

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

N° d'ordre :

**UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID- TLEMCEN
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE & DES SCIENCES DE
LA TERRE ET DE L'UNIVERS
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS**



**Mémoire de Fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de
MASTER en Géologie**

Option

HYDROGEOLOGIE

Présenté par :

SENOUCI Mohammed

**Evaluation qualitative des eaux souterraines de la plaine d'Hennaya, à la
consommation et à des fins d'irrigation
(Nord- Ouest Algérien)**

Soutenu le 30 /06 / 2015, devant les membres du jury :

M. BOUANANI A., Professeur, Univ. Tlemcen	Président
Mme. MAHI YEBDRI L., Maître Assistante A, Univ. Tlemcen	Rapporteur
Mme. BABA-HAMED K., Maître de Conférences, Univ. Tlemcen	Examinatrice
Mme HADJI F., Maître Assistante A, Univ. Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire 2014 - 2015

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A ma sœur Nadjet et mes grands-parents.

Je le dédie également au reste de ma famille et à mes amis.

Mohammed

Remerciements

Je remercie notre bon Dieu tout puissant de m'avoir guidé et de m'avoir donné la foi et le courage pour accomplir ce travail.

Je tiens à remercier et à exprimer ma sincère reconnaissance à Madame MAHI YEBDRI Lamia, Maître assistante, pour l'encadrement dont j'ai pu bénéficier et le temps qu'elle m'a accordé dans une atmosphère de confiance et d'autonomie de ma recherche.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement M. BOUANANI A., Professeur à l'Université de Tlemcen, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie vivement Mme. BABA HAMED K., Maître de conférences et Mme. HADJI F., Maître assistante, d'avoir marqué leur intérêt pour mes travaux en acceptant d'être membres du jury.

Finalement, je tiens à remercier l'ensemble des enseignants du département des Sciences de la Terre et de l'Univers.

RESUME

La plaine d'Hennaya, située au nord de la ville de Tlemcen, caractérisée par un climat semi-aride, possède actuellement des ressources hydriques relativement limitées, à savoir uniquement les eaux souterraines de la nappe Mio-Plio-Quaternaire, alimentée latéralement par les dolomies de Tlemcen. Ces dernières années, un essor agricole, a eu lieu, ce qui a entraîné, d'une part, l'accroissement des besoins en eaux et a provoqué, d'autre part, la dégradation de la qualité des eaux.

Le choix de ce thème a été guidé par le souci d'évaluer la variation spatiale et temporelle de la qualité de ces eaux souterraines, à des fins d'irrigation.

Les eaux souterraines de la plaine d'étude, présentent des concentrations assez élevées pour quelques éléments chimiques analysés tels que le Calcium, le Magnésium, les Chlorures et les Bicarbonates, et cela pour les deux campagnes d'analyse (1981 et 2011) et dépassent largement les normes de potabilité fixées par l'OMS.

L'estimation de la qualité des eaux souterraines à des fins d'irrigation par l'utilisation de des indices (IEB, MG, PI, KR, MH, N%, Wilcox,...); démontre que les puits de la plaine d'Hennaya, pour les deux campagnes, se classent majoritairement dans les catégories (très bonne, bonne et admissible pour l'irrigation).

Une amélioration de la qualité des eaux pour l'irrigation est observée sur les cartes isvaleurs, pour la campagne de 2011, pour la Conductivité et les chlorures, comme indice d'irrigation, tandis qu'une détérioration pour d'autres indices, tels que les sulfates et les MR, nécessitant une surveillance permanente des éléments chimiques concernés.

Mots clés : Eau souterraine, Cartes, Evaluation, Qualité, Irrigation, indices.

ABSTRACT

The Hennaya plain, located in the north of Tlemcen city, characterized by the semi-arid climate, whose current hydrous resources are relatively limited consist of underground water of the Mio-Plio-Quaternary aquifer, laterally driven by Tlemcen's dolomites. In recent years a high level of water demand was felt due to remarkable increase water for agriculture use. On one hand, this has induced a shortage of water and a deterioration of its quality on the other.

This research project comes to shed more light on the spatial and temporal variation in the quality of groundwater for irrigation purposes.

Groundwater in the study plain, have fairly high concentrations analyzed for some chemical elements such as Calcium, Magnesium, the chlorides and bicarbonates, and this for both analytical field excursions (1981 and 2011) and exceed the drinking water standards set by WHO .

The estimation of the quality of groundwater for irrigation by the use of indices (IEB , MG , PI, KR , MH, N% , Wilcox , ...) demonstrates that the wells of the plain Hennaya for both field excursionsis classified into categories (very good, good and qualifies for irrigation).

An improvement of water quality for irrigation is noted on iso-values maps for the 2011 field excursion, for the conductivity and chlorides, as irrigation index, while deterioration for other indexes, such as, sulfates and MR, requiring constant monitoring of chemical elements involved.

Keywords: Groundwater, maps, Evaluation, Quality, Irrigation, indexes.

تلخيص :

سهل الحناية، الذي يقع في شمال مدينة تلمسان، يتميز بمناخ شبه جاف و يمتلك في الوقت الحالي موارد مائية محدودة نسبيا و منها المياه الجوفية. طبقة المياه الجوفية لسهل الحناية تتميز بملء سلسلة متواصلة من الرواسب ذات الحقبة الزمنية ميو بليو كواترنار حيث يتم تغذيته جانبيا عبر السلاسل الجبلية لتلمسان، في السنوات الأخيرة، تزايد النمو الفلاحي أدى الى ارتفاع للاحتياج للمياه من جهة و من جهة اخرى الى تدهور نوعية المياه.

اختيار هذا الموضوع، موجه بتقييم التغيرات في الموقع و الزمن لجودة المياه للاستعمال الفلاحي.

لقد تبين بأن مياه سهل الحناية، تحتوي على عناصر كيميائية تتميز بتركيز عالي و منها " الكالسيوم، المغنيزيوم " و ذلك في السنتين 1981 و 2011 ، حيث تتجاوز معيار الصلاحية للشرب "OMS".

تقدير مدى ملائمة المياه في أغراض الري بواسطة عدة مؤشرات " IEB، MG،PI،..... " تبين بأن مياه سهل الحناية في السنتين 1981 و 2011، تصنف في فئة جيد و مقبولة للاستعمال الفلاحي.

نلاحظ تحسن واضح في نوعية المياه للاستعمال الفلاحي في الخرائط لسنة 2011 لمؤشرات " الناقلية الكهربائية و الكلور " و تدهور لمؤشرات " MH , SO_4^{2-} " التي تتطلب مراقبة متواصلة للعناصر الكيميائية المعنية.

الكلمات المفتاحية : المياه الجوفية ، الخريطة، التطور ، النوعية، الري ، القرائن .

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau n°01 : Caractéristique de la station de Zenâta.....	05
Tableau n°02 : Indice d'aridité de De Martonne.....	10
Tableau n°03 : Valeur des indices d'aridité mensuels.....	11
Tableau n°04 : Valeur de l'Indice mensuel de Moral et le type de climat.....	13
Tableau n°05 : Valeur d'ETP mensuelle à la station de Zenâta.....	14
Tableau n°06 : Déficit d'écoulement selon Wundt.....	15
Tableau n°07 : Bilan hydrique à la station de Zenâta (1980/2014).....	16
Tableau n°08 : Classification des eaux d'irrigation selon pH [Gunduz et al. ,2006 <u>in</u> Bensedjad A. 2011].....	30
Tableau n°09 : Classification des eaux d'irrigation selon la conductivité [Gunduz et al. 2006 <u>in</u> Bensedjad A. 2011].....	31
Tableau n°10 : Classification des eaux d'irrigation selon les chlorures [Gunduz et al. 2006 <u>in</u> Bensedjad A. 2011].....	31
Tableau n°11 : Classification des eaux d'irrigation selon les chlorures [Gunduz et al. <u>In</u> Bensedjad A. 2011].....	31
Tableau n°12 : Classification des eaux d'irrigation selon les %Na.....	33
Tableau n°13 : Caractéristique des paramètres physico-chimique.....	35
Tableau n°14 : Classification des eaux d'irrigation selon pH.....	45
Tableau n°15 : Classification des eaux de la plaine d'Hennaya selon conductivité.....	45
Tableau n°16 : Classification des eaux d'irrigation selon les chlorures.....	46
Tableau n°17 : Classification des eaux d'irrigation selon les chlorures.....	46
Tableau n°18 : Classification des eaux d'irrigation selon les %Na.....	48

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure n°01 : Situation géographique de la plaine d'Hennaya.....	03
Figure n°02 : les Oueds de la plaine d'hennaya.....	05
Figure n°03 : Variation des précipitations annuelles à la station de Zenâta.....	06
Figure n°04 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Zenâta.....	07
Figure n°05 : Variation des précipitations saisonnières.....	07
Figure n°06 : Variation des températures moyennes annuelles à la station de Zenâta.....	08
Figure n°07 : Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Zenâta.....	09
Figure n°08 : Diagramme de Bagnouls et Gaussen.....	10
Figure n°09 : Abaque de De Martonne.....	11
Figure n°10 : Climagramme d'Emberger.....	12
Figure n°11 : l'Abaque de Wundt.....	15
Figure n°12 : Carte géologique de la plaine d'Hennaya [Doumergue M., 1902 <u>in</u> Bourbaba L. & Torchi M., 2014].....	17
Figure n°13 : Conglomérat aux niveaux de la source d'Ain Hallilifa [Bemoussat A., 2012]....	18
Figure n°14 : Coupe schématique du plateau d'Hennaya [Clair, 1973 <u>in</u> Yousfi, 2004].....	19
Figure n°15 : log hydrogéologique de la plaine d'Hennaya [Hayane S.M., 1983].....	21
Figure n°16 : Coupe géologiques d'après [Technoexportstroy, 1969 <u>in</u> (Bemoussat, 2011)]....	22
Figure n°17 : les sources de la plaine d'Hennaya.....	23
Figure n°18 : Inventaire des points d'eau da la plaine d'Hennaya.....	24
Figure n°19 : Carte piézométrique de la plaine d'Hennaya.....	25
Figure n°20 : Variation du pH au niveau des points d'eauxde la plaine d'Hennaya.....	36
Figure n°21 : Variation de la conductivité au niveau des points d'eaux de la plaine d'Hennaya.....	36
Figure n°22 : Variation de Ca ²⁺ au niveau des points d'eauxde la plaine d'Hennaya.....	37
Figure n°23 :Variation de Mg ²⁺ au niveau des points d'eauxde la plaine d'Hennaya.....	38
Figure n°24 :Variation de Na ⁺ au niveau des points d'eauxde la plaine d'Hennaya.....	38
Figure n°25 : Variation de K ⁺ au niveau des points d'eau de la plaine d'Hennaya.....	39
Figure n°26 :Variation de Cl ⁻ au niveau des points d'eauxde la plaine d'Hennaya.....	40
Figure n°27 : Variation de SO ₄ ²⁻ au niveau des points d'eaux de la plaine d'Hennaya.....	40
Figure n°28 : Variation de HCO ₃ ⁻ au niveau des points d'eaux de la plaine d'Hennaya.....	41
Figure n°29 : Diagramme de piper des points d'eaux de la plaine d'Hennaya (1981) et (2011).....	43
Figure n°30 : Variation d'IEB au niveau des points d'eaux de la plaine d'Hennaya.....	44
Figure n°31 : Variation de MG au niveau des points d'eaux de la plaine d'Hennaya.....	44
Figure n°32 : Variation de KR au niveau des points d'eaux de la plaine d'Hennaya.....	47
Figure n°33 : Variation de MH au niveau des points d'eaux de la plaine d'Hennaya.....	47
Figure n°34 : Variation de PI au niveau des points d'eaux de la plaine d'Hennaya.....	48
Figure n°35 : Diagramme de Wilcox.....	50
Figure n°36 : Diagramme de richards.....	51
Figure n°37 : Variation spatiale d'IEB.....	54
Figure n°38 : Variation spatiale de MG.....	55
Figure n°39 : Variation spatiale des chlorures.....	56
Figure n°40 : Variation spatiale des sulfures.....	57
Figure n°41 : Variation spatiale de la conductivité.....	58
Figure n°42 : Variation spatiale de KR.....	59
Figure n°43 : Variation spatiale de MH.....	60
Figure n°44 : Variation spatiale de PI.....	61

