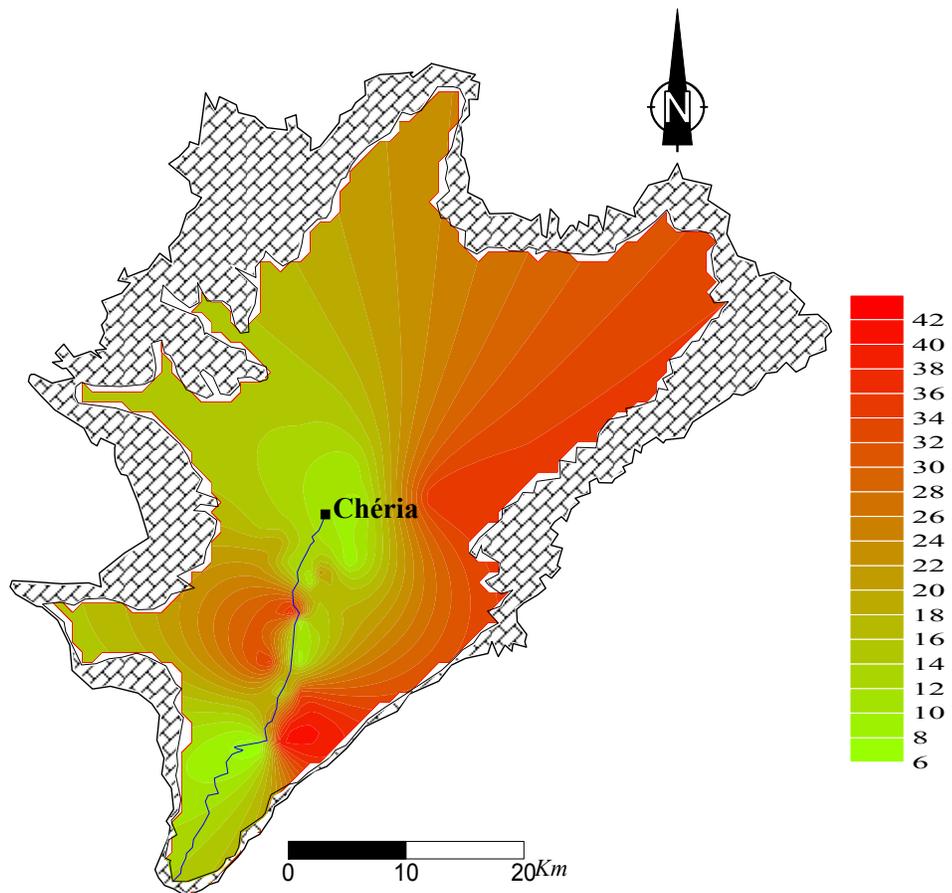


Fig 78- Carte des Nitrates (mg/l). Février 2005

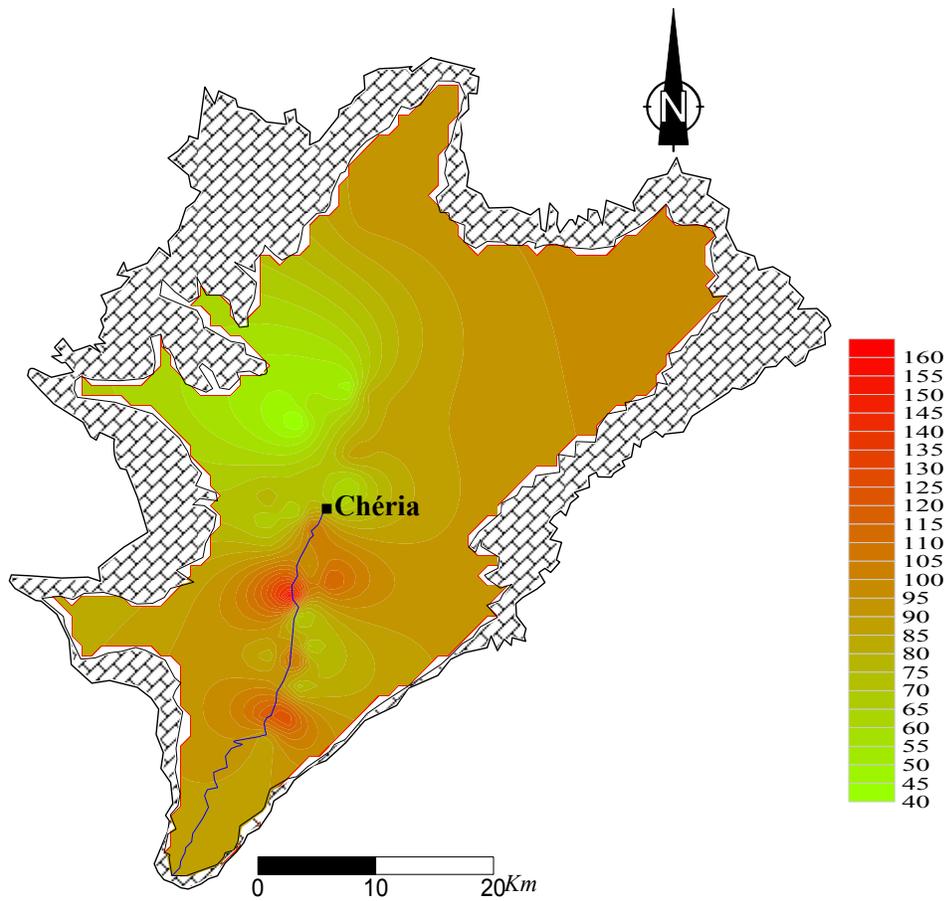


Fig. 79- Carte des Nitrates (mg/l). septembre 2005

5. Le Phosphate

Une seule campagne qui était le sujet d'une analyse de phosphate (PO_4) en septembre 2002 et du phosphate total pour Février 2005.

On distingue deux plages de concentrations les plus élevées au Sud, qui peuvent atteindre jusqu'à 0.47 mg/l pour les phosphates et 22 mg/l pour le phosphate total. Ce qui peut être interprété par la présence des passages phosphatés dans les calcaires de l'ypresien.

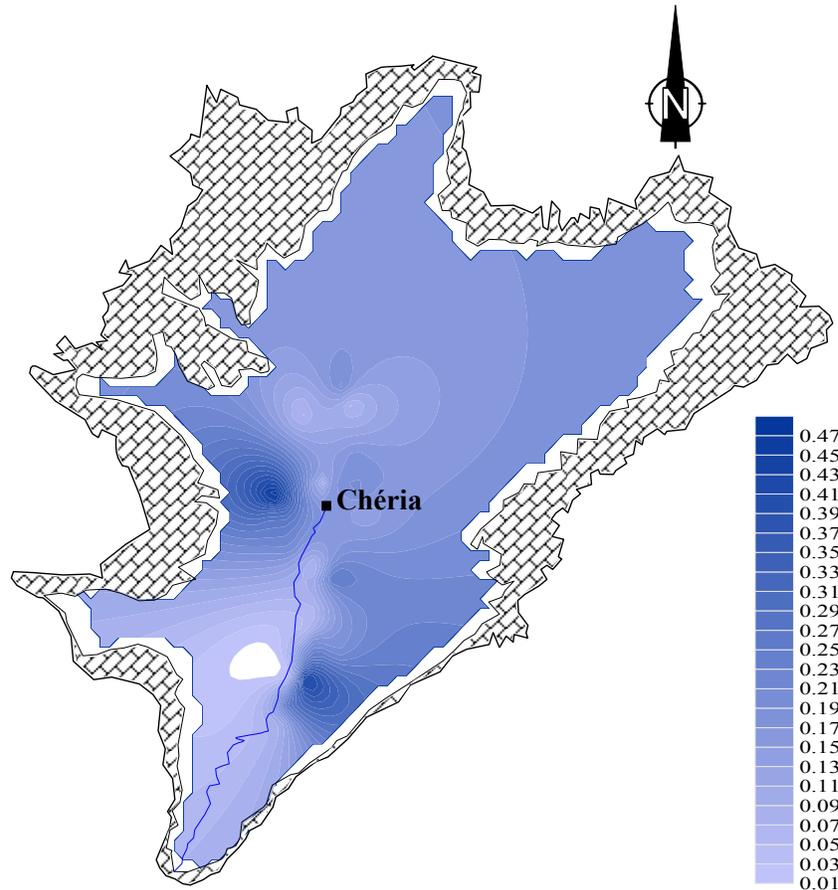


Fig. 80- Carte du PO_4 (mg/l). Septembre 2002

6. Les métaux lourds

On a dosé le Fer pour les périodes d'avril et septembre 2004 et qui a donné des concentrations qui peuvent atteindre jusqu'à 1 mg/l. Ces concentrations peuvent être attribuées aux formations alluvionnaires.

Pour les périodes février et septembre 2005 on a dosé le nickel, le zinc, le baryum et le manganèse, mais ils ont donné des valeurs négatives ce qui signifie une absence de ces métaux dans la région.