TABLE DES MATIERES

Page

Dédicaces

Remerciements

Résumé

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE..... 01

PARTIE I : GENERALITES

Chapitre 1 : Contexte géographique et Climatique 03

I. Contexte géographique..... 03

A. Situation géographique..... 03

B. Cadre morphologique et hydrographique..... 04

II. Contexte climatique..... 05

A. Précipitation..... 06

1. Variabilité Interannuelle..... 06

2. Variabilité Mensuelle..... 07

3. Variabilité Saisonnière..... 07

B. Températures..... 08

1. Températures annuelles..... 08

2. Températures mensuelles..... 09

C. Synthèse climatique..... 09

1. Méthode graphique de Bagnouls et Gausson..... 09

2. Indice d'aridité annuel de De Martonne..... 10

3. Indice d'aridité mensuel de De Martonne..... 11

4. Indice d'Emberger..... 12

5. Indice de Moral..... 13

a. Indice annuel de Moral..... 13

b. Indice mensuel de Moral..... 13

D. Bilan hydrique..... 14

1. Evapotranspiration potentielle..... 14

2. Déficit d'écoulement..... 15

3. Bilan annuel..... 16

E. Conclusion..... 16

Chapitre 2 : Contexte géologique et hydrogéologique..... 17

I. Contexte géologique..... 17

A. Analyse lithostratigraphique..... 18

1. Helvétien..... 18

2. Tortonien..... 18

3. Pliocène..... 18

4. Quaternaire..... 19

B. Tectonique..... 19

C. Conclusion..... 20

II. Contexte hydrogéologique.....	20
A. Les formations de l'aquifère.....	20
1. les grès Tortonien.....	20
2. les conglomérats de la plaine d'hennaya.....	20
3. les Travertins.....	20
4. les gravies et gravies argileux.....	20
B. géométrie de l'aquifère.....	21
1. les limites de l'aquifère.....	21
2. coupe géologique.....	21
C. Exutoires.....	22
D. Caractéristique de la nappe.....	23
1. Piézométrie.....	23
2. Hydrodynamiques de la nappe.....	26
a. Perméabilité.....	26
b. Transmissivité.....	26
E. Conclusion.....	27

PARTIE II : APTITUDE DES EAUX SOUTERRAINES A DES FINS D'IRRIGATION

Chapitre 3 : Méthodologie.....	28
I. Description des paramètres physico-chimiques.....	29
II. Détermination des principaux facies hydrochimique.....	29
III. Aptitude à des fins d'irrigation.....	29
A. Indices d'échange de base IEB.....	30
B. Meteoric genesis MG.....	30
C. Potentiel d'Hydrogène pH.....	30
D. Conductivité électrique.....	31
E. Chlorures.....	31
F. Sulfates.....	31
G. Kelly's Ratio KR.....	32
H. Magnesium Hasard MH.....	32
I. Indice de perméabilité PI.....	32
J. Pourcentage du sodium %Na.....	33
K. la méthode de Wilcox.....	33
L. Sodium Adsorption Ratio SAR.....	33
IV. Cartographie hydrochimique.....	34
Chapitre 4 : Résultats et interprétations.....	35
I. Description des paramètres physico-chimiques.....	35
A. Potentiel hydrogène pH.....	35
B. Conductivité électrique.....	36
C. Calcium Ca^{2+}	37
D. Magnésium Mg^{2+}	37
E. Sodium Na^+	38
F. Potassium K^+	38
G. Les Chlorures Cl^-	39
H. Les Sulfates SO_4^{2-}	40
I. Les Hydrocarbonates HCO_3^-	41
II. Détermination des principaux facies hydrochimique.....	42
III. Aptitude à des fins d'irrigation.....	44

A. Indices d'échange de base IEB.....	44
B. Meteoric genesis MG.....	44
C. Potentielle d'hydrogène	45
D. Conductivité électrique.....	45
E. Chlorures.....	45
F. Sulfates.....	46
G. Kelly's Ratio KR.....	46
H. Magnesium Hasard MH.....	47
I. Indice de perméabilité PI.....	48
J. Pourcentage du sodium %Na.....	48
K. la méthode de Wilcox.....	49
L. Sodium Adsorption Ratio SAR.....	49
IV. Cartographie hydrochimique.....	52
V. Conclusion.....	62
CONCLUSION GENERALE.....	63
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	66
ANNEXES	

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est un élément indispensable à la vie et revêt de l'importance pour d'innombrables activités humaines. L'eau peut être rare à certains endroits, ou d'une qualité médiocre à d'autres endroits. Il est certain que l'augmentation de la demande en eau pour les activités humaines accentuera les contraintes sur cette ressource.

Source de vie, elle est aussi source de conflits dans de nombreuses régions du monde. Au début de ce siècle, l'eau est devenue un enjeu de taille et seules les nations qui auront su préserver leur capital hydrique pourront survivre.

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

En Algérie, les eaux souterraines sont les principales sources pour l'alimentation et l'irrigation, la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation est essentielle pour le rendement des cultures et le maintien de la productivité du sol.

Dans ce contexte, la présente étude consiste en une contribution pour une meilleure connaissance de l'évolution de la qualité des eaux souterraines de la plaine d'Hennaya à des fins d'irrigation.

La plaine d'Hennaya correspond à une dépression tectonique dont le remplissage est constitué, de formation plio-quadernaire (gravier argileux, conglomérat), et miocène (grès et marnes) qui repose sur une assise jurassique.

Plusieurs études ont déjà été réalisées sur cette plaine, dont des mémoires d'ingénieur, des mémoires de magistères et des thèses de Doctorat. Ces dernières nous ont permis l'acquisition d'un certain nombre de données concernant les caractéristiques géologiques, hydrogéologiques, et aussi hydrochimiques.

Dans cette étude, nous allons suivre ces travaux, et essayer de répondre à deux principales questions :

- Quel est l'état actuel de la qualité des eaux souterraines de plaine pour l'utilisation agricole?
- Et quelle est son évolution spatiale durant ces dernières années ?

Pour répondre à ces questions, des données hydrochimiques des deux campagnes d'analyse réalisées en 1981 et en 2011 ont été étudiées, et traitées à l'aide des méthodes de calculs de plusieurs indices d'irrigation afin de mieux cerner la qualité.

Le présent mémoire, comporte deux parties :

- La première partie comportant les généralités sur la plaine d'Hennaya, dans laquelle seront décrits;
 - Dans un premier chapitre : les contextes géographique, hydrographiques, et climatiques de la plaine d'Hennaya ;
 - Dans le second : les descriptions géologiques et hydrogéologiques seront présentées.

- La deuxième partie, consacrée à l'étude des eaux souterraines de la plaine, est leurs aptitudes à des fins d'irrigation ; et consistée de :
 - Chapitre 03 montre un aperçu théorique et la méthodologie du travail ;
 - Chapitre 04 est destiné à la présentation des résultats et les interprétations des données préalablement acquises.

I. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

A. Situation géographique

La plaine d'hennaya est une zone agricole avec un potentiel important. Elle est située au nord de la ville de Tlemcen (Fig.01), elle est limitée à l'Est par Oued Sikkak, à l'Ouest par l'Oued Khallouf, au Nord par l'Oued Isser et au Sud par les terrains Karstiques du jurassique supérieur. Cette plaine occupe une superficie de 28 km²

La situation de la plaine d'hennaya peut être localisée sur une carte au 1 /50 000 entre les coordonnées Lambert :

$$126,0 < X < 132,0 \text{ Km}$$

$$191,0 < Y < 201,0 \text{ Km}$$

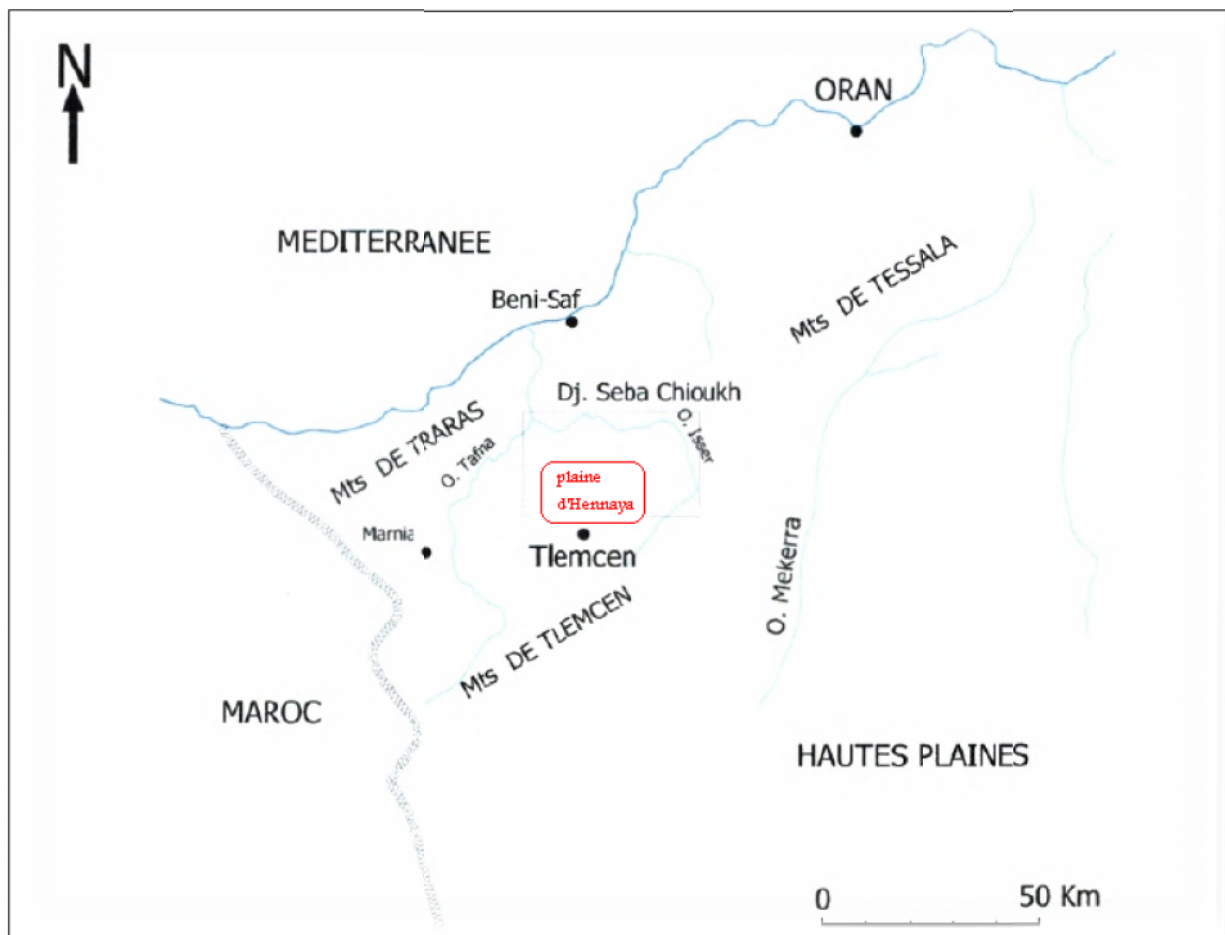


Fig.01- Situation géographique de la plaine d'Hennaya.

B. Cadre Morphologique est Hydrographique

La plaine d'Hennaya occupe une superficie de 28 km², elle se trouve dans le sous-bassin de Sikkak (moyenne Tafna) qui a une superficie de 463 km² pour un périmètre de 116 km ; ce bassin est moyennement allongé, les cultures extensives occupent plus de la moitié de l'espace du bassin versant.

La plaine d'Hennaya est située aux débouchés de deux ravins :

Le ravin d'Hennaya dit aussi ravin des sources dans le bassin versant occupe une superficie d'environ 14 km² et le ravin formé de Chabet Sidi Kannoun dont la superficie du bassin versant est d'environ 8 km².

Dans sa partie avale, la plaine d'Hennaya compte une dépression assez vaste dont la superficie est de 4 km².

Elle se prolonge, au Nord, par la plaine des gossels et au Nord-Est par la plaine ou le plateau de Zenata.

Le relief plat s'abaisse graduellement vers le Nord (de la cote 400m à la cote 240).