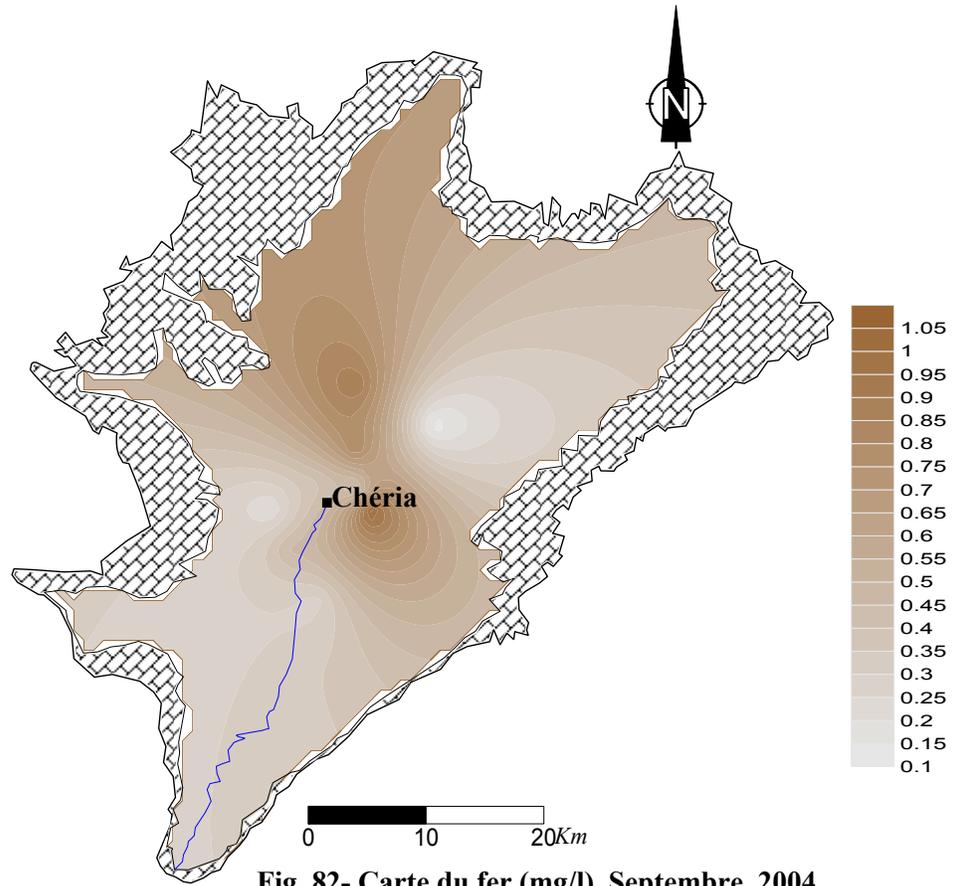


Fig. 82- Carte du fer (mg/l). Septembre 2004

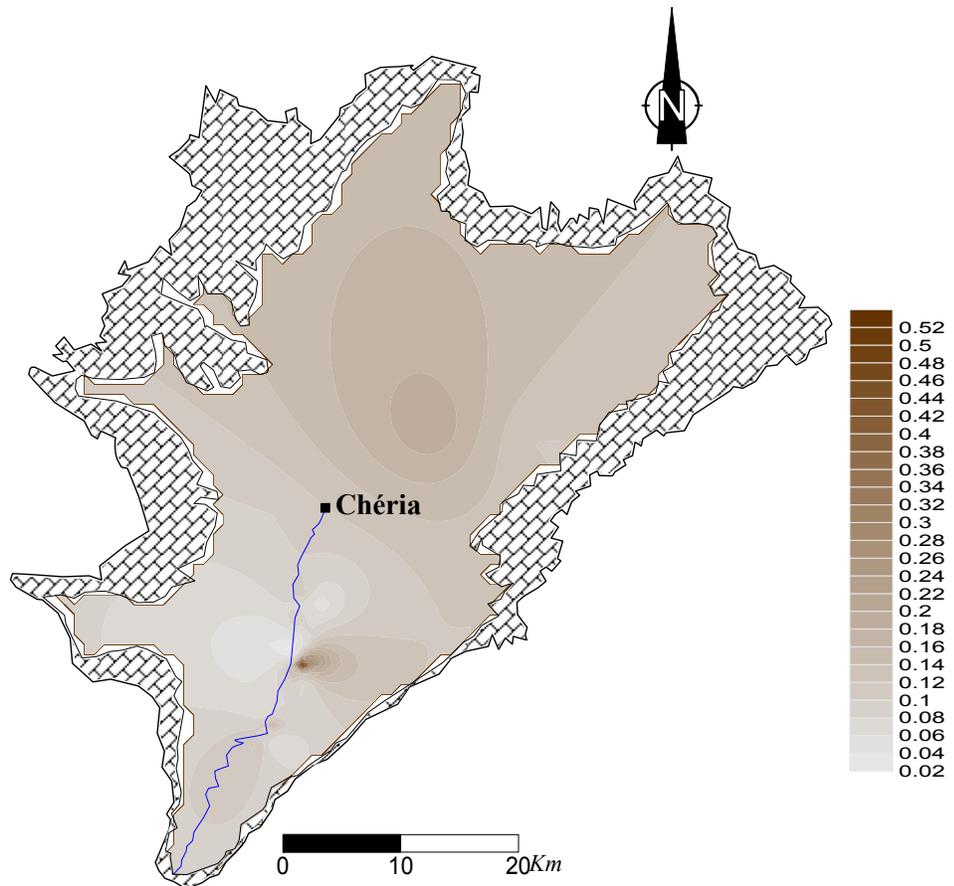


Fig. 83- Carte du Fer (mg/l). Avril 2004

9. Origine de la pollution

Deux sources ont été inventoriées; l'élevage et les rejets des eaux urbaines. Une troisième source de moindre envergure peut être citée et concernerait l'agriculture qui a pris plus d'ampleur au cours des dernières années.

9.1. - L'élevage d'animaux

Le tableau n°7, donne un aperçu sur l'élevage pratiqué dans la région, d'après les statistiques de la direction de l'agriculture de la wilaya de Tébessa. Les déchets liquides ou solides ne subissent aucun traitement préalable ce qui augmente le risque de pollution.

Comparé à l'élevage et aux fermes européennes, on remarque que le nombre de tête reste très faible et ne peut pas engendrer une pollution importante à titre indicatif, l'ensemble recensé peut correspondre à une seule ferme de la région de franche comté (France) caractérisée par l'élevage de vaches laitières (production de fromages). Cette situation nous incite à rechercher d'autres sources de pollution par les nutriments.

Cheptel	Effectif	Coef. Azote (Kg/an)	Azote produit (Kg/an)
Bovins			
Vaches laitières	953	85	81.005
Bovins viandes	1000	72	72.000
Ovin			
Brebis mères	37413	10	374.130
Agneau	26000	05	130.000
Volailles (estimation moyenne par enquête sur terrain)			
Poulets	10000	0.24	2.400
Lapines mères	500	3.24	1.620
Total d'azote en kg par an			661.155
Total d'azote en tonne par an			661.155

Tab.7 : Estimation de la production moyenne de l'azote à partir d'élevage des Animaux.

A notre sens, les rejets des eaux usées contribuent grandement dans la dégradation de la qualité des eaux. Le scénario suivant peut être envisagé, les eaux usées sont rejetées dans l'oued Chéria, ce dernier constitue le déversoir naturel de tous les rejets. Pour confirmer ou infirmer le lien qui peut exister entre les rejets urbains et la pollution observée, nous avons dosé le bore (fig. 84 et 85). Ce dernier reste un bon indicateur de la pollution par les rejets urbains. Les résultats obtenus montrent des concentrations assez importantes, mettant en évidence une pollution probable des eaux de l'oued et des nappes par les rejets urbains.

Dans la nature le bore se trouve en trace dans de nombreux minéraux particulièrement les phyllosilicates comme les illites ces dernières résultent de l'altération des roches métamorphiques. Les borates proviendraient de la sédimentation en milieu évaporitique.

Dans l'industrie seuls les complexes industriels utilisant les agents blanchissants à base de perborates sont susceptibles de rejeter du bore dans leurs effluents. Dans les effluents domestiques, le bore est retrouvé en solution dans les eaux usées.

9.2. - Les rejets urbains

La zone urbaine de Chéria, ainsi que la petite industrie (pompes à essence, stations de lavage, abattoir ...) constituent la deuxième source de pollution, car les rejets se font directement dans la nature. En effet les constructions se font de part et d'autre de l'Oued Chéria, qui constitue le principal collecteur des eaux de pluie et des eaux usées. De ce fait tous les rejets se déversent dans l'oued. Par ailleurs, les échanges permanents entre l'oued et la nappe, contribuent à la migration des polluants d'un système vers un autre. (*Chapitre II figures 35 et 36*).

En réalité la zone étudiée est caractérisée par l'absence du couvert végétal et par une fissuration bien développée (chapitre I). Ces deux facteurs facilitent l'infiltration des eaux et des polluants mise en évidence par les cartes piézométriques.

L'analyse de la distribution du bore dans la région, dans les eaux souterraines, permet de déduire que cet élément a comme origine la dissolution des sédiments évaporitiques bien que ce facteur ne conditionne pas exclusivement les teneurs élevées présentes dans le secteur Sud du terrain (exutoire du bassin). Les concentrations élevées du bore sont associées aux activités humaines demeurent fortement liées aux rejets d'eau usées notamment domestiques, sachant que le bore sous forme de perborates de sodium est un composant majeur des lessives solides domestiques rejetés directement dans le milieu naturel à travers l'oued qui draine les eaux de la ville.

La cartographie réalisée montre une répartition des concentrations en bore analogue à celles des nitrates, caractérisée par de fortes concentrations de l'ordre de 3 mg/l enregistrées dans la partie Sud au niveau des bordures de l'Oued (fig.84, 85). La présence du bore en cet endroit ; contribue à la confirmation de la pollution des eaux par les rejets urbains. Ces derniers sont également riches en nutriments qui au niveau de l'oued et sous l'influence de l'oxygène dissous se transforment en nitrates, nitrites ou ammonium selon le cycle de l'azote.

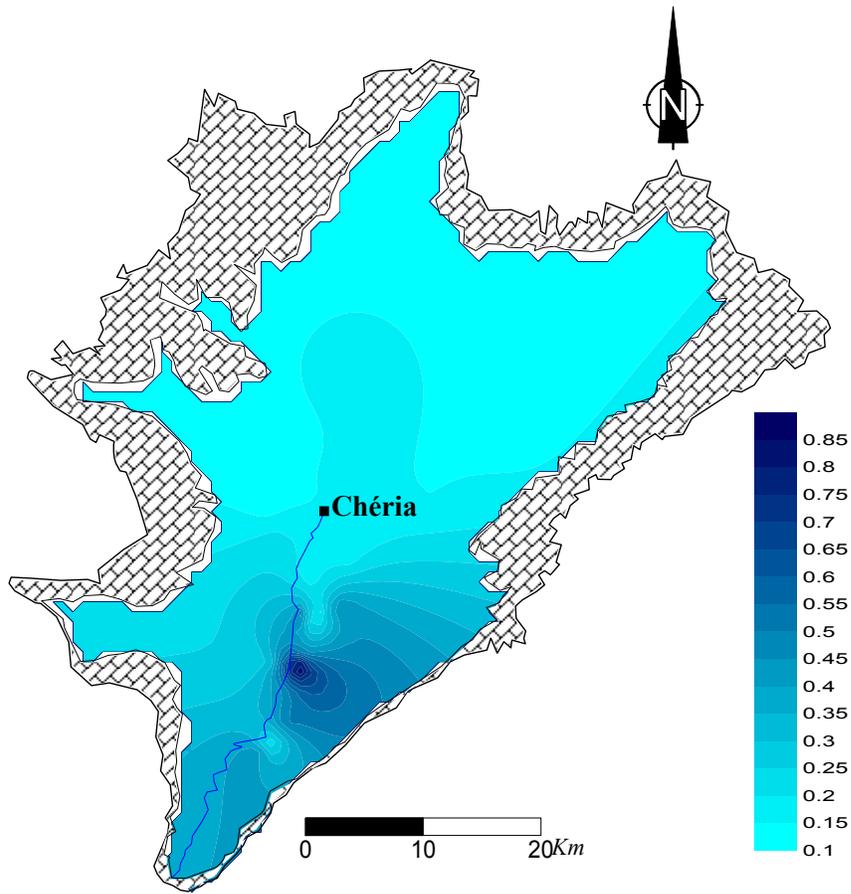


Fig. 84- Carte du Bore (mg/l). Février 2005

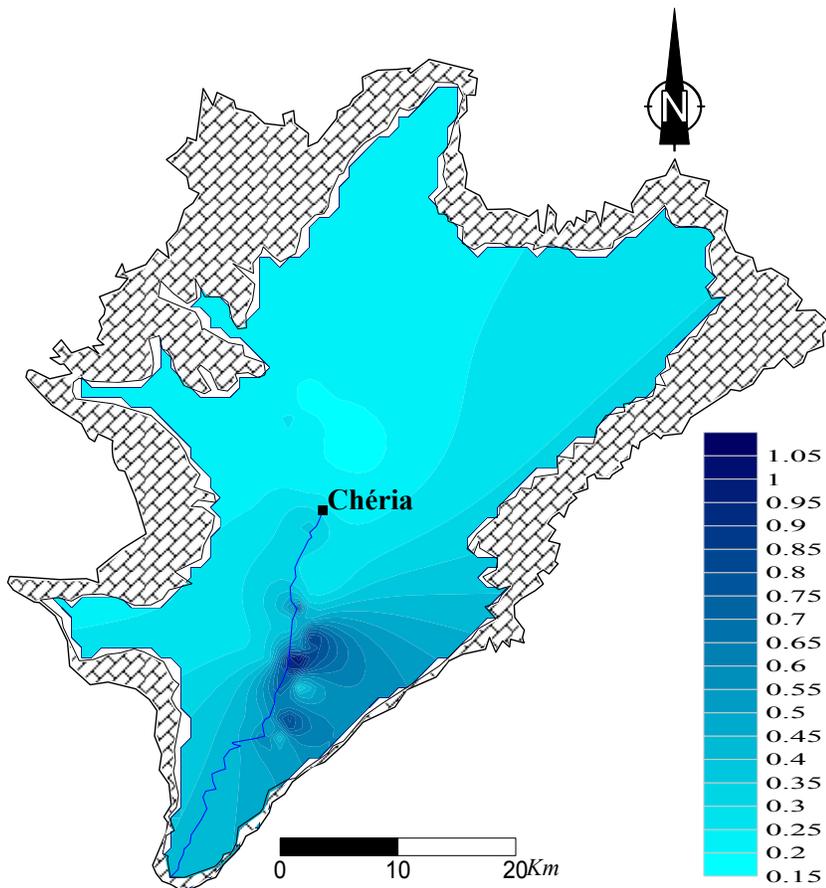


Fig. 85 -Carte du Bore Septembre 2005

A tous ce qui a été cité on peut rajouter une autre origine, qui peut être considéré comme indirecte, la sur exploitation de la nappe précisément en cette dernière décennie de sécheresse. Cette situation a été résumée dans le tableau suivant :