Elle est sillonnée par deux Oueds parallèles qui descendent vers le Nord-Est, tous tributaires de la Tafna (Fig.02).

L'Oued Sikkak prend naissance sur le plateau de Terni à la source d'Ain Rhannous et se déverse dans le barrage Sikkak [Bourbaba L. & Torchi M., 2014].

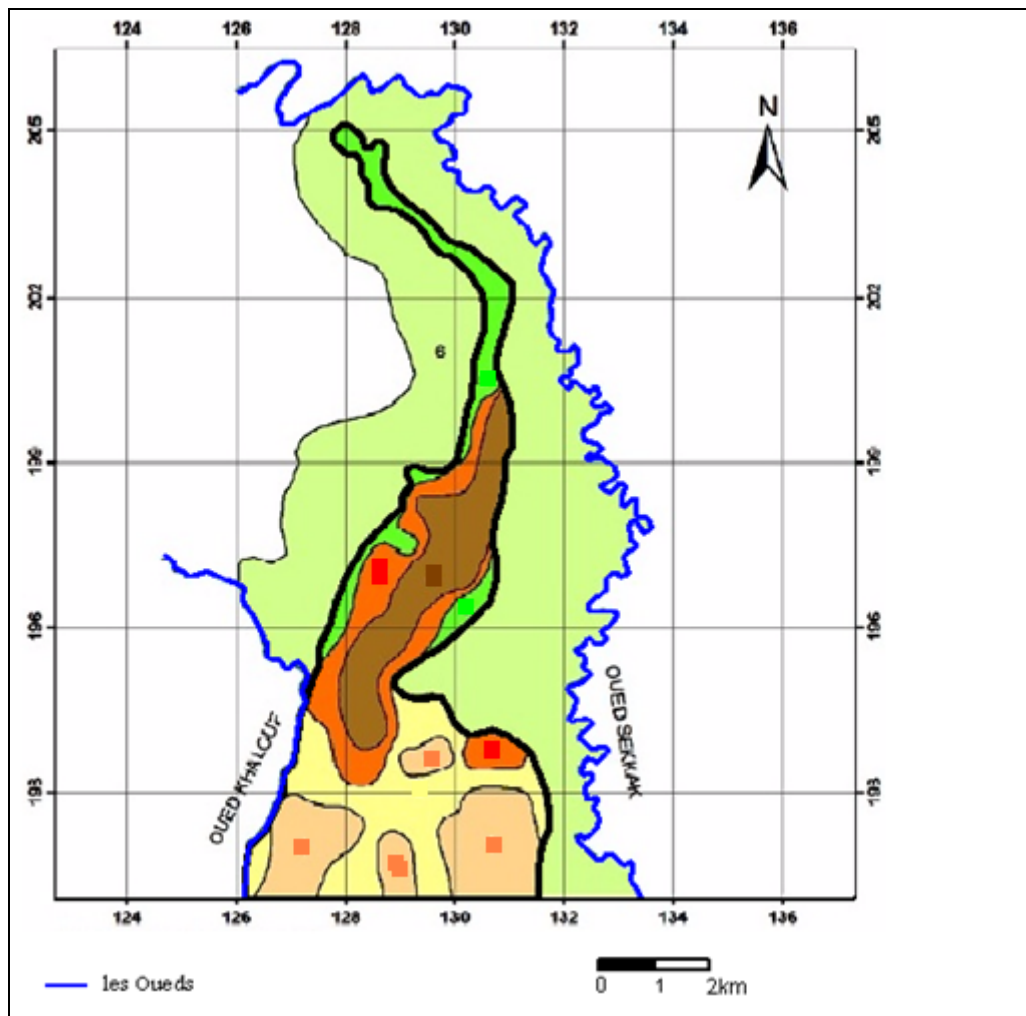


Fig.02- les Oueds de la plaine d’hennaya.

II. CONTEXTE CLIMATIQUE

La connaissance de l’évolution pluviométrique et thermique, sont importantes pour comprendre et mieux interpréter les comportements hydrologique et hydrogéologique de la zone d’étude.

A cet effet, une étude du climat de la région étudiée, est faite sur la base des données climatiques de la station météorologique de Zenâta, étendues sur une chronique de 35 ans (de 1980 à 2014) (Annexe I).

Les caractéristiques de la station sont mentionnées dans le tableau 01.

Tab.01- Caractéristique de la station de Zenâta.

station	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Période d’observation
Zenâta	247	35°0’50’’N	01°27’25’’W	1980-2014

A. Précipitations

Les précipitations constituent l'un des plus importants paramètres climatiques du bilan hydrologique, c'est le facteur primordial qui permet de déterminer le type de climat.

L'évaluation pluviométrique va s'effectuer en faisant une étude de variabilité des données de précipitations annuelles, mensuelles ainsi que saisonnières.

1. Variabilité interannuelle

La figure 03, présente des fluctuations importantes de la courbe, avec un minimum de 80,25mm observé en 1981-1982, un maximum de 569,3 mm en 1986-1987 et une moyenne interannuelle de 316,6mm.

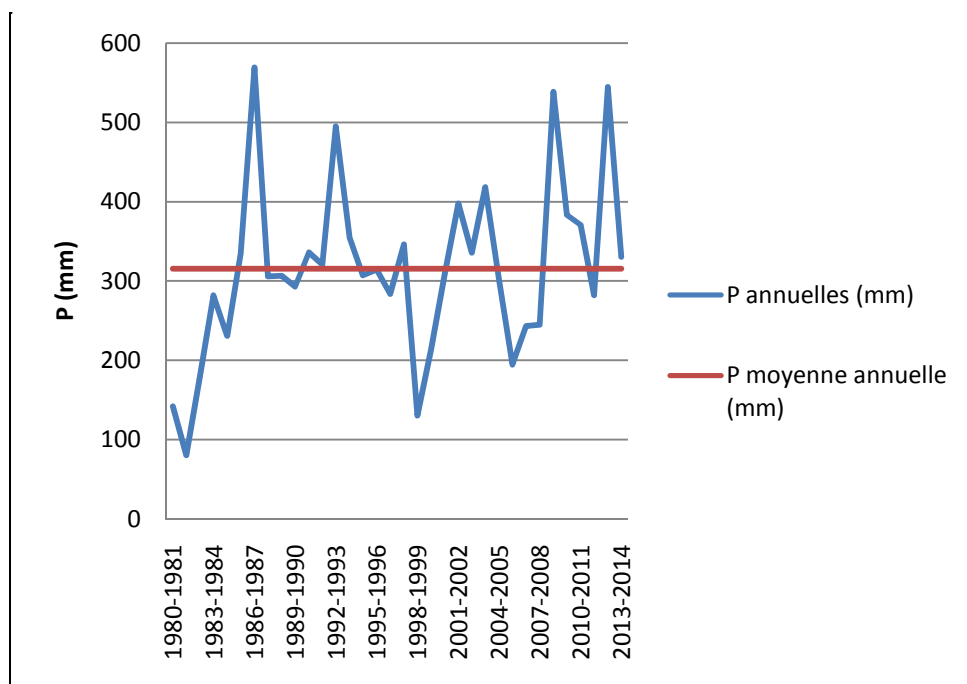


Fig.03- Variation des précipitations annuelles à la station de Zenâta.

2. Variabilité Mensuelle

La Figure 04 montre que le mois de Novembre est le plus pluvieux avec une valeur de précipitations moyennes mensuelles de 46,8mm et le mois le plus sec est le mois de Juillet avec une valeur de 1,13mm.

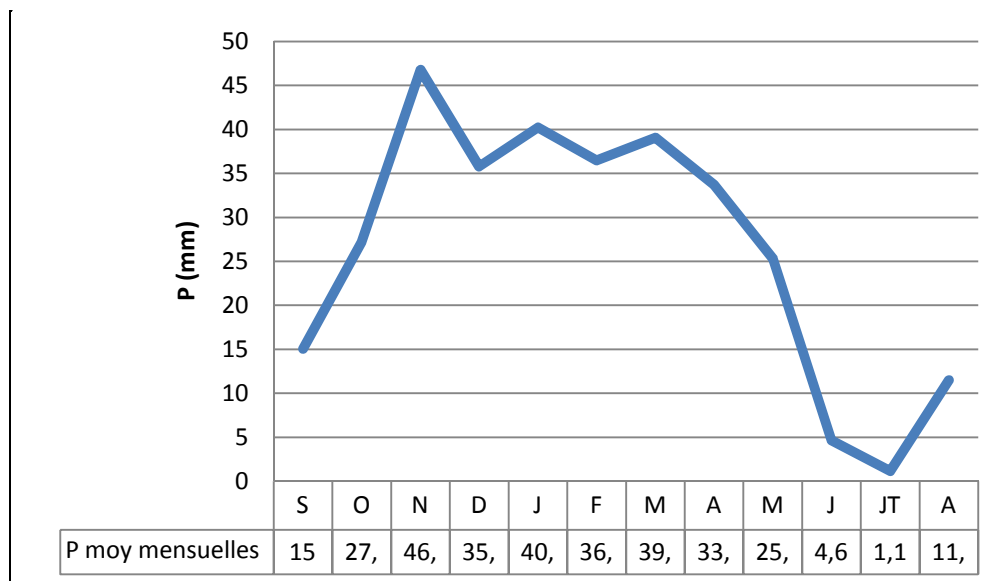


Fig.04- Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Zenâta.

3. Variabilité Saisonnière

L’histogramme des précipitations saisonnières (Fig.5), indique que l’hiver et le printemps sont les saisons les plus humides, par ailleurs, l’été est la saison la plus sèche.

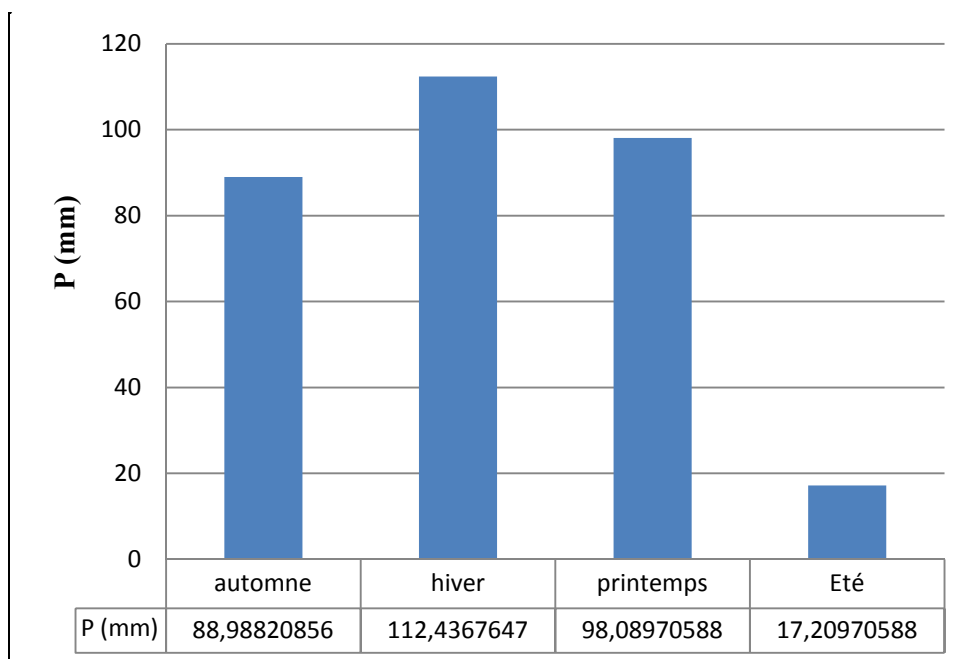


Fig.05- Variation des précipitations saisonnières.

B. Températures

Les paramètres thermiques jouent un rôle déterminant dans la vie végétale. En effet, la température intervient dans le déroulement de tous les processus, biologique selon des modalités diverses. Elle contrôle la croissance, la reproduction, la survie et par conséquent la répartition géographique, générant les paysages, les plus divers. Son effet sur les points d'eau est très important car elle peut provoquer un déficit d'écoulement [Chekouki Z. &Belguerna A., 2012].

1. Températures Annuelles

Les températures moyennes annuelles durant cette période ne portent pas de grandes variations. Elles sont comprises entre 16,16 à 18,58°C(Fig.6), avec un minimum de 16,16°C enregistré en1980-1981 et un maximum de 18,58°C enregistré en 2009-2010.

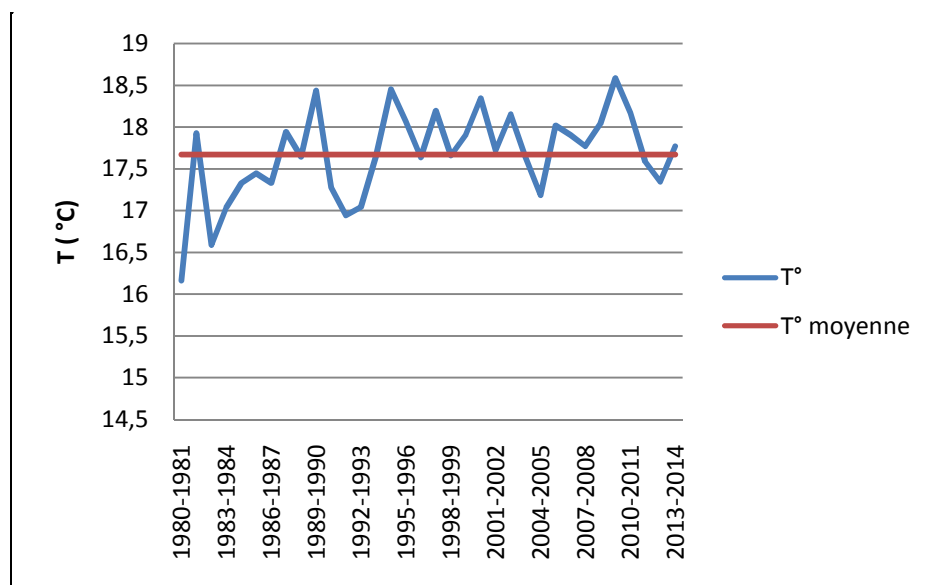


Fig.06- Variation des températures moyennes annuelles à la station de Zenâta.

2. Températures Mensuelles

La représentation graphique de la variation des températures moyennes mensuelles (Fig. 07), montre que le mois de Janvier est le plus froid (7,3°C) et celui d’Août est le plus chaud (28,4°C).

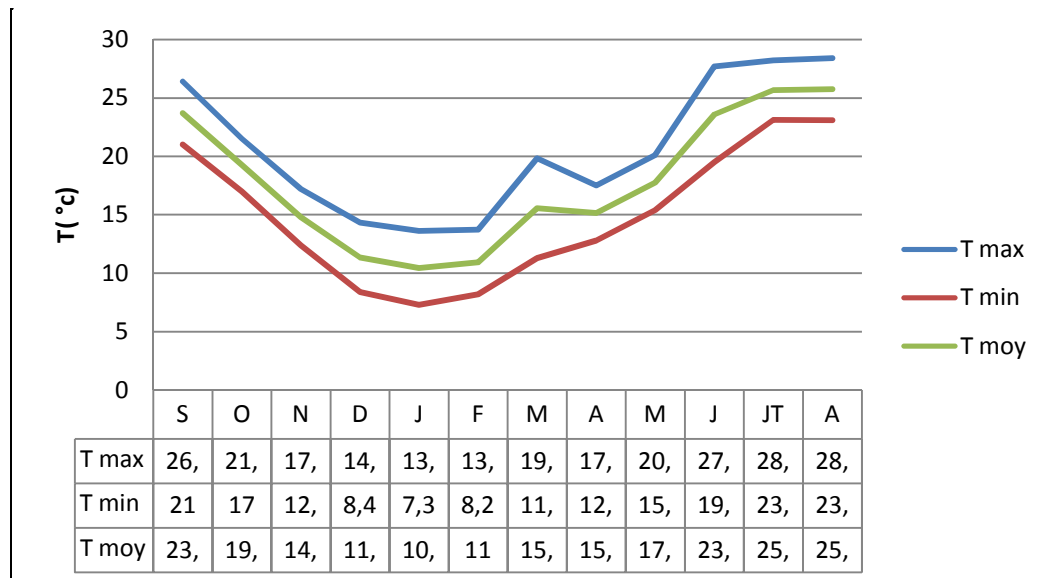


Fig.07- Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Zenâta.

C. Synthèse climatique

L'étude du climat nous permet de déterminer les périodes sèches et humides, et on se basant sur plusieurs indices, elle permet de déterminer le type du climat de la région à partir des précipitations et des températures.

1. Méthode graphique de Bagnouls et Gaussen

Les diagrammes pluviothermiques de Bagnouls et Gaussen sont établis selon la relation

$P = 2T$, les précipitations sont portées à l'échelle double des températures.

- Pour la période sèche, la courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations,
- Pour la période humide, la courbe des précipitations passe au-dessus de celle des températures.

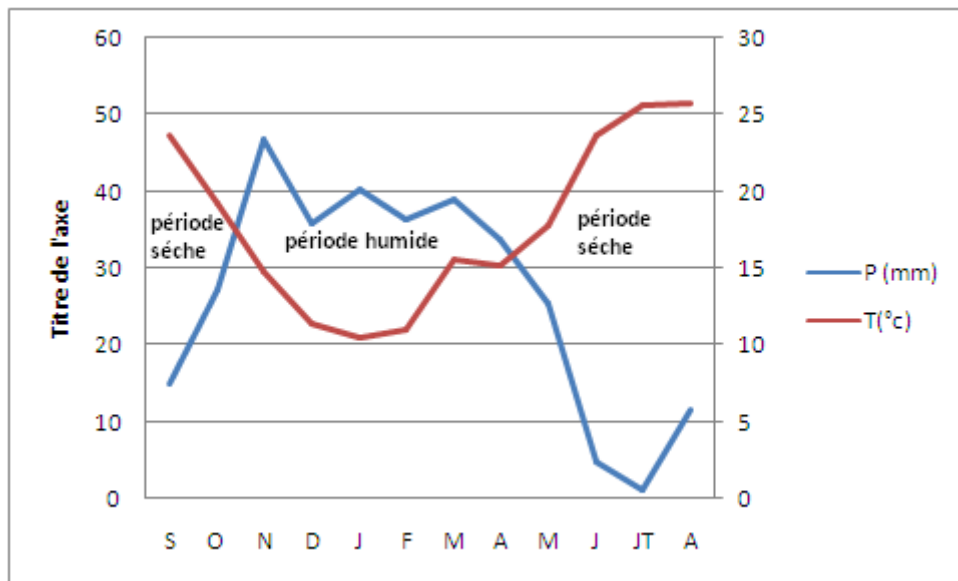


Fig.08- Diagramme de Bagnouls et Gausson.

Le diagramme de Bagnouli et Gausson (Fig. 08), permet d’observer deux périodes, une période humide s’étalant de la mi-octobre à la mi-avril, et une période sèche durant les autres mois de l’année.

2. Indice d’aridité annuel de De Martonne

L’indice d’aridité de De Martonne, noté I, permet de déterminer le degré d’aridité d’une région.

L’indice d’aridité annuel

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

P : précipitations moyennes annuelles (mm)

T : température moyenne annuelle (°C)

Tab.02- Indice d’aridité de De Martonne.

P (mm)	T (°c)	I
316,72	17,83	11,38

L’indice d’aridité de De Martonne pour la station de Zenâta est de l’ordre de 11,38 (Tab.02), reporté sur l’abaque de De Martonne (Fig.9), indique un climat semi-aride, à écoulement temporaire.

D'après E. DE MARTONNE

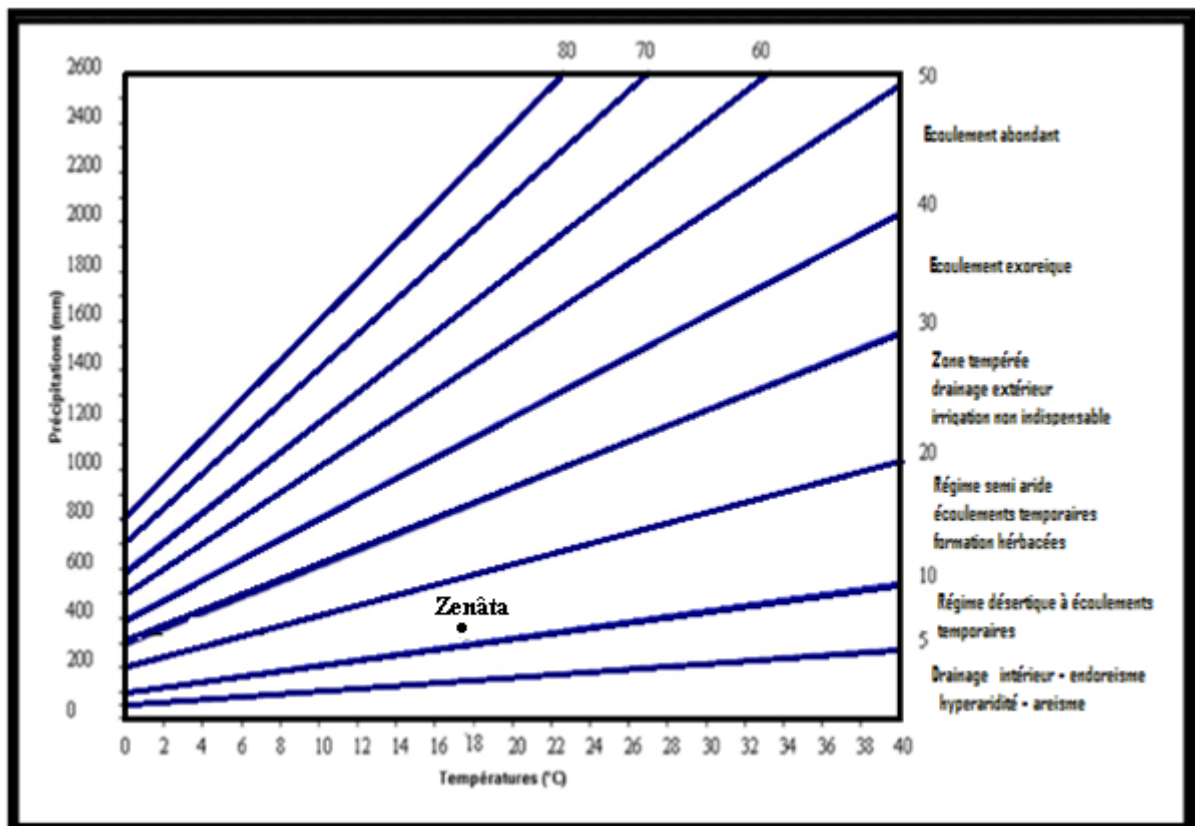


Fig.09- Abaque de De Martonne.

3. Indice d'aridité mensuel de De Martonne

Cet indice est défini par la formule suivante : $I = \frac{12p}{t+10}$

p : précipitations moyennes mensuelles.

t: températures moyennes mensuelles.

- $I < 5$: climat hyperaride
- $5 < I < 7,5$: climat désertique
- $7,5 < I < 10$: climat steppique
- $10 < I < 20$: climat semi-aride
- $20 < I < 30$: climat tempéré.

Tab.03- Valeur des indices d'aridité mensuels.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
P (mm)	15	27,1	46,76	35,77	40,20	36,45	39,06	33,72	25,3	4,62	1,13	11,45
T (°c)	23,7	19,2	14,8	11,35	10,45	10,95	15,55	15,15	17,75	23,6	25,66	25,75
i	5,35	11,1	22,63	20,10	23,59	20,88	18,34	16,08	10,94	1,65	0,38	3,84
type	D	SA	T	T	T	T	SA	SA	SA	HA	HA	HA

Les valeurs des indices d'aridité mensuelle (Tab.03), indiquent que les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre sont des mois très secs, et les mois Novembre, Décembre, Janvier et Février sont des mois humide, ceux qui restent, sont des mois secs.

4. Indice d'Emberger

Le coefficient pluviométrique $Q_2 = \frac{1000 P}{(M+m)(M-m)/2}$

Où :

P : moyenne des précipitations annuelles (mm)

M : moyenne des Maxima du mois le plus chauds (°K)

m : moyenne des Minima du mois le plus froid (°k)

La valeur Q2 reportée sur le climagramme d'Emberger (Fig.10), montre que le climat régnant dans le secteur d'étude est de type semi-aride.