N° de forage	X	Y	Début d'exploitation	Débit en m ³ /s	Volume m ³ /an
523	958.32	226.6	1986	0.0132	416276
103	958.33	226.6	1988	0.023	725329
Ch1bis	956	231	1993	0.035	1103762
Ch2	959.9	242	1993	0.024	756865
Ch3	960	229.85	1996	0.0007	22075
Ch4	958.2	231.2	2001	0.030	946082
D1	956.9	242	1981	0.017	536113
F2	956.92	241.65	1972	0.04	1261442
F2bis	957.60	242.30	1980	0.015	473041
F9	964.05	232.22	1985	0.012	378433
J8-9bis	960.28	232	1985	0.023	725329
T1	951.45	231.12	1976	0.02	630721
Les forages d'eau privés (enquête de terrain) :					13824003
Les puits domestiques (enquête de terrain) :					259200
V o l u m e T o t a l :					22058671
V o l u m e T o t a l (hm ³ /an) :					22.058

Tableau 8 – Estimation moyenne du volume total d'eau de pompage

VULNERABILITE A LA POLLUTION DE LA REGION DE CHERIA

1. Introduction

Les eaux souterraines de Chéria représentent une ressource en eau d'importance stratégique non négligeable, puisqu'elle est la seule en ce qui concerne la région en particulier, et la wilaya en général. Elle représente une solution alternative aux pénuries régulières des périodes de sécheresse. Sa protection est de première importance. Or, les études antérieures sur l'eau de la région manquaient d'un outil complet d'aide à la prise de décision en matière d'aménagement leur permettant de tenir compte des risques encourus par les eaux souterraines. Conscient de cette lacune, notre étude a réinitié le processus de définition de la vulnérabilité des nappes d'eaux souterraines aux pollutions en définissant les bases de sa cartographie : définition des critères à prendre en compte et de la méthode la plus réalisable on tenant compte de nos moyens très limités.

La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la région est l'initiative qui constitue des outils de gestion rationnelle des eaux souterraines : Outils pédagogiques et éducatifs (sensibilisation), outils de création d'une politique générale de gestion de la qualité des eaux (création d'une police de l'eau), outils d'aide à la décision en matière d'aménagement et finalement un outils pour la protection des ressources en eau et des captages.

« La cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère permet une meilleure gestion de la nappe et des interventions rapides et appropriées en cas de pollution » (Graillat A. et Bouchet C., 1994. in BRGM/RP-51783-FR 2002).

Afin de répondre à cet objectif, on a proposé un travail à deux volets: bibliographie sommaire des méthode cartographie de la vulnérabilité les plus utilisé dans les milieux fissurés et karstiques, ainsi qu'un essai d'application de la méthode "EPIK" sur notre région d'étude.

2. La vulnérabilité des nappes souterraines

Une analyse bibliographique des travaux les plus récents en matière de cartographie de vulnérabilité des eaux souterraines pour définir, les notions générales, les critères couramment retenus pour la décrire et les méthodes employées actuellement pour la représenter.

2.1. Notions générales

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 (Schnebelen et all. 2002. in BRGM/RP-51783-FR 2002) :

La première est la représentation des caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines, et la seconde; définit 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.

On peut noter que les deux types de vulnérabilité d'une façon générale, ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut-être considérée comme invariante dans le temps (à notre échelle de travail) alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux sources de pollution) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis. De plus, nous avons considéré qu'il était préférable de faire la différence entre les caractéristiques propres du milieu et l'existence de sources de pollutions.

2.2. Les critères de vulnérabilité

2.2.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenant soit sur la nature et/ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert.

L'ensemble des critères de vulnérabilité rencontrés dans la littérature sont exposés ci dessous.

2.2.1.1. 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. Ils sont étroitement liés à la topographie et à la nature des formations superficielles.

- **Couverture Pédologique** : la nature, la texture, la teneur en argiles et en matière organique, ainsi que la puissance (ou épaisseur).

2.2.1.2. Critères relatifs à la zone non saturée

- Profondeur de la nappe libre

L'épaisseur de la Zone Non Saturée conditionne de temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physico-chimiques avec l'encaissant).

- Amplitude de battement de nappe :

Elle peut devenir un critère de vulnérabilité dans la mesure où elle est significative (l'amplitude de battement de la nappe, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe).

- Perméabilité verticale de la zone non saturée

Elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe.

- Structure de la zone non saturée

Les variations de faciès, l'épaisseur des discontinuités de faciès et leur position dans le profil vertical, la texture, la teneur en matières organiques et en argile des formations, sont autant de facteurs qui conditionnent la migration de fluides vers la nappe.

2.2.1.3. Critères relatifs à la zone saturée

- Type de nappe (libre ou captive)
- Paramètres hydrodynamiques

Concerne l'évaluation de la transmissivité (T), la perméabilité (K), le coefficient d'emmagasinement (s) et gradient hydraulique (i).

- Piézométrie :

Elle prend en compte la géométrie de la nappe et de son fonctionnement hydrodynamique qui peuvent évoluer au cours du temps.

- Direction et sens d'écoulement :

Ils déterminent les espaces susceptibles d'être atteint par un polluant.

- Type de système hydrogéologique :

La vulnérabilité d'un système est liée au temps de transfert des eaux depuis la surface vers la zone saturée et le temps de séjour.

- Relations nappe/cours d'eau

Concerne les relations entre les eaux superficielles et les eaux souterraines (drainage ou alimentation).

- Epaisseur de l'aquifère

Détermine les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe (le volume d'eau stocké).

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

- Fracturation (directions et densité).

Des discontinuités verticales telles que les failles (drain et vitesses d'infiltration).

- Recharge :

Elle dépend de l'infiltration efficace (recharge annuelle nette), de sa répartition dans l'espace et dans le temps, donc du climat (ETP, précipitations), de la topographie et de la nature des formations.

2.2.2. Critères de vulnérabilité spécifique

- Comportement du polluant potentiel (milieu fixe)

Ce comportement dépend des caractéristiques du milieu, mais également des propriétés physico-chimiques et biologique du composé lui-même (réactions acides bases, d'oxydoréduction, de désorption, biodégradation, synthèse cellulaire, diffusion, évaporation, filtration, transport de germes,...).

- Capacités dispersives et épuratoires des sols :

Concerne les propriétés auto épuratoires des sols.

- Intrusions marines

Ce critère concerne les régions côtières (présence ou non de biseau salé)

- Qualité du réseau hydrographique :

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. (forêt, cultures, élevage, habitat, tissu industriel, etc....).

- Points sensibles

Sur certains sites, de par l'activité à risque qui y est pratiquée, la vulnérabilité de la nappe est augmentée significativement (les surfaces agricoles et les décharges).

2.3. Les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998 b).

Elles peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Les méthodes de cartographies à index

Basés sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes.

- Les modèles de simulation

Ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants (Schnebelen 2002).

- Les méthodes statistiques

Elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude.

- Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères

Elles prennent en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et Dassargues 2000 ; Zaporozec et Vrba 1994).

Différentes méthodes ont été développées, testées notamment à l'échelle européenne. Les principales et les plus utilisées dans le domaine karstique et fissuré sont présentées ci-dessous.

2.3.1. La méthode "RISKE"

Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK (souscrite) en raison de sa spécificité karstique. RISKE est un acronyme qui reprend les initiales des cinq critères pris en compte **R**oche aquifère, **I**nfiltration, **S**ol, **K**arstification, **E**pikarst (Petelet-Giraud *et al.*, 2000).

La combinaison des cinq cartes correspondant à la transcription des cinq critères RISKE permet de calculer l'indice global de vulnérabilité (I_g) en chaque maille de la zone d'étude. A 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.

Le calcul de l'indice global de vulnérabilité I_g se fait selon la formule :

$$I_g = \alpha R_i + \beta I_j + \delta S_k + \gamma K_l + \varepsilon E_m$$

$\alpha, \beta, \delta, \gamma, \varepsilon$: poids des critères RISKE ;
 i, j, k, l, m : indices des critères RISKE.

Toutes les alternatives des critères sont classées en 5 catégories indexées de 0 à 4, du moins au plus vulnérable. Dans la même logique, l'indice global de vulnérabilité (I_g) obtenu 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 (couleur claires à foncées pour représenter les zones de vulnérabilité faible à très forte).

2.3.2. La méthode GOD

Ce système a été développé par Foster en 1987, il est illustré par la Figure 86. Il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'identification du Type de nappe (**G**roundwater occurrence), Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (**O**verall aquifer class) et la Profondeur de la nappe (**D**epth to groundwater table).

Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.

2.3.3. La méthode DRASTIC

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

Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur la distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée (**D**epth to groundwater), recharge de l'aquifère (**R**echarge), nature de la zone saturée (**A**quifer media), nature du sol (**S**oil media), topographie et pente en % (**T**opographie), nature de la zone non saturée (**I**mpact of the vadose zone) et perméabilité de l'aquifère (**C**onductivity).