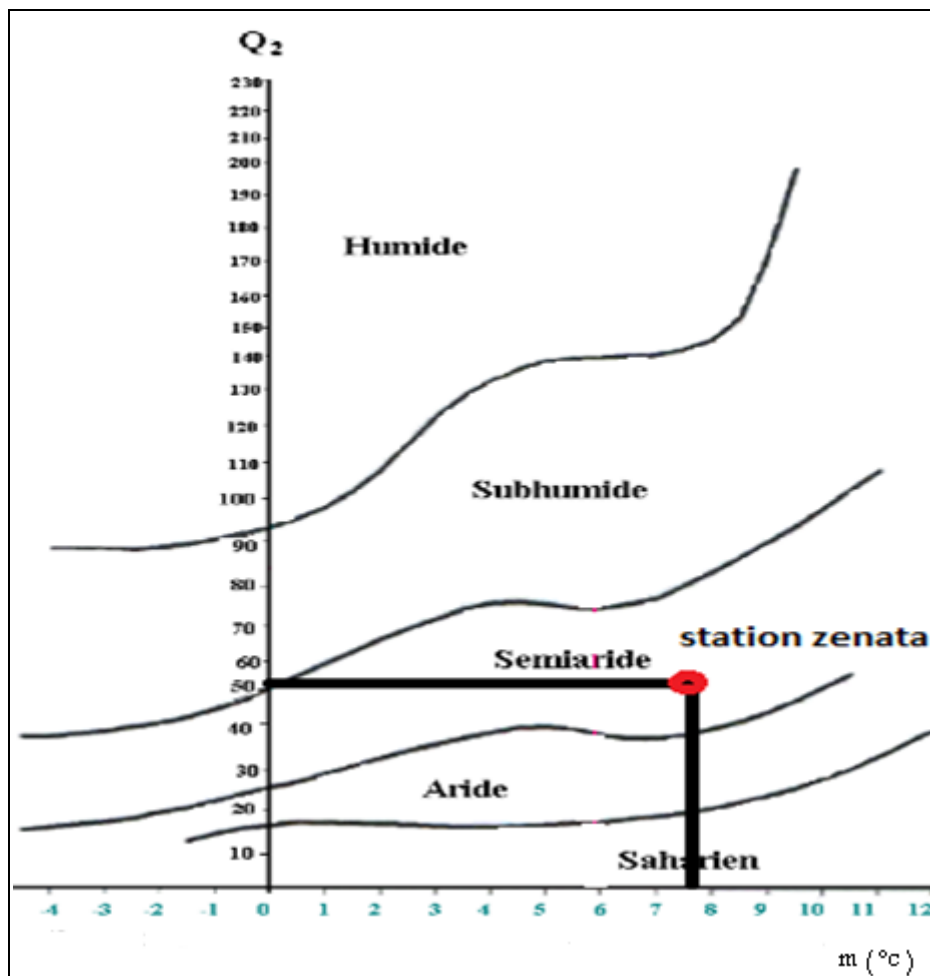


Fig.10- Climagramme d'Emberger.

5. Indice de Moral

a. Indice annuel de Moral

$$IM = \frac{P}{T^2 - 10T + 200}$$

Où :

P : précipitations moyennes annuelles (mm)

T : température moyenne annuelle (°c)

Cet indice permet de dire :

- Si, $I_M < 1 \Rightarrow$ climat sec, et si $I_M > 1 \Rightarrow$ climat humide.

$$IM = 0.93$$

Donc : la région d'Hennaya est caractérisée par un climat Sec.

b. Indice mensuel de Moral

$$Im = \frac{P}{0.1t^2 - t + 20}$$

Où :

P : précipitations moyennes mensuelles (mm)

T : température moyenne mensuelle (°c)

Avec les conditions

- Mois pluvieux : $P > 0.1t^2 - t + 30$
- Mois humide : $0.1t^2 - t + 30 > P > 0.1t^2 - t + 20$
- Mois Sec : $0.1t^2 - t + 20 > P > 0.05t^2 - t + 10$
- Mois aride : $0.05t^2 - t + 10 > P$

Tab.04- Valeur de l'Indice mensuel de Moral et le type de climat.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
Im	0,29	0,72	1,73	1,66	1,96	1,73	1,36	1,21	0,75	0,09	0,02	0,19
P (mm)	15,05	27,17	46,77	35,77	40,20	36,46	39,07	33,72	25,30	4,62	1,14	11,45
$0.1t^2 - t + 30$	62,47	47,81	37,10	31,53	30,47	31,04	38,64	37,80	43,76	62,10	70,18	70,56
$0.1t^2 - t + 20$	52,47	37,81	27,10	21,53	20,47	21,04	28,64	27,80	33,76	52,10	60,18	60,56
$0.05t^2 - t + 10$	14,38	9,28	6,15	5,09	5,01	5,05	6,54	6,33	8,00	14,25	17,26	17,40
Type	sec	sec	pluvieux	Pluvieux	pluvieux	pluvieux	pluvieux	humide	sec	aride	aride	aride

Les valeurs des indices mensuels de Moral (Tab.04), indiquent que les mois de novembre, décembre, janvier, février et Mars sont des mois pluvieux, le mois avril est Humide, ceux de Juin, Juillet et Août sont arides, et les autres les mois (Septembre, Octobre et Mai) sont des mois secs.

D. Bilan hydrique

L'avantage de l'étude de bilan hydrique c'est de faire une comparaison entre : La précipitation P(mm) et l'évapotranspiration ETP, ce qui permet de distinguer des situations différentes en fonction de seuils qui sont directement significatifs pour un lieu ou une période donnée [Dastes F. D., 2004].

Un bilan hydrique a été établi afin d'actualiser l'étude climatique de notre région d'étude pour la période 1980 - 2014.

1. Evapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration correspond à un phénomène complexe regroupant à la fois l'évaporation physique de l'eau contenue dans le sol et dans l'atmosphère et les processus de transpiration des végétaux.

$$ETP = 1.6 \left(\frac{10T}{I} \right)^a$$

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0.5$$

$$I = \sum i$$

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

- I: Somme des 12 indices thermiques mensuels.
- T : Température moyenne mensuelle.
- $\Delta U = P - ETP$
- $P > ETP$: l'évaporation réelle sera égale à l'ETP, il y aura écoulement et constitution de réserves, la période sera dite excédentaire.
- $P < ETP$: l'évaporation réelle sera égale à P ; il y aura prélèvement sur les réserves, absence d'écoulement ; la période sera dite déficitaire

➤ méthode de Thornthwaite

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle (ETP) relatives aux 12 mois de l'année sont consignées au tableau suivant :

Tab.05- Valeur d'ETP mensuelle à la station de Zenâta.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	Année
T (°c)	23,7	19,25	14,8	11,35	10,45	10,95	15,56	15,15	17,75	23,6	25,66	25,75	17,83
i	10,55	7,70	5,17	3,46	3,05	3,28	5,58	5,36	6,81	10,48	11,90	11,96	85,3
ETP non corrigée	10,75	7,30	4,47	2,73	2,34	2,55	4,91	4,67	6,27	10,67	12,47	12,55	81,68
K	1	1,13	1,17	1,25	1,23	1,04	1,06	0,96	0,83	0,82	0,87	0,94	/
ETP corrigée	10,75	8,25	5,23	3,41	2,87	2,65	5,20	4,48	5,21	8,75	10,85	11,80	79,45

ETP :(cm). K : Coefficient d'ajustement mensuel, i : indice thermique mensuel.

2. Déficit d'écoulement

➤ Selon la méthode de Wundt

Cet auteur définit le déficit d'écoulement en fonction de 02 paramètres, la précipitation moyenne annuelle et la température moyenne annuelle, d'après l'abaque de Wundt (Fig.11), la valeur du déficit est de 307mm.

Tab.06- Déficit d'écoulement selon Wundt

Station	P (mm)	T (°c)	D (mm)	P-D (mm)
Zenâta	315,34	17,83	307	08,34

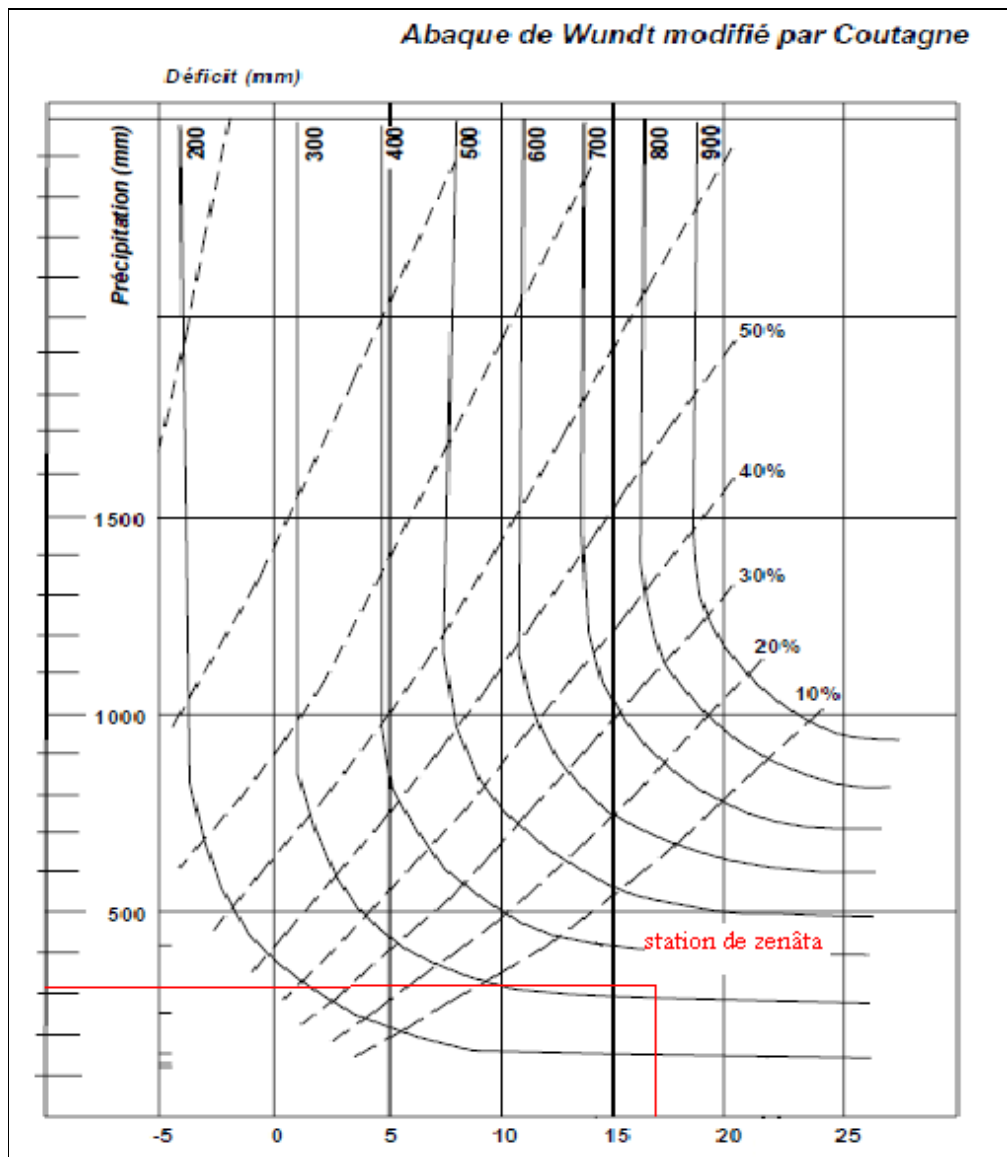


Fig.11- L'Abaque de Wundt.

3. Bilan annuel

La méthode de Thornthwaite permet d'établir un bilan hydrologique en tenant compte des éléments déjà cités. Ce bilan est donné dans le tableau pour la série (1980/2014).

Tableau 07: Bilan hydrique à la station de Zenâta (1980/2014).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
P (mm)	15,05	27,17	46,7	35,7	40,2	36,4	39,07	33,7	25,30	4,62	1,14	11,45	316,5
T (°c)	23,7	19,25	14,8	11,3	10,4	10,9	15,56	15,1	17,75	23,6	25,66	25,75	17,8
ETP(mm)	107,5	82,5	52,3	34,1	28,7	26,5	52,0	44,8	52,1	87,5	108,5	118,0	794,5
ΔU	-92,45	-55,33	-5,6	1,6	11,5	9,9	-12,93	-11,1	-26,8	-82,8	-107,3	-106,5	
RU(90mm)	0	0	0	1,6	13,1	23	10,07	0	0	0	0	0	
ETR(mm)	15,05	27,17	46,7	34,1	28,7	26,5	39,07	43,77	25,30	4,62	1,14	11,45	302,87
D.A(mm)	92,45	55,33	5,6	0	0	0	12,93	1,03	26,8	82,88	107,36	106,5	490,93
Exc(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(R.U = 90 mm la nature du sol), **P** : précipitations (mm), **ETP** : évapotranspiration potentielle (mm), ΔU : variation de la réserve, **RU** Réserve utile (mm), **ETR** : évapotranspiration réelle (mm), **D.A**: déficit agricole (mm), **Exc.** : excédent (mm), **E** : écoulement (mm).

L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle a été évaluée à environ 794,5 mm (Tab.07). Cette valeur calculée représente environ deux fois la valeur de la moyenne des précipitations annuelles (316,5 mm). Le déficit agricole est estimé à plus de 475mm.

Conclusion

Selon les données calculées, le climat de la plaine d'Hennaya est de type semi-aride, avec une température moyenne annuelle proche de 18°C et une moyenne des précipitations mensuelles d'environ 26,5 mm. Il est caractérisé par deux périodes : une humide s'étalant de la mi-octobre à la mi-avril, et une autre sèche dans les autres mois de l'année.

Le bilan hydrique montre que, L'évapotranspiration potentielle moyenne interannuelle a été évaluée à environ 794,5 mm. Cette valeur calculée représente environ deux fois la valeur de la moyenne des précipitations annuelles (316,5 mm).

I. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La plaine d'Hennaya, en figure 12, correspond à une dépression tectonique dont le remplissage est constitué par des formations Plio-Quaternaires (Argiles, conglomérats et travertins) et des formations miocènes (grès tortoniens et marnes serravaliennes) reposant sur une assise jurassique (dolomie et calcaire)[Yahyaoui Z., 2007].

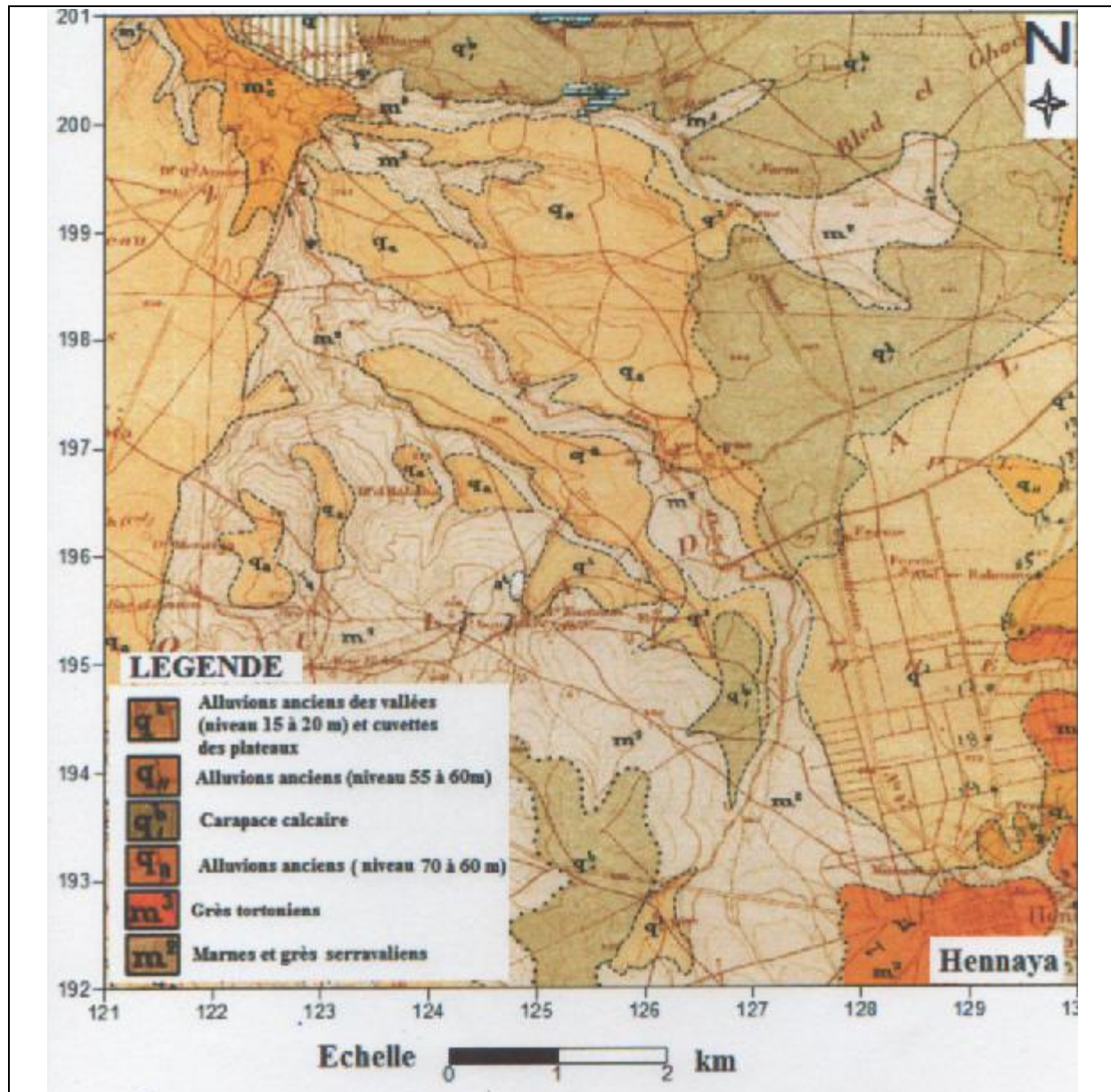


Fig.12- Carte géologique de la plaine d'Hennaya
[Doumergue M., 1902 in Bourbaba L. & Torchi M., 2014]

A. Analyse lithostratigraphique

La série litho stratigraphique est composée comme suit :

1. Helvétien : est représenté par les marnes qui forment le substratum imperméable de la nappe de la plaine [Yahyaoui Z., 2007]. Les marnes sont des séries grises ou bleutées, devenant ocre par altération, au sein de cette série s'intercalent de nombreux bancs décimétriques de grès jaunes [Hayane S.M., 1983].

2. Tortonien : est représenté par des grès fissurés jaunes, les grès sont subhorizontaux et durs, parfois peu consolidés et mal lités, leur puissance est de l'ordre de 25m.

3. Pliocène (les conglomérats) : Au niveau des exutoires de la nappe d'Hennaya (Ain Boukoura, Ain Ouahab, Ain Halilifa et Ain El Kahla), les conglomérats forment une bande continue qui va du Nord de l'agglomération d'Hennaya à Ain Halilifa [Bourbaba L.&Torchi M., 2014].

Les conglomérats de la plaine d'Hennaya (Fig. 13), sont soit immédiatement postérieures aux grès tortoniens, ils correspondraient donc à la phase régressive qui a terminé le Miocène, soit pliocènes [Hayane S.M., 1983].

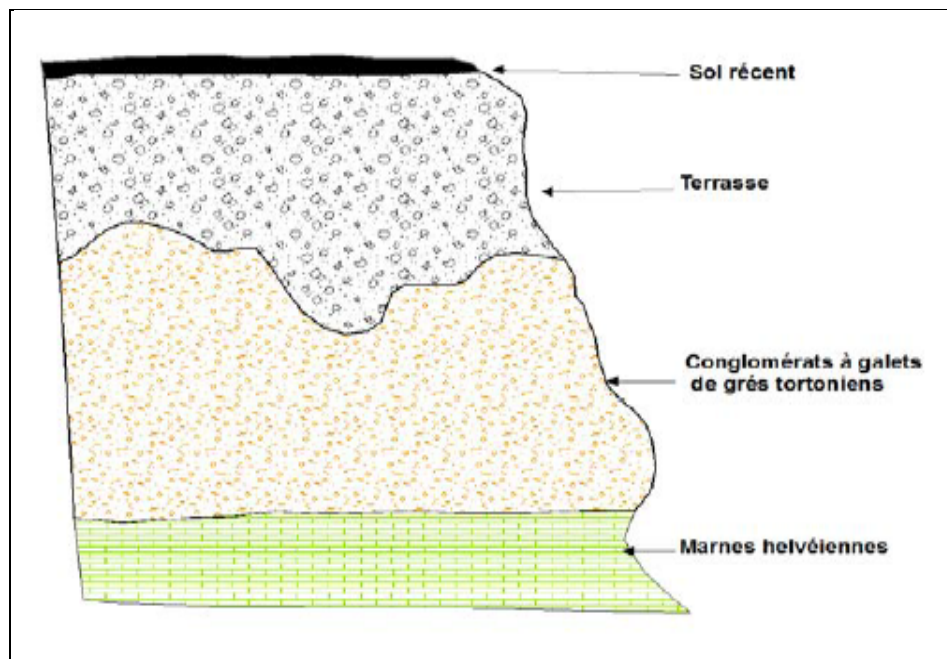


Fig.13- Conglomérat aux niveaux de la source d'Ain Hallilifa [Hayane S.M., 1983].

4. Quaternaire :

- **Travertins** : les résurgences, issues des massifs jurassiques, sont soulignées par des travertins parfois consolidés. Au Nord, ils sont beaucoup moins minces.
- **Carapace calcaire** : cette carapace recouvre les formations de Miocène et forme l'entablement horizontal des plateaux.
- **Croûte calcaire** : cette petite croûte, formée par l'encroûtement de teinte claire et des croûtes lamellaires. Cet encroûtement est bien marqué sur la plaine d'Hennaya ou il masque partiellement les grès tortoniens [Yahyaoui Z., 2007].

B. Tectonique

Une coupe géologique schématique a été réalisé par Clair en 1973 (Fig.14), montre la présence d'une faille qui à causé un contact entre les dolomies de Tlemcen et les grès Tortonien. Cette faille est la source d'alimentation de la nappe d'Hennaya.