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité. L'index de vulnérabilité final (Di) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante :

$$Di = DnDp + RnRp + AnAp + SnSp + TnTp + InIp + CnCp$$

Où D, R, A, S, T, I, C, sont les paramètres cités plus haut

n : notation accordée à chaque paramètre ;

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

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

Les notations généralement accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentées dans le Tableau 2. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

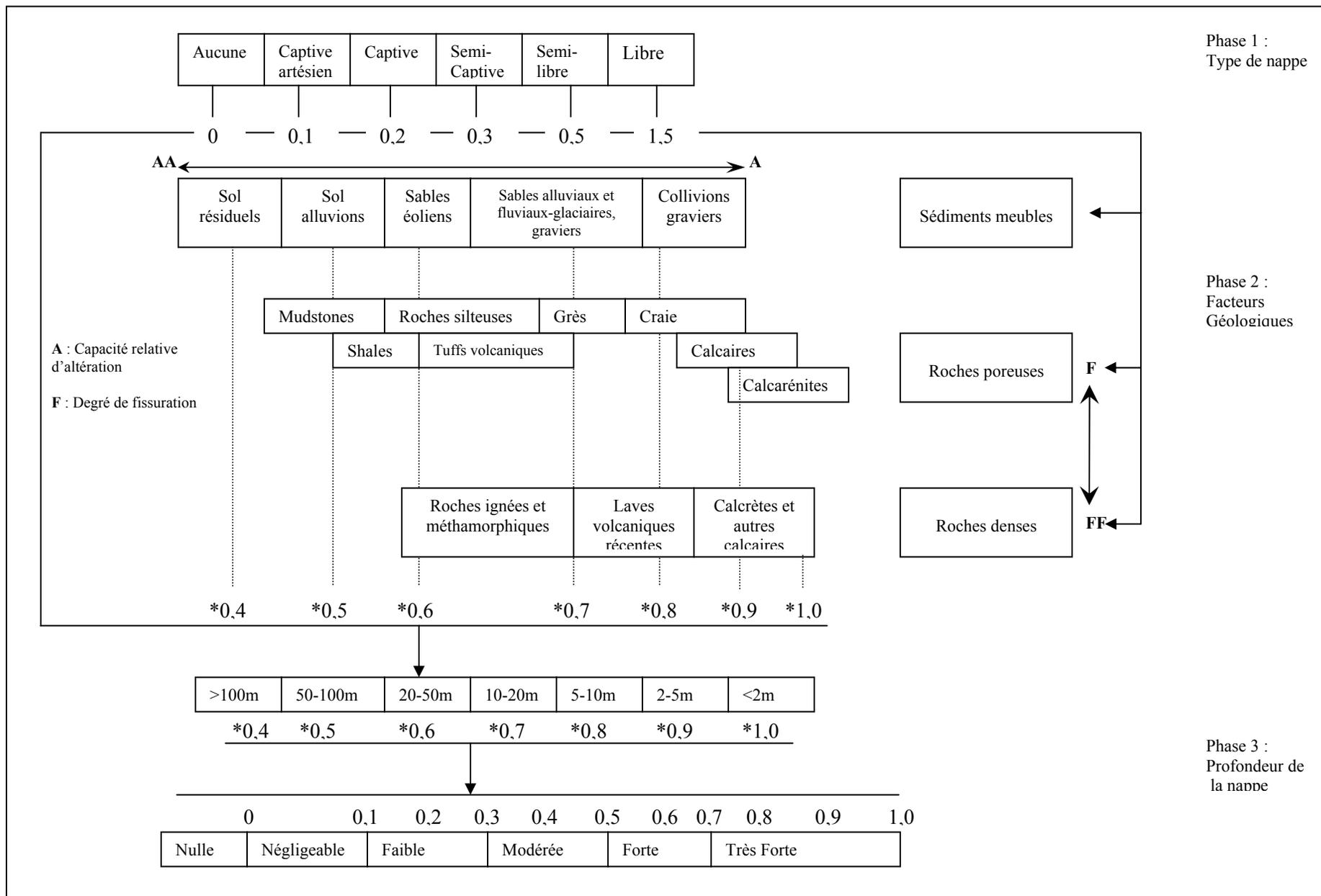


Fig. 86 - Système empirique GOD ; pour une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.
 (D'après Foster, 1987 in Vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante _ Phase 1 _ Rapport BRGM R 51783 18).

La méthode DRASTIC propose deux systèmes de pondération suivant les conditions d'occupation du sol (Tableau 3) : occupation "normale" ou avec une occupation par une activité agricole intensive utilisant par exemple des produits phytosanitaires.

D : DISTANCE A LA NAPPE, EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATUREE		R : RECHARGE (PLUIE EFFICACE)	
Valeurs en mètre	Notation	Valeurs en mm	Notation
0 - 1,5	10	25,5	9
1,5 - 4,5	9	17,5 - 25,5	8
4,5 - 9	7	10 - 17,5	6
9 - 15	5	5 - 10	3
15 - 22	3	0 - 5	1
22,5 - 30	2		
30	1		

A : NATURE DE LA ZONE SATUREE		S : NATURE DU SOL	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sables	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats	7
Grès massifs	6	Limon sableux	6
Métamorphique altéré	4	Limon	5
Métamorphique	3	Limon silteux	4
Shale massif	2	Limon argileux	3
		Argiles non agrégée	1

T : TOPOGRAPHIE, PENTE		I : NATURE DE LA ZONE NON SATUREE	
Valeurs en % de la pente	Notation		
0 - 2	10	Calcaire karstique	10
2 - 6	9	Sable et gravier	9
6 - 12	5	Sable et gravier avec silt et argile	8
12 - 18	3	Grès	6
18	1	Calcaire	6
		Silt/Argile	1

C : PERMEABILITE	
$9,4 \cdot 10^{-4}$ m/s	10
$4,7 \cdot 10^{-4} - 9,4 \cdot 10^{-4}$ m/s	8
$32,9 \cdot 10^{-5} - 4,7 \cdot 10^{-4}$ m/s	6
$14,7 \cdot 10^{-5} - 32,9 \cdot 10^{-5}$ m/s	4
$4,7 \cdot 10^{-5} - 14,7 \cdot 10^{-5}$ m/s	2
$4,7 \cdot 10^{-7} - 4,7 \cdot 10^{-5}$ m/s	1

Tab 9. Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (d'après Lallemand-Barrès, 1994).

CRITERES	Facteurs de pondération	
	Normal	Avec produit
D : profondeur	5	5
R : recharge	4	4
A : Milieu aquifère (zone saturée)	3	3
S : Milieu sol au-dessus de la zone non saturée	2	5
T : Topographie	1	3
I : nature de la zone non saturée	5	4
C : perméabilité aquifère	3	2

Tab. 10 – Facteur de pondération

2.3.4. Méthode SINTACS

La méthode SINTACS est dérivée de la méthode DRASTIC. Elle a été développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Pételet *et al.*, 2000).

Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien :

- S : Soggiacenza (profondeur de la nappe) ;
- I : Infiltrazione (infiltration) ;
- N : Azione del Non Saturo (fonction de la zone non saturée) ;
- T : Tipologia della Copertura (sol) ;
- A : Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero (caractéristique hydrogéologiques de l'aquifère) ;
- C : Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique) ;
- S:Acclività della Superficie Topographica (pente moyenne de la surface topographique).

Contrairement à DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et ans des cellules différentes, des facteurs de pondération variables selon les situations (Schnebelen *et al.*, 2002). L'index de vulnérabilité I_v est calculé selon la formule :

$$I_v = \sum P(1,7) W(1,n)$$

Avec : P (1, 7) : index des critères 1 à 7

W (1, n) : poids de chaque classe (varie de 1 à n)

L'index final résultant de cette méthode est divisé sous forme de pourcentage puis d'intervalles définis sur la base de 500 tests. Ces intervalles sont regroupés en six classes de vulnérabilité. SINTACS utilise donc les sept mêmes paramètres que DRASTIC mais est plus flexible au niveau du système d'indexation et de pondération. L'utilisateur code

Les données d'entrée en fonction des situations locales de chaque cellule, avec la possibilité d'utiliser des classifications différentes suivants les conditions.

2.3.5. Autres méthodes

- Z. Alamy et C. Langevin (1989) procèdent à une analyse détaillée de la couverture de sol (Lallemand-Barrès, 1994).

Les facteurs et critères retenus par ces auteurs, ainsi que la notation et le poids attribués aux critères sont résumés dans le Tableau 4. On peut constater que la pondération des critères est très subjective.

Paramètres	Classe				Poids
Pente	0-5% (5)	5 – 10% (2)	10 – 15% (1)	> 15% (1)	1/2
Epaisseur couverture	< 5m (1)	5 – 2m (3)	2 – 4m (5)	< 1m (5)	-
Perméabilité couverture ou de l’affleurement	> 10 ⁴ (25)	> 10 ⁴ 10 ⁶ (5)	10 ⁴ 10 ⁹ (3)	10 ⁹ (2)	1
Perméabilité Sous-sol non saturé	> 10 ⁻⁴ (25)	> 10 ⁴ 10 ⁶ (5)	10 ⁴ 10 ⁹ (3)	<10 ⁹ (2)	1
Hydromorohie	Sans (5)	Temporaire (3)	Temporaire (2)	Permanente (1)	1/3
Profondeur nappe	> 20m (1)	5 – 20m (3)	1 – 5 m (5)	< 1m (25)	1/2
Nature couverture	Sable (3)	Gravier (5)	Argile sableuse limon (2)	Argile (1)	-
Fracturation	Sans (1)	1 direction Proche (3)	2 directions Proches (5)	Champs (25)	-
Densité de fracturation	(1)	(3)	(5)	(25)	-

Tab. 11- Paramètres valeur et poids retenus pour l’élaboration d’une carte de Vulnérabilité (Alamy, Langevin, 1989).

- Dans le cadre d'une application à la nappe de la craie dans le secteur de Guines (Pas-de-Calais), J. Ricour (1988) propose les paramètres suivants comme critères pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité : nature du recouvrement sur l'aquifère crayeux, topographie et profondeur de la nappe sous le sol (Tableau 5).

Cette carte de vulnérabilité est superposée à des facteurs à caractère évolutif ayant trait à l'occupation des sols pour constituer une carte de sensibilité aux risques de pollution (Lallemand-Barrès, 1994 in *Rapport BRGM R 51783 23*)

	Paramètre	Poids global	Echelle de vulnérabilité croissante et poids de chaque paramètre 4			
Carte de vulnérabilité	Lithologie et recouvrement	1	Argile sur craie	Alluvion sur craie	Limon sur craie	Craie en affleurement
			0	1	2	3
	Topographie	0.5	Pente >10 %	5 < pente < 10 %	1 < pente < 5 %	Pente < 5 %
			1	2	3	4
Profondeur du niveau sous le sol	0.5	Profondeur > 30 m	15 < profondeur < 30m	5 < profondeur < 15m	Profondeur < 5m	
		1	2	3	4	
Zonç fracturées	1	Zone intermédiaire susceptible de correspondre à des zones fracturées				
			1			
Carte de sensibilité	Typologie de l'occupation du sol (urbanisation, routes et forets..)	Superposition par classe à la carte de vulnérabilité	Classe 1 Forets, friches	Classe 2 Milieu agricole et marécageux	Classe 3 Milieu urbain et industrielle, route, carrières, décharges	

Tab 12. Paramètres pris en compte dans l'élaboration des cartes de vulnérabilité et de sensibilité du milieu souterrain aux risques de pollution (Ricour, 1988).

- S. Munoz (1989) et S. Munoz, C. Langevin (1991), pour élaborer les cartes de vulnérabilité au Guatemala, retiennent les paramètres présentés dans le Tableau 6.

Images	Variables Paramètres	Echelle de vulnérabilité et poids relatif de chaque paramètre										Poids Global
		(Très vulnérable)						(Peu vulnérable)				
Zone non saturée	Epaisseur	< 10 m		10-20 m		20-30 m		30-50 m		> 50 m		5
	Valeur attribuée	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	
		1	5	3	15	10	50	25	125	50	250	
Zone de recharge	Type de milieux Valeur attribuée	de recharge				hors zone de recharge		urbain				3
		Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	
		1	3	10	30	25	75					
Densité de drainage	Degré de perméabilité Valeur attribuée	très perméable		perméable		semi-perméable		résistant		très résistant		2
		Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	
		1	2	2	4	3	6	10	20	25	50	
Fracturation	Niveau probable de fracturation Valeur attribuée	très fracturé				peu fracturé						1
		Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	
		1	1	25	25							

Tableau 13 : Paramètres pris en compte dans l'élaboration de la carte vulnérabilité (valeur finale = valeur initiale * poids global) (Munoz, Langevin, 1991).