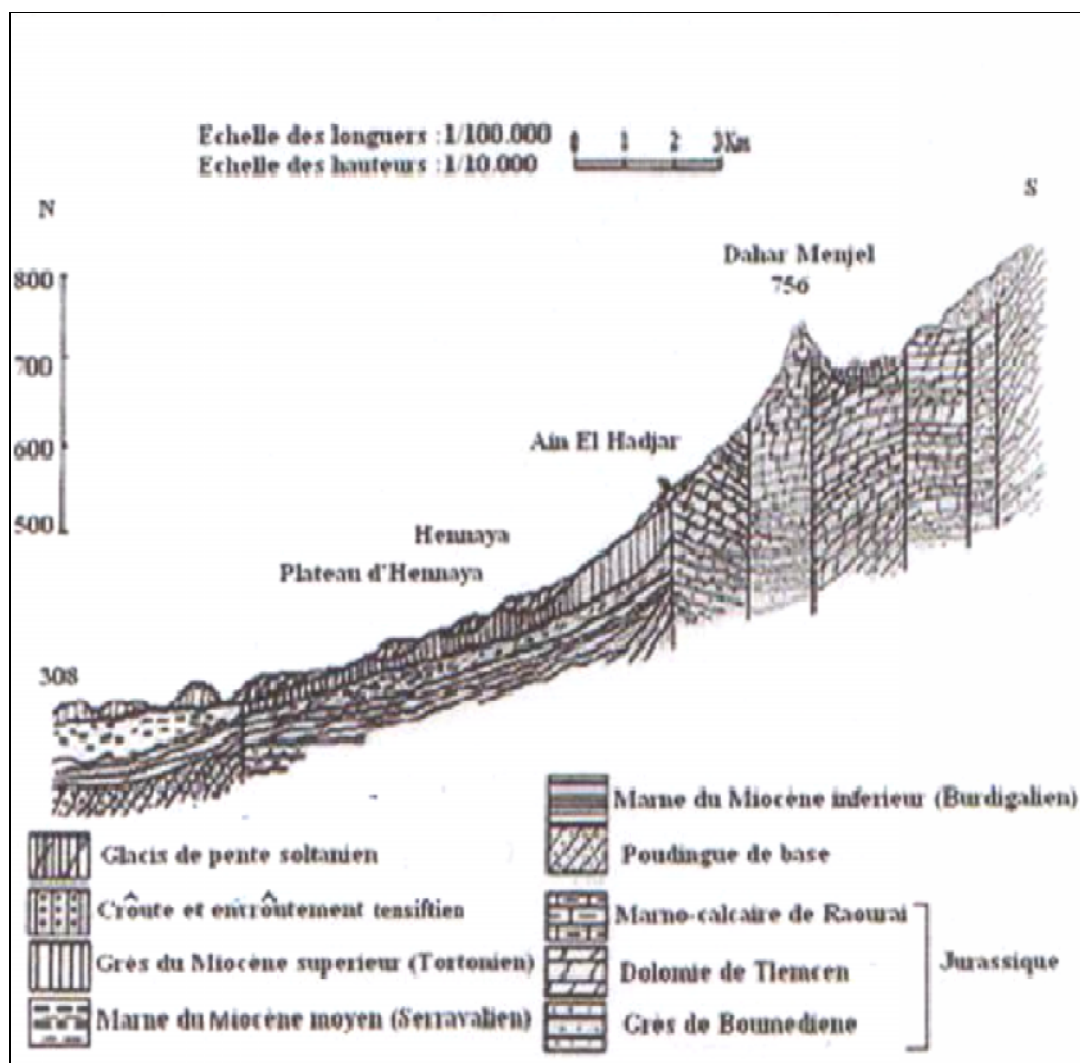


Fig.14-Coupe schématique du plateau d'Hennaya[Fandi W., 1998].

C. Conclusion

Les formations qui caractérisent notre secteur d'étude sont d'âge : Helvétien qui sont représenté par les marnes qui forment le substratum imperméable, Tortonien qui sont représenté par des grès fissurés jaunes, Pliocène qui sont représenté par les conglomérats forment une bande continue, et le Quaternaire qui sont représenté par les Travertins et les Carapace calcaire, et aussi les croûtes calcaires.

Les formations qui constituent essentiellement l'aquifère de la plaine d'Hennaya sont les grès tortoniens et les conglomérats.

II. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

L'étude hydrogéologique de la plaine d'Hennaya, consiste à connaître les caractéristiques hydrodynamiques et hydrogéologiques de l'aquifère. Cette zone est caractérisée par des activités dans le domaine de l'agriculture ce qui annonce une exploitation importante de la nappe par plusieurs puits.

A. Les formations de l'aquifère

L'aquifère est principalement constitué par les grès tortoniens et les sédiments quaternaires [Hayane S.M., 1983](Fig.15).

1. Les grès tortoniens : situés à des dizaines de mètres de profondeur au Sud et disparaissent au Nord. Ils sont friables et fissurés et subhorizontaux.

Ces grès forment un horizon, au Sud, tout autour de l'agglomération d'Hennaya, leur puissance déterminée par sondage est de l'ordre de 25 mètres [Hayane S.M., 1983].

2. Les conglomérats de la plaine d'Hennaya : représentent la couche la plus importante dont l'épaisseur décroît du sud vers le nord, au niveau des deux sources d'Ain Boukoura et d'Ain Ouahab.

3. Les travertins : affleurent dans des petites surfaces, ils sont surmontés par des graviers argileux, avec les graviers argileux, ils forment un horizon d'aquifère commun qui renferme la nappe du Mio- Plio-Quaternaire.

4. Les graviers et graviers argileux : couvrent pratiquement tout l'aquifère. Situés au dessus des conglomérats, Ils sont recouverts d'argile et de croûte calcaire. Ces derniers sont plus importants au sud.

Et les marnes helvétiques qui constituent le substratum imperméable de l'aquifère.

Formation	Épaisseur	Lithologie	Description	Perméabilité
Quaternaire	??		croûte carapace calcaire, argiles	peu perméable
Tortonien	25m		conglomérats grès jaune	perméable
Serravalien	100m		Argiles marneuses avec intercalation de bancs de grès	perméable
Miocène.inf	100m		Marnes grises à verdâtres avec intercalation de bancs de grès	imperméable
Eocène	50m		calcaire surmonté par une alternance de grès et de marnes	imperméable
Dolomie de Tlemcen	300m		Dolomies cristallines grises à patine rousse dans les quelles on observe des laminites stromatolitiques	forte perméabilité de fissure
Cal. de Zarifet	25m		calcaires bleus	
Grès de Boumediène	500m		Grès bruns en gros. Bancs séparés par des interlits argileux. Au sommet on trouve quelques passées marneuses et calcaires	faible ou nulle

Fig.15- Log hydrogéologique de la plaine d’Hennaya [Hayane S.M., 1983].

B. Géométrie de l’aquifère

1. Les limites de l’aquifère

- ❖ **Au Nord** : l’horizon aquifère est drainé vers la surface par des sources.
- ❖ **Au Sud** : par les terrains Karstiques du jurassique supérieur de Tlemcen.
- ❖ **A L’Est et à l’Ouest** : par les marnes helvétiques imperméables.

2. coupes géologique

Au Sud, l’aquifère est constitué de grès. Du Sud au Nord, les graviers argileux recouvrent les conglomérats. Dans le Nord les travertins sont au dessus des conglomérats. A l’Est et à l’Ouest les marnes helvétiques affleurent à la surface (Fig.16).

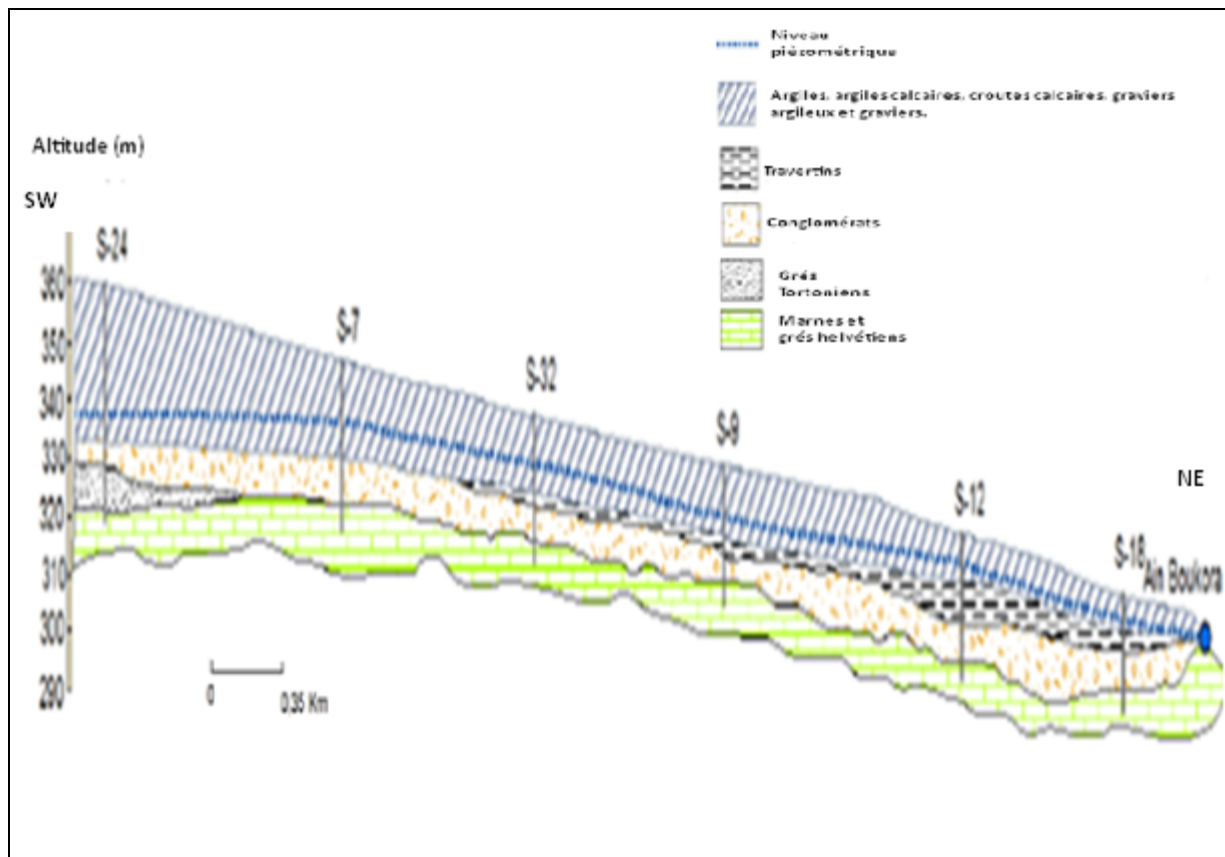


Fig.16- Coupes géologiques d'après [Hayane S.M. 1983].

C. Exutoires

Les sources apparaissent dans les conglomérats en contact avec le substratum imperméable. A l'exception de la source d'Hennaya qui émerge au niveau des grès tortoniens. Les sources les plus importantes sont celles d'Ain Boukoura avec un débit moyen de (50L/s) et Ain Ouahab avec un débit moyen de (20L/s), ces débits ont été enregistrés en 1981, ils sont considérées comme l'exutoire de la nappe d'Hennaya(Fig17).

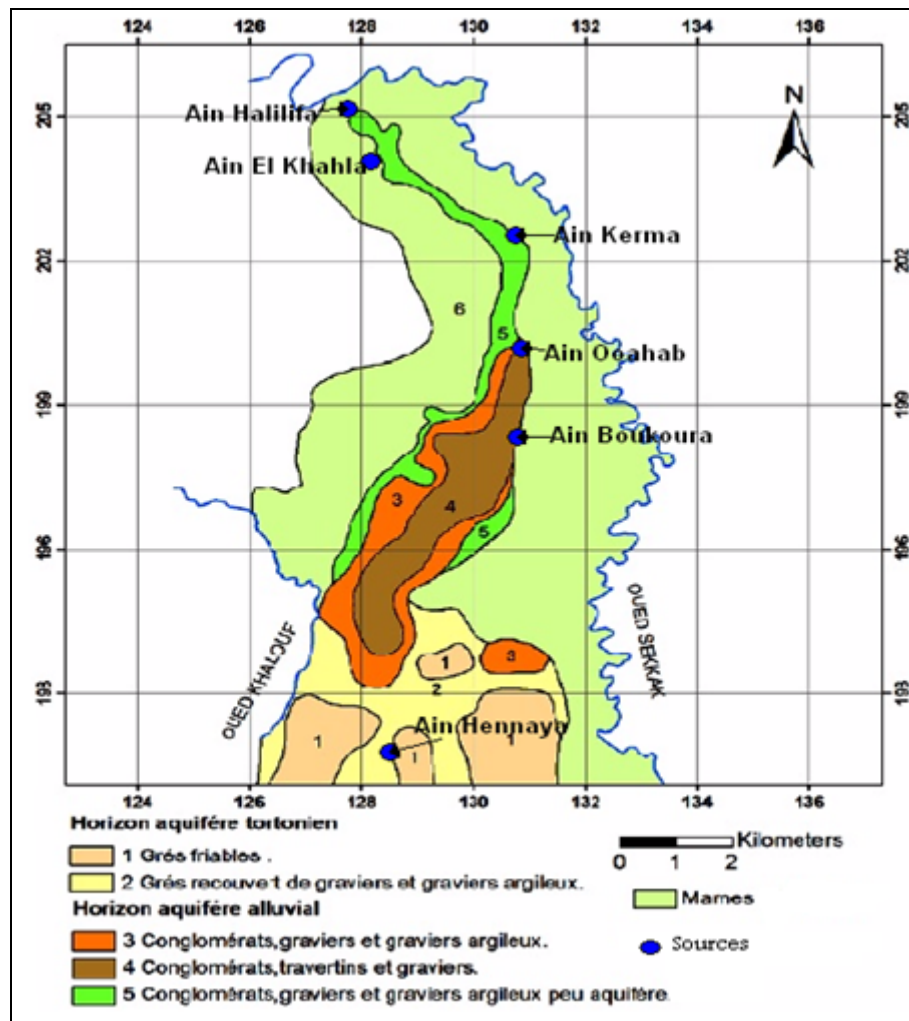


Fig.17-Les sources de la plaine d’Hennaya.