- Dans l'étude de M.F. Suais (1990) où les critères de vulnérabilité sont assimilés aux critères d'évaluation des risques de pollution, on peut retenir la proposition de nouveaux critères relatifs aux sols, qui sont des critères non plus stables, mais variables dans le temps ou par intervention humaine, tels que degré d'imperméabilisation, densité et nature du couvert végétal et densité de drainage (Figure 2).

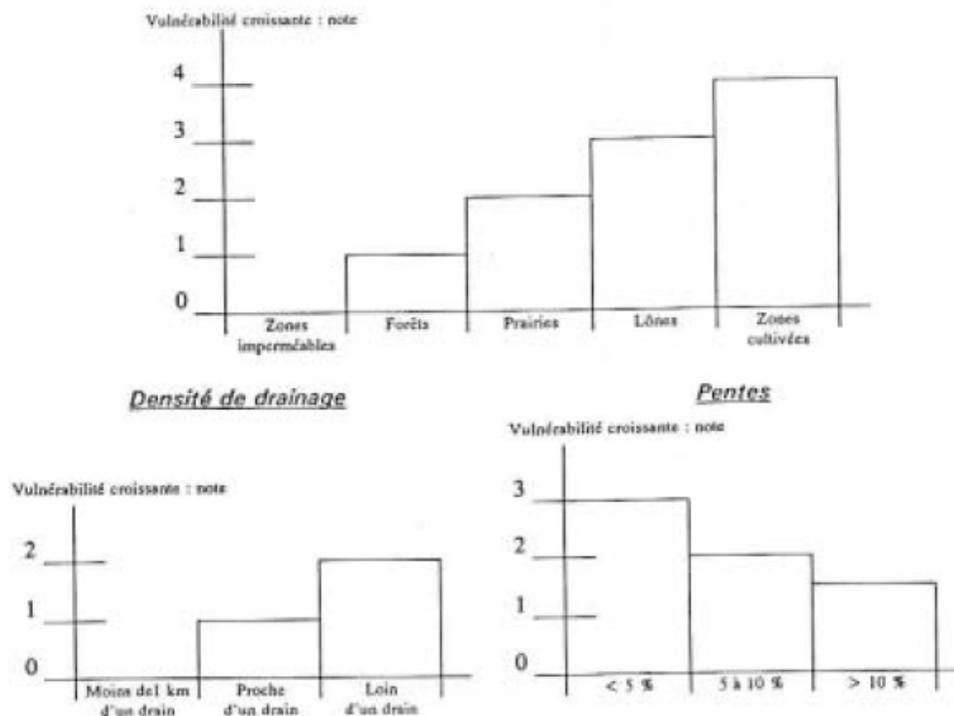


Fig.87- Critères relatifs à la surface du sol (M.F. Suais et al, 1990)

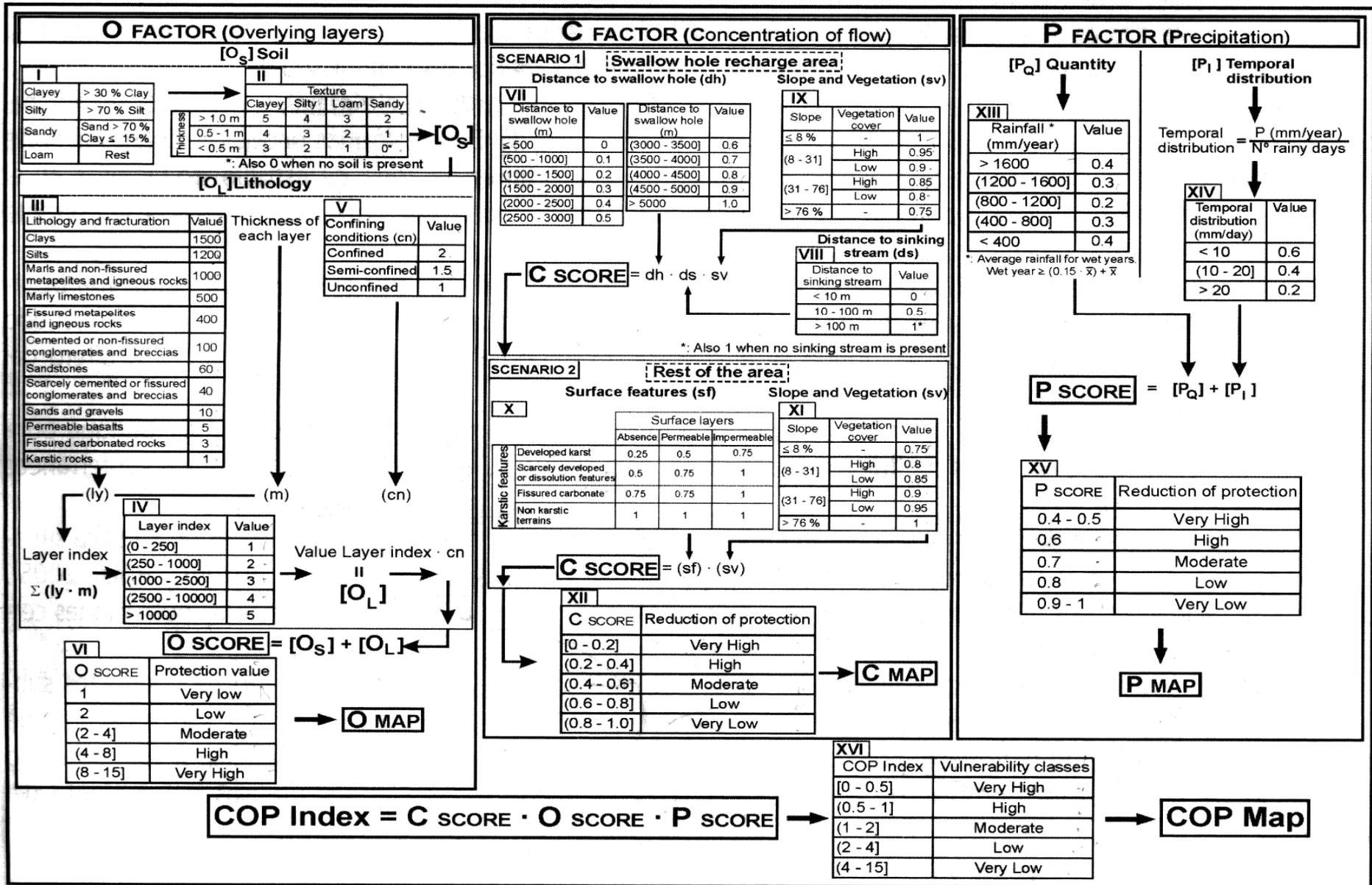
Des critiques sont souvent émises concernant les méthodes de pondération et d'indexation des paramètres. Par exemple une des limites de la méthode DRASTIC serait le trop grand nombre de critères (7) pris en compte, ce qui implique que l'influence d'un paramètre particulièrement important pour une certaine thématique peut être "masqué" par les autres paramètres pris en compte.

2.3.5.1 Méthode de COP

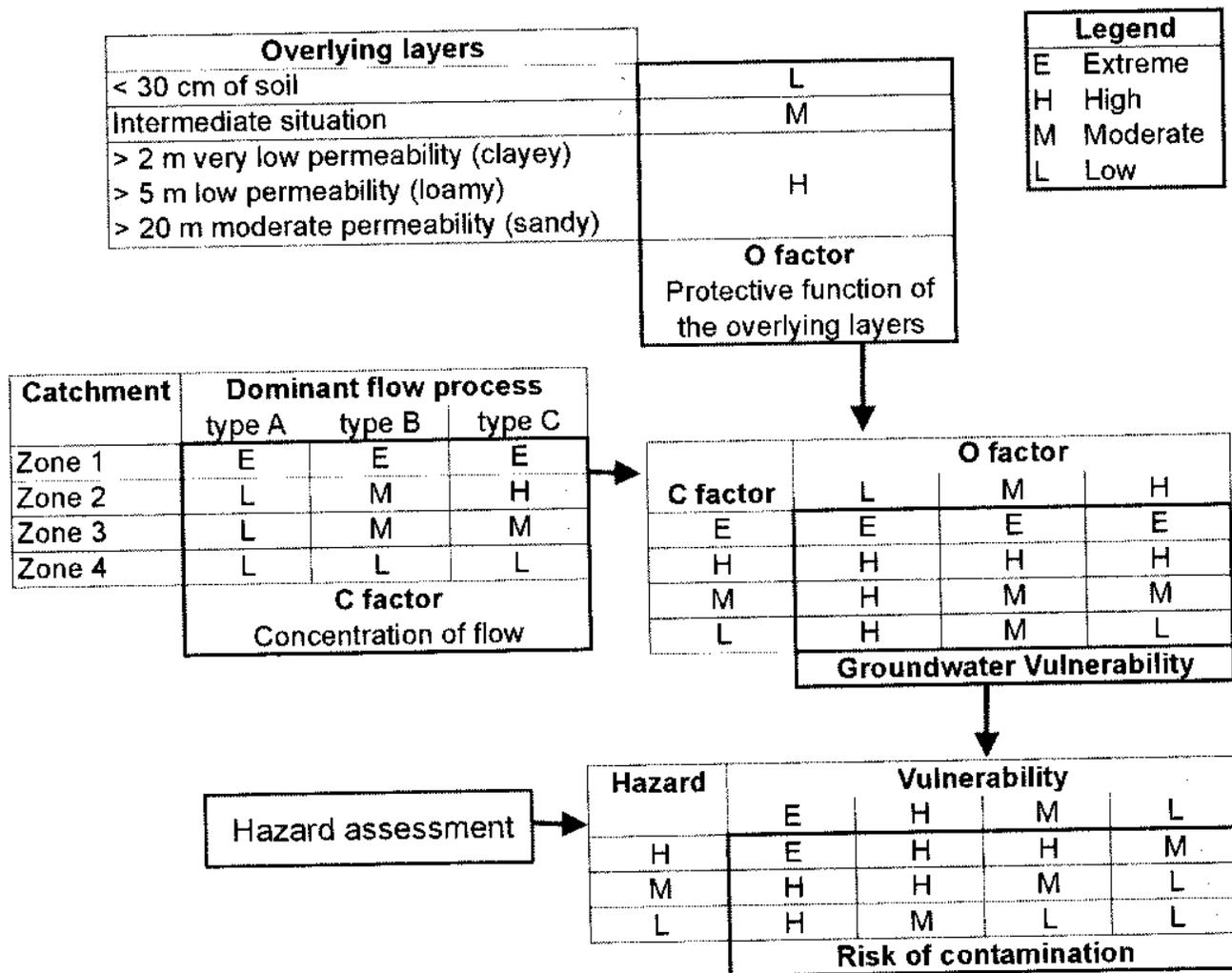
La méthode de COP est appliquée pour évaluer une vulnérabilité intrinsèque à la contamination des eaux souterraines. Cette méthode tiens compte de trois facteurs. Le facteur C est spécifique aux aquifères carbonatées, a une relation avec les conditions de superficie, qui réduisent la capacité de la propagation du contaminant dans la zone non saturée, O (overlying layers) la capacité de la couche superficielle qui protège la zone non saturé en fonction de ses caractéristiques pédagogiques et lithologiques et P (concentration of flow) concerne les précipitation comme principale agent de transport des polluants de la surface topographique vers la surface piézométrique.

Le tableau suivant présente un schéma général de la méthode (J. M. Vias, et al 2006)

Cette méthode est encore simplifiée en deux paramètres C (concentration of flow) concerne les conditions et les caractéristiques de l'infiltration des de la surface à travers les dolines et les ouvertures karstique vers le réseau hydrographie karstique souterrain et O (overlyn layers) tien en compte l'épaisseur et les propriétés de la couche de recouvrement (N. Goldscheider, et al 2006) .



Tab. 14- Schéma général de la méthode COP, in Vias et al. 2006



Tab. 15- Schéma simplifier de la vulnérabilité et cartographie du risque dans les régions karstiques. N. Goldscheide Université de Neuchâtel.

D'autres méthodes de cartographie de la vulnérabilité ont été développées dans un but d'établir une méthode d'établissement des périmètres de protection (exemple méthode EPIK et méthode DISCO (guide pratique en préparation, OFEFP 2002, Suisse). Cette dernière méthode est spécifique au milieu fissuré; elle prend en considération trois types de paramètres : les paramètres de discontinuité (failles, discontinuités lithologiques mises en évidence à partir des cartes géologiques, photos aériennes et relevés de terrain), les paramètres relatifs à la couverture protectrice et les paramètres de type ruissellement.

La difficulté dans l'élaboration de ces méthodes réside essentiellement dans le choix des critères, leur notation, et le poids qu'on leur attribue, et aussi dans le fait de retenir des critères qui sont le plus indépendants les uns des autres. Il est difficile d'établir une méthode universelle de cartographie multicritère car chaque cas d'étude est particulier et un paramètre important dans un cas le sera peut être beaucoup moins dans un autre (Schnebelen *et al.*, 2002).

3. ESSAI D'ETABLISSEMENT DE LA CARTE DE VULNERABILITE DES CAPTAGE D'EAU DANS LE MILIEU KARSTIQUE (EPIK) de la plaine de Chéria. N.E

3.1. Résumé de la méthode

La méthode de cartographie de la vulnérabilité en région karstique est apparue en 1977 par l'office fédéral de la protection de l'environnement et qui a été développée et modifiée en 1996 pour arriver à la méthode EPIK (OFEFP, CHYN) qui tient compte des connaissances les plus récentes relatives au modèle conceptuel de l'écoulement des eaux souterraines dans les aquifères karstiques (J.P Tripet).

L'estimation de la vulnérabilité d'un aquifère calcaire est souvent difficile car la karstification et la fissuration échappent souvent à l'observation directe vu le recouvrement de l'aquifère par les formations quaternaires.

L'importance de l'aquifère de Chéria et sa capacité d'emmagasinement nous a emmenés à penser sérieusement à sa protection et essayé d'établir une carte de vulnérabilité en appliquant la méthode EPIK (Epikarst, protective cover, Infiltration conditions, Karstic network) (Doerfliger et Zwahlen, 1995).

Cette vulnérabilité qui s'explique par la structure fortement hétérogène de l'aquifère karstique, avec d'une part les perméabilités très élevées dans les conduites souterraines et d'autre part une alimentation de surface qui se fait de manière diffuse ou les processus de filtration ou d'auto épuration des polluants n'auront pas le temps de se développer se caractérisent par une fonctionnelle qui requiert une protection toute particulière. La délimitation des zones de protection pour les captages à partir de cet aquifère exige la restriction de beaucoup d'activités dans les zones appelées S1, S2 et S3 qui doivent permettre de garantir un certain nombre d'objectifs

Zone S1 : dans laquelle il faut éviter les dégâts aux installations de captage et la pollution de leur environnement immédiat.

Zone S2 : elle doit également permettre d'éviter que l'eau captée soit polluée en tenant à l'écart des captages les germes et les virus.

Zone S3 : cette zone doit garantir un assainissement satisfaisant dans l'espace et dans le temps, dans le cas des pollutions accidentelles.

Sur la base de critères géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques ; la méthode EPIK se veut rigoureuse dans la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines des système karstiques.

La méthode EPIK est une approche globale de la vulnérabilité proposer pour faciliter les travaux des hydrogéologues destiné à la protection des aquifères karstiques. Cette dernière se base principalement sur.

3.2. LA METHODE MULTICRITERES: E.P.I.K

3.2.1. Démarche

La vulnérabilité des eaux souterraines en milieu karstique est évaluée, généralement, par la méthode multicritères à indices, appelée EPIK, qui prend en compte quatre critères: l'Epikarst, la couverture Protectrice, les conditions d'Infiltration et le développement du réseau Karstique. Ces critères correspondent à quatre caractéristiques spécifiques responsables de l'organisation des écoulements au sein d'un aquifère karstique telles quelles sont présentés sur **la figure** ,

Celle méthode permet d'évaluer la sensibilité des eaux souterraines des régions karstiques de manière globale et rigoureuse. Après avoir déterminé les limites du bassin d'alimentation des source ou es captages, la méthode se déroule en trois étapes:

- 1- Evaluation semi quantitative et cartographie de chacun des quatre critères en tout point du bassin d'alimentation. Lors de cette évaluation, chaque critère est caractérisé par un indice.
- 2- Calcul de la valeur du facteur de protection F, en tout point du bassin d'alimentation, par combinaison et pondération de la valeur des quatre critères cartographies antérieurement.
- 3- Représentation cartographique de la répartition du facteur F pour l'ensemble du bassin d'alimentation, Grâce a une relation d'équivalence entre le facteur F et les zones de protection, la carte obtenue permet de délimiter les zones SI. S2 et S3 de manière rigoureuse.

3.2.2. Evaluation semi quantitative

L'évaluation semi quantitative des critères E, P, I et K, c'est-à-dire la détermination des indices de ces critères est effectuée à l'aide de différentes méthodes directes ou indirectes, locales ou globales telles que les essais de traçage, la géophysique, l'étude géomorphologique, les analyses des hydrogrammes de crues, les sondages à la pelle rétro, l'interprétation des photos aériennes.

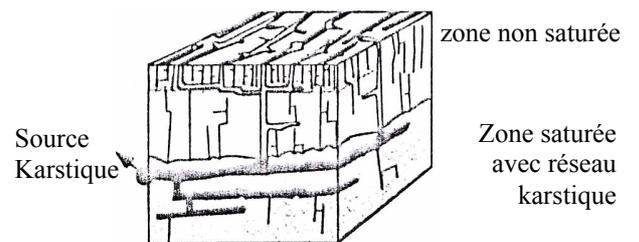
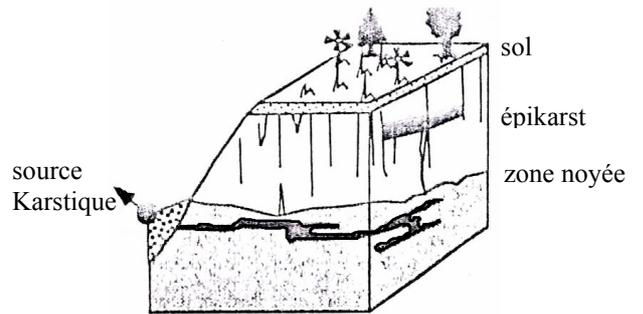
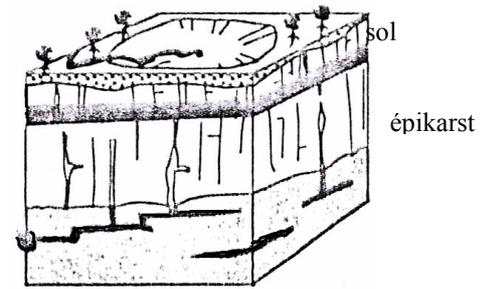
L'application de la méthode se fait de la manière suivante:

1- Cartographie des indices pour l'épikarst
2-Cartographie des indices pour les conditions d'infiltration

3- Cartographie des indices pour la couverture Protectrice

4- Caractérisation du développement du réseau karstique et attribution d'un facteur global ou par secteurs pour le bassin d'alimentation.

Les différents indices attribués à chacun des critères E, p, I et K figurent dans le *tableau 01*.



3.2.3. Calcul du facteur de Protection

La valeur du facteur de protection F sera déterminer après la combinaison des quatre cartes établies précédemment en tout point du bassin d'alimentation. Ceci nécessite:

- Le découpage du bassin d'alimentation en surfaces élémentaires. On utilisera de préférence une grille à maille carré de 20 mètres de cote.

- La transformation des indices des critères E, P, I et K en valeurs numériques; celles-ci sont des constantes présentées et commentées ci-après (Tab. 1).

- La combinaison pour chaque élément de surface, des valeurs des critères; on utilise pour cela des coefficients de pondération constants, qui tiennent compte de l'importance relative de chaque critère; ces coefficients sont eux aussi représentés et Commentés ci-après (Tab. 2).

La combinaison des quatre cartes peut, être sensiblement facilitée par l'utilisation du logiciel Map-Info pour la mise en relief de la carte de vulnérabilité selon la méthode EPIK

E1	E2	E	P1	P2	P	P4	I1	I2	I3	I4	K1	K2	K3
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

Tab. 17- Valeur des critères E, P, I et K

(Rmq: la valeur la plus basse correspond à la situation la plus vulnérable)

La pondération conduisant au calcul facteur F, en chaque maille de la grille, est effectuée de la manière suivant:

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l \dots\dots\dots (a)$$

Avec F : facteur de pondération

i, j, k, l: indice de chacun des critères

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: coefficients de pondération de chacun des critères

Pour définir les valeurs des indices et des coefficients dans l'équation (a) nous avons pris en considération plusieurs scénarios tel que le cas d'une doline recouverte d'un sol épais qui sera la plus vulnérable, l'alimentation des pertes dans les calcaires sans couverture pédologique.

Les valeurs qui ont finalement été retenues pour le calcul des facteurs de protection sont présentées dans le tableau suivant:

forage	Prof. (m)	NS (m)	Prof. Toit calcaire (m)	Prof zone fissurée (m)	recouvrement	Prof. Karts	E	P	I	K	F
502	255	42	00	130	-	-	E1	P1	I1	K3	S1
503	24.5	-	13.5	3-23	Perméable	-	E3	P4	I2	K3	S3
521	153	17.5	37	37-153	//	37-68	E3	P3	I2	K1	S2
525	300	08.5	21	190-300	//	-	E3	P4	I3	K3	S3
526	300	140	7.5	100-300	//	-	E3	P3	I3	K3	S3
533	800			-	Peu perméable	-	E3	P4	I2	K3	S3
535	490		261	-	impermeable	-	E3	P4	I4	K3	S1

Tab. 18 – Valeurs des facteurs de protection

4. Délimitation des zones de protections

Les valeurs du facteur de protection F permettent une cartographie de sa répartition, en prenant en compte la relation entre le facteur f et la zone de protection qui a fait l'objet d'un examen lors des visites des sites et qui sont mentionnées sur le tableau suivant:

Zone de vulnérabilité	Facteur de protection F	Zone de protection
Très élevée	$F < 19$	S1
élevée	$20 < F < 25$	S2
modérée	$F > 25$	S3
faible	P4	Reste du terrain

Tab. 19- délimitation des zones de protection

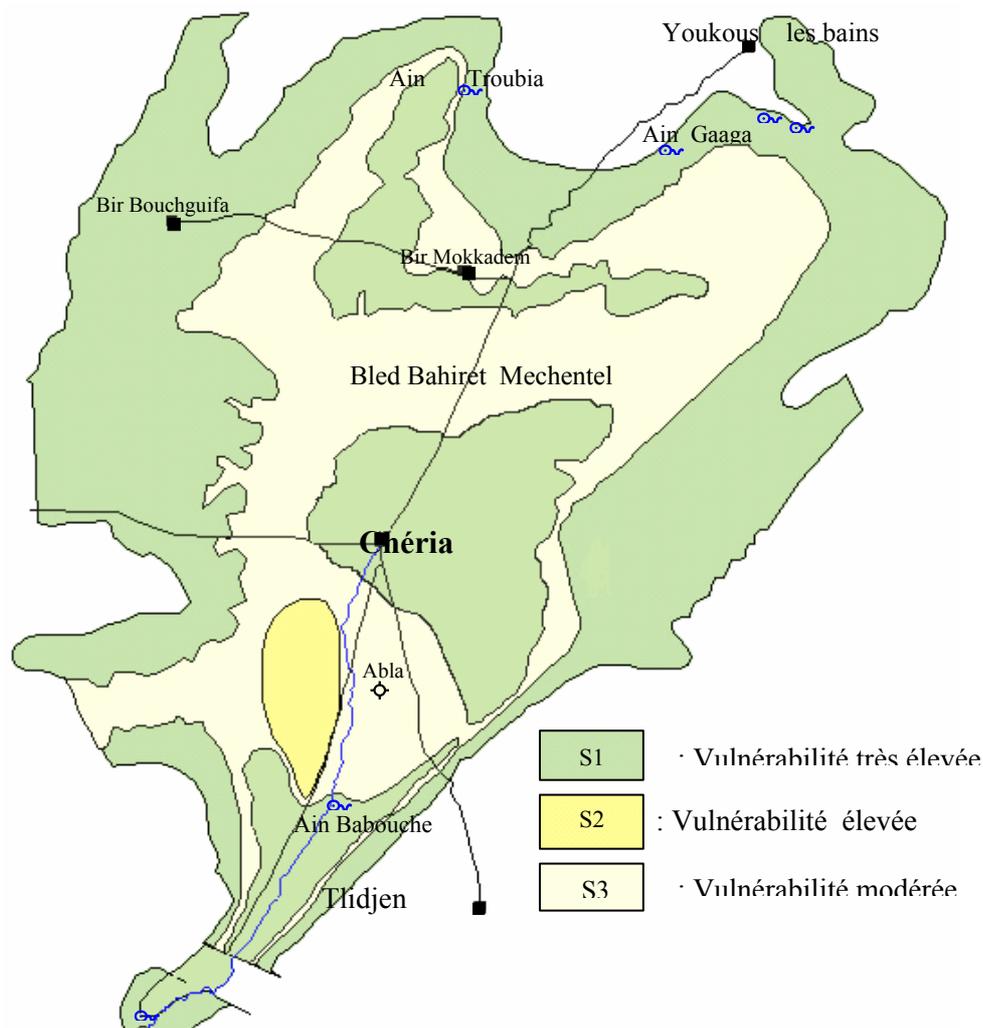


Fig. 01 – Carte de vulnérabilité selon la méthode EPIK du plateau de CHERIA

La carte permet de visualiser les zones de protection proposées, S1 à S3 pour le plateau de Chéria. Elles doivent permettre la mise en œuvre de limitation plus efficace pour l'utilisation du territoire.

5. Conclusion

L'analyse des données analytiques observées sur le réseau de surveillance de la qualité des eaux du système aquifère (les alluvions du Moi-Plio-Quaternaire) a permis d'identifier les nérolgiques ou les sources locales de la contamination des eaux souterraines par les nitrates le long de la ligne Chéria, Abla et Ain babouche l'exutoire.

La contamination du système aquifère par les nitrates résulte à la fois de l'élevage ovin, bovin et les eaux usées drainées par l'oued. Les décharges incontrôlées constituent également une autre source de contamination. En effet la proximité du niveau d'eau et le ruissellement des lixiviats issus des décharges favorisent la pollution des eaux.

La présence des teneurs en nitrates aggravée fait penser à un risque sanitaire sur les populations qui s'alimentent directement avec l'eau des puits de faible profondeur et à la proximité de l'oued, ce qui impose une stérilisation des eaux avant toute consommation.

Cette situation nécessite une intervention rationnelle et préventive, ce qui nous a incité de penser à la protection des eaux souterraines en étudiant les méthodes de la cartographie de la vulnérabilité.

Un essai de l'application de la méthode EPIK qui reste à développer encore, nous a permis de localiser trois zones distinctes, en fonction de degré de vulnérabilité

***CONCLUSION GENERALE
ET
RECOMMANDATIONS***

Le plateau de Chéria situé au Nord Est de l'Algérie. Constituée essentiellement par une succession des formations sédimentaires. Dont la superposition du bas en haut des marnes du compagne, les calcaires du maestrichtien, ainsi que les calcaires de l'Eocène et le recouvrement Moi-Plio-Quaternaire, sont séparés par une couche des marnes daniennes

Le climat de la région est semi-aride, la moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 200 mm/an notant la densité des pluies orageuses pendant les mois de l'été.

Les bilans hydriques calculés sont en générale déficitaires à cause de l'utilisation des moyennes (ETR de l'ordre de 150 mm. et un déficit qui tourne autour de 100 mm).

Les études géologiques, géophysiques et hydrogéologiques ont permis de définir trois aquifères : l'aquifère des calcaires Maestrichtiens qui est très important aux bordures et stérile au centre, l'aquifère des calcaires Eocènes le plus important de point de vue réserve et exploitation ainsi que celui du recouvrement Moi-Plio-Quaternaire qui est devenu sans intérêt hydrogéologique après des décennies de sécheresse.

La cartographie piézométrique des différentes périodes d'observation a montré un sens d'écoulement grossièrement convergent vers le Sud (l'exutoire), dont les principaux axes prennent la configuration suivante:

Dans le sou bassin Nord l'écoulement est de direction Nord Sud, alors que dans le sou bassin Sud l'écoulement convergeant vers un axe de drainage qui coïncide clairement avec l'oued de Chéria de provenance Est et Ouest.

Un gradient hydraulique variable entre le Nord et le Sud, et d'une période à l'autre.

L'étude hydrochimique a été élaborée dans le but de caractériser les types d'eau de la région à partir de plusieurs modes d'interprétation usuelles en hydrochimie, dans le but de montrer :

- Les faciès chimique des différentes eaux des aquifères, qui est chloruré-calcique ou chloruré- magnésien, ce faciès a probablement masqué le faciès bicarbonaté caractérisant les eaux des bordures qui alimentent le système aquifère.

- La forte minéralisation observée, particulièrement au Sud, qui n'est pas due uniquement à l'origine naturelle, mais elle est attribuée aussi aux activités anthropiques.

La cartographie hydrochimique a visualisé une zone à forte concentration, au Sud, où la quasi-totalité des éléments chimiques présente des teneurs importantes, confirmant, ainsi, le sens d'écoulement Nord-Sud (zone d'accumulation)

La qualité des eaux de la région a été étudié avec une grande particularité, qui a pris en considération la nature des eaux des formations bicarbonatés, généralement de très bonne qualité et ceux de l'aquifère alluvionnaire qui reçoit les eaux des infiltration ou se produit un mélange entre les deux famille qui se terminent au sud avec une mauvaise qualité. Cette dernière est due aux principaux facteurs d'influence qui sont ; la minéralisation, l'oxydoréduction et la pollution par les nitrates. la teneur totale en sels minéraux des eaux de l'aquifère est due a deux causes : naturelles et anthropiques.

Les processus naturels sont dus aux conditions climatiques, l'évaporation et la concentration par dissolution tan disque pour les processus anthropiques la cartographie des chlorures, conductivités et nutriments a définie la zone sud comme étant la plus polluée, du

faite que cette partie reçoit, par le biais de l'oued Chéria, toute les eaux usées de la ville. Cette situation peut être aggravée par la surexploitation très remarquable à la périphérie de l'oued ainsi que l'activité d'élevage très connu dans la région.

Cette situation nous a conduit à penser à l'étude de la vulnérabilité de ce système, notamment celui reposer dans les calcaires éocène et qui représente un véritable château d'eau pour la région. À cet effet nous avons, dans le dernier chapitre, exposé les différentes méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques et fissurés, et appliqué deux d'entre elles pour comparer les résultats et choisir le modèle de protection le plus adéquat.

L'application de la méthode EPIK, première de son genre dans la région, a permis de visualiser trois zones de différents degrés de vulnérabilité, qui doivent permettre la mise en œuvre de limitations plus efficaces pour l'utilisation du territoire.

Cette étude nous amène à proposer les recommandations suivantes afin de participer à la protection quantitative et qualitative de la ressource en eau :

- lancer des travaux de recherches très approfondies en géologie permettant d'établir la carte géologique de la région qui reste sommaire jusqu'à nos jours, ainsi qu'une carte structurale très bien détaillée.
- Tout creusement de nouveau puits doit être effectué après une étude sérieuse et modérer les pompages en utilisant les nouvelles techniques d'irrigation (goutte à goutte)
- L'installation d'un réseau de piézomètres pour contrôler la fluctuation de la nappe
- Des suivis saisonniers de la qualité chimique des eaux pour éviter tout type de pollution naturelle ou accidentelle.
- Les affaissements de Draa Douamis nous incitent à penser à dresser une carte de risque d'effondrements sachant que toute la région centrale est caractérisée par une karstification dans les clinquants premiers mètres des calcaires éocènes
- Convaincre les responsables des services de l'environnement d'instaurer dans la conception des captages d'eau la notion des périmètres de protection notamment ceux réservés aux milieux carbonatés.
- Maîtriser le stockage et l'utilisation des déjections animales et rejets urbains
- reprendre une étude ancienne faite par des Indous (ANRH de Tébessa), pour la réalisation d'un barrage d'eau à l'exutoire à Ain Babouche, pour améliorer les réserves de la ressource en eau.

BIBLIOGRAPHIE

- Alberto & all, (1995)** : La qualité des eaux souterraines et sa relation des aquifères. Un exemple de Florence. *Revue hydrogéologie* N°3 p59-72
- Almahallawi K, (2005)** : Modélisation des interactions entre les paramètres de l'utilisation des sols, de l'urbanisation et les facteurs hydrologiques pour l'analyse de la qualité des eaux souterraine en zone méditerranéenne (ex de la bande de GAZA, Palestine) Pp 147-182
- ANONYME, (1973-1975)** : Fiche technique des forages : F9, J8-9bis, JK8, OJ1, F2, BBC1, CH1, CH2, et CH4. (DHW : direction d'hydraulique de la wilaya de Tébessa)
- AHKOUK S. (2004)** : Impact des fertilisants agricoles et du mode d'irrigation sur la qualité des eaux souterraines en zones irriguées sous climat semi-aride : cas de la plaine des Chtouka. Bassin du souss-Massa. Maroc Thèse doctorat. Université Ibnou Zohr Agadir 134p.
- Baali F, (2000)** : Eude hydrogéologique hydrochimique de la région karstique de Chéria N-E Algérien. Magister Univ Annaba Algérie 100p.
- Baali F, Rouabhia A, Kherici N et Djabri L, (2006)**: Natural chemical tracers of urban pollution: case of Born example of application on the area of Algerian Cheria. WRP, LLC ISBN-13: 978-1-887201647-6 Michigan, USA Pp 39-45.
- BOUTALEB S. (2000)** : Impact de la géologie et du climat des bassins versants sur la qualité des eaux d'une grande nappe alluviale en climat semi-aride : application aux relations hydrogéologiques entre haut-atlas et la plaine de sousse. Thèse de doctorat Université Ibnou Zohr Agadir 164p.
- BAKALOWICZ M. (1979)** : Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse d'état Université P. et M. Curie Paris VI.
- BOUCHAOU L., CHAUVE P., MUDRY J., MANIA J., HSISSOU Y. (1997)** : Structure et fonctionnement d'un hydrosystème karstique de montagne sous climat semi-aride : cas de l'atlas de béni Mellal (Maroc). *Journal of african earth sciences*, Vol. 26, n°2. pp225-236.
- Bodet & all, (2001)** : Fertiliser avec les engrais de ferme Brochure de Institut de l'élevage. ITAVI. ITCF. ITP. New Holland
- BRGM, (1974)** : Essai de classification et de cartographie de la qualité chimique des eaux souterraines. Dep. Hydrogéol. Orléans
- BRGM (2000)** : Gestion des sites (potentiellement) pollués. Version 2. Edition BRGM
- BRGM (2003)** : Carte de vulnérabilité intrinsèque des nappes du département de l'Eure-et-Loir échelle (1/100 000). 13p.
- BRGM, (1975-1979)** : Cartes de vulnérabilité à la contamination des eaux souterraines (FF: 1/250 000). BRGM, Orléans.

- B. Lumière et al. (2001)** : Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Application dans un contexte d'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eaux. Document du BRGM 300. Edition BRGM. France, 121p
- CHEVALLIER P. (1995)** : Gestion de l'environnement en milieux urbain et industriel. Collection sciences de l'environnement. Québec. Université de Québec. 577p.
- CASTANY G. (1963)** : Traité pratique des eaux souterraines. Dunod Edit. Paris, 641p.
- CASTANY G. et MARGAT (1977)** : Dictionnaire français d'Hydrogéologie. Bur. Rech. Géol. Minière, 249p.
- Castany. G, (1968)** : Prospection et exploitation des eaux souterraines. Édition Dunod, Paris 711p
- CGG (compagne generale de géophysique 1970)**: Prospection géophysique sur le plateau de Chéria. Rapport interne R.A.D.P. Paris VII 26p.
- Chaffai H, (1986)** : Evaluation des ressources en eaux de la plaine de Chéria (NE Algérie). Synthèse et analyse des données. Doctorat 3^{ème} cycle, USTL, Montpellier II, 245p.
- Chaffai & all, (2003)** : Facteurs influençant le chimisme des eaux dans une zone semi-aride : Cas des aquifères d'El Ma Labiod, Tébessa, Hammamet et Chéria. ICOWaP-Sep2003 colloque Oasis, Eau et population Biskra Algérie p339-344.
- Chain et All (2004)** : Etude hydrochimique dans le but de l'estimation de la qualité de l'eau de quelques hydrosystemes de la Numidie. Colloque Terre et eau Annaba, Algérie **date et pages**
- DEBIECH. T H, (2002)** : Evolution de la qualité des eaux sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle N-E Algérien. Thèse de doctorat Univ de franche comté 199p.
- Desbordes, (2000)** : La pollution des eaux souterraines en Picardie, Maîtrise BG, Fac sciences Amiens 50p.
- DJABRI L. (1987)** : Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de Tébessa «essai de modélisation» Thèse de Doc. Ing. Univers. Franche
- DJABRI L. (1996)** : Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la seybouze. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Thèse de Doctorat d'État. Université de Annaba 280p
- EL MESLOUHI et al (1994)** : Elaboration de la vulnérabilité moyennant la méthode DRASTIC et le Système d'Information Géographique (SIG) (cas de la nappe de Souss-Chtouka) Guide book on Mapping Groundwater Vulnerability. Volume n° 16 Ed. de l'IAH, pp.94-99.

- Gaud (1977)** : Eude géologique et hydrogéologique du plateau de Chéria Wilaya de Tébessa. Rapport interne N°2. A.N.R.H de Tébessa 68p (Agence Nationale des ressources hydriques).
- GILLI E., MANGAN CH., MUDRU J. (2004)** : Hydrogéologie. Objets, méthodes, applications. Dunod, Paris, 303 p.
- GRAMIP (2002)** : Localisation des zones à risque vis-à-vis du transfert des substances phytosanitaires vers les eaux superficielles et souterraines en Midi-Pyrénées : Méthodologie de travail. 32p
- Guefaifia O 1996** : Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe aquifère d'El-Ma-Labiod. Wilaya de Tébessa. Thèse de magister en hydrogéologie univ Annaba. 143 p.
- Hassil & All, (2003)** : Les traceurs naturels de la pollution urbaine cas du Bore. Mémoire d'ing C.U.Tébessa Algérie. 60p
- Hsissou Y, (1999)** : Impact de l'environnement naturel et anthropique sur la qualité des eaux alluviales en zone semi-aride : cas de la plaine du Souss. Thèse d'état Es-Sciences Université Ibnou Zohr Agadir 228p.
- HSISSOU Youssef et al. (1995)** : Caractérisation des eaux de l'aquifère turonien du bassin du Tadla (Maroc) par le rapport des concentrations molaires Sr^{2+}/Ca^{2+} . Journal of Hydrology 183. pp 445-451.
- HSISSOU Y., CHAUVE P., MANIA J., MANGIN A., BAKALOWICZ, GAIZ (1996)** : Caractérisation des eaux de l'aquifère turonien du bassin du Tadla par le rapport des concentrations molaires Sr^{2+}/Ca^{2+} . J. Hydrolo. 183 : 445-451.
- KHERICI N. (1985)** Aquifère sableux de bords de mer. Hydrodynamique et hydrochimie exp. de la nappe de Bouteldja. NE Algérien. Thèse de Doctorat 3^{eme} cycle USTL Montpellier France 202p
- KHERICI N. (1993)** : Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba – la Mafragh) NE de l'Algérie. Thèse de Doctorat Es-Sciences Université de Annaba 170p
- KRIMISSA S. (2003)** : Nappes superficielles en zone semi-aride : origine des eaux et de la salinité, renouvellement. Exp. Des nappes Massa et Souss Maroc. Thèse de doctorat. Université de Franche-comté France. 190p
- Pain (1995)** : Traceurs chimiques naturels, marqueurs de la pollution urbaine : exemple du Bore. DEA. École Univ d'ing de Lille 40p.
- ROUABHIA Aek, BAALI F., KHERICI N., DJABRI L. (2004)** : Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El MA EL Abiod (Algérie) revue Sécheresse n°4, Vol.15

ROUABHIA Aek, BAALI F., KHERICI N., DJABRI L. (2004) : Vulnérabilité et impacts des activités anthropiques sur les eaux souterraines de la région d'El MA EL Abiod. Revue vecteur environnement, Vol.37, N°3

ROUABHIA Abdelkader (2006) Vulnérabilité et risque de pollution de la nappe des sables

Travi Y & Mudry J, (1997) : Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. *Hydrogéologie*, n°1, pp. 13-21.

UNISCO, (1980) (1): Aquifer contamination and protection; project 8.3 of the international hydrological programme, 439p.

Zenati, (1993) : *Etude hydrogéologique de la région de Chéria*. Rapport interne Agence des ressources hydriques de Constantine, 60p

El Achhab A 2002: contribution à l'étude de la minéralisation et identification des sources de contamination des eaux souterraines. Application au système aquifère du Bassin sahel-doukkala (Maroc) ; these doctora es science université de El Jadida p106

Somelette 1998 : contribution à l'étude hydrogéologique de la distribution et du devenir des nitrates dans des nappes de fissures, de l'échelle du périmètre expérimentale à celle du bassin versant cotier. These univ Tech Brest 222p.

Martin P 1991 : hydromorphologie des géosystèmes karstiques des versants nord et ouest de la Sainte Baume (France) ; thèse doctorat es science université Aix Marseille 326 p.

Castagny. G 1968 (1) Prospection et exploitation des eaux souterraines, édition Dunod, Paris 711p

RIAD. S, (2003) : Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse en cotutelle Univ Lille France et Univ Agadir Maroc 154p.

HANI. A, (2003) : Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : Application aux ressources en eau d'un bassin cotier méditerranéen. These de doctorat d'état Univ Annaba Algérie 214p.

PHILIPPE. M (2000) : Un modèle hydrologique de suivi de la pollution diffuse en bassin versant Thèse du polytechnique de Toulouse France. 303p.

MARTIN. P, (1991) : Hydromorphologie des géosystèmes karstiques des versants Nord et Ouest de la Sainte Baume France. Thèse de doctorat Univ Aix-Marseille II.312p.

SARI. A, (2002) : Initiation à l'hydrologie de surface. Cours Edition-distribution Houma 223p.

- SAADALLAH. A, (1995):** Géologie de l'Algérie septentrionale. Conférences Univ Franche-Compté France 101p.
- MARTINE. T et GOBARD. A, (1998):** Les climats mécanisme et répartition. Livre S.E.S.J.M./ Armand Colin, Paris. 172p.
- LITIM. A, (1988):** Sols des régions arides d'Algérie. Livre OPU Alger 378p.
- LACROIX M. (1991) :** Impact de l'irrigation sur un aquifère alluvial. Dynamique du système Basse Durance : nitrates et isotopes (cartographie), piézométrie (modélisation mathématique). Thèse Doct. Univ. 161 p.
- LEVIEL B. (2000) :** évaluation des risques et maîtrise des flux d'azote au niveau d'une parcelle agricole dans la plaine roumaine et bulgare. Application aux cultures de maïs, blé, colza et betterave. Institut polytechnique de Toulouse. 308p.
- LAMBRAKIS N.J. (1997):** The impact of human activities in the Malia costal area (Crete) on groundwater quality. Environmental Geology 36 (1-2) Nov
- LECCOMTE P. (2000) :** Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines. CNRCCP. Edition Lavoisier TEC.&DOC .194p
- LALLAHEM. S, (2002):** Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : Application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris. Thèse de doctorat Polytechnique Lille 211p.
- MAQSOU D. A, (1996):** Approche htdrologique et hydrochimique du caractere karstique eventuel d'hydrosystèmes souterrains de la craie du bassin de Paris. Thès de doctorat Univ des sciences et technologies de Lille 307p.
- NGUESSAN. A, (1985):** Contribution à l'hydrogéologie de la région centrale de la Cote d'Ivoire et analyse statistique des résultats de forage. Thèse de doctorat Univ de Franche-Compté France 154p.
- LABORDE. J.P, (1997):** Elements d'hydrologie de surface. Cours C.N.R.S. 26p.
- NICOLAOS. L et GEORGE. K, (2005):** Contribution to, the study of greek thermal springs : hydrogeological and hydrochirical characteristics and origin of thermal waters. Journal IAH volume 13 number 3 Juin 2005 pp 506 – 521.
- SCHOELLER H. (1962) :** Les eaux souterraines. Masson, Paris, 642p.