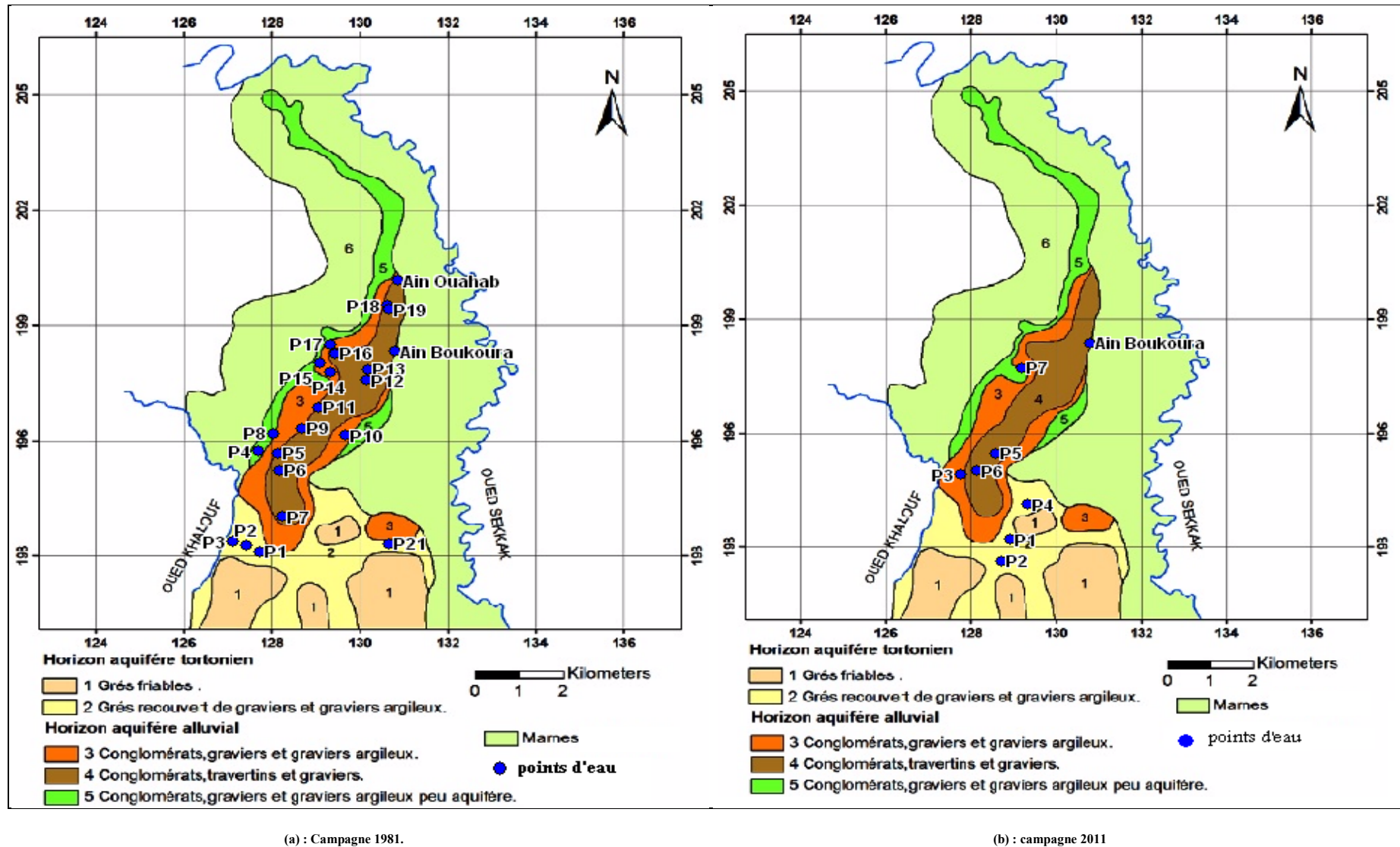
D. Caractéristiques de la nappe

1. Piézométrie

La mesure du niveau des eaux souterraines est d'une importance fondamentale dans l'hydrogéologie. Le niveau des eaux souterraines de l'aquifère peut être utilisé pour plusieurs raisons, notamment pour la construction d'une carte piézométrique qui est nécessaire afin de connaître l'extension de l'aquifère, la direction et la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines, ainsi que leur zones d'accumulation.

Dans ce travail, nous avons tenté de faire une étude piézométrique comparative entre deux périodes chronologiques ; nous nous sommes, donc référé aux relevés piézométriques de la campagne de juin 1981 faite par S.M Hayane à base de 22 points d’eaux, et Juin 2011 par A. Bemoussat faite à base de 8 points d’eaux(Annexe II).

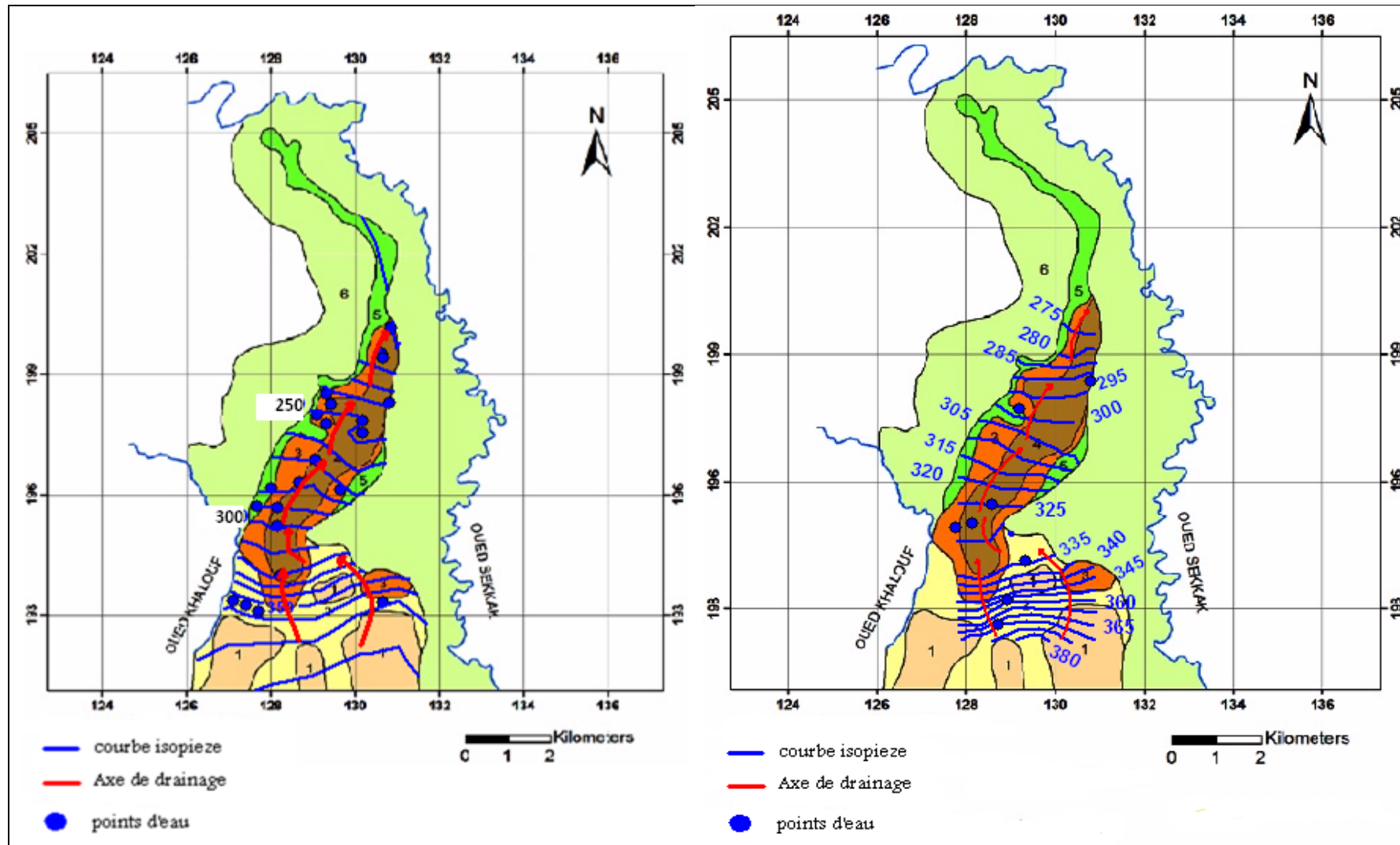
L’inventaire des points d’eaux des deux campagnes est représenté sur la figure ci-dessous (Fig.18) :



(a) : Campagne 1981.

(b) : campagne 2011

Fig.18- Inventaire des points d'eau de la plaine d'Hennaya.



(a) : Campagne 1981.

(b) : campagne 2011

Fig.19- Carte piézométrique de la plaine d'Hennaya.

Les cartes piézométriques des deux campagnes (figure 19), montrent que :

L'écoulement souterrain s'effectue principalement sur les deux cartes, du Sud-Ouest vers le Nord-Est de la plaine d'Hennaya;

Les courbes isopièzes sont plus espacées vers le Nord est plus rapprochées vers le Sud de la plaine d'Hennaya sur les deux cartes piézométriques ;

Le gradient hydraulique n'est pas constant, sa variation pourrait s'expliquer probablement par l'hétérogénéité du terrain, Il est faible au Nord à cause de la forte perméabilité des conglomérats, et fort au Sud à cause de la faible perméabilité des grès ;

Le niveau piézométrique de la nappe décroît au fur et à mesure que l'on avance vers le Nord ;

2. Hydrodynamique de la nappe

Les paramètres essentiels pour l'aquifère et l'écoulement souterrains sont : le paramètre de perméabilité K (m/s), la transmissivité T (m^2/s).

Ils ont pour but de connaître l'état physique de la nappe.

a. Perméabilité

Appelée aussi la conductivité hydraulique, c'est la propriété d'un milieu poreux, combinée à celle de fluide s'écoulant dans ce milieu à l'état de saturation, qui détermine la relation, nommée La loi de Darcy, entre le débit spécifique et le gradient hydraulique qui provoque le mouvement. [Glossaire internationale d'hydrogéologie, 1974].

b. Transmissivité

C'est un paramètre qui régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de l'aquifère, sous l'effet du gradient hydraulique, incluant l'épaisseur de l'aquifère. [Définition Actu-environnement, 2003].

E. Conclusion

La plaine d'Hennaya renferme un aquifère alluvionnaire constitué des grès tortoniens au Sud et des conglomérats surmontés par les travertins et des graviers argileux au Nord, ils ont une capacité d'environ 22 millions m³ avec une épaisseur importante dans la partie centrale et plus faible on allant vers le Nord.

D'après l'étude hydrogéologique sur l'aquifère de la plaine d'Hennaya, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

La recharge de la nappe s'effectue par une alimentation latéralement, par les dolomies de Tlemcen qui affleurent au Sud de la plaine d'Hennaya.

La majorité des sources émergent dans les conglomérats, à l'exception de la source d'Hennaya qui émerge au niveau des grès tortoniens. La source d'Ain Boukoura avec un débit moyen de (50L/s en 1981) est le principal exutoire de la nappe.

D'après l'étude piézométrique des deux campagnes, celle de 1981 et de 2011, le sens de l'écoulement se fait de manière général de Sud-Ouest vers le Nord-Est, et les courbes isopièzes sont plus espacées vers le Nord est plus rapprochées vers le Sud probablement lié à la perméabilité.

Dans la zone semi aride, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitue l'un des facteurs les plus importants dans la production agricole, aussi bien que dans l'intensification des cultures, que dans l'extension des surfaces irriguées.

Pour les zones semi arides, les ressources en eau sont rares alors souvent on fait appel aux eaux souterraines, la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation est essentielle pour le rendement des cultures et le maintien de la productivité du sol.

Les ions présents dans les eaux d'irrigation ont une influence importante sur les propriétés physiques et chimiques du sol, telles que sa structure et sa perméabilité.

L'étude hydrochimique des eaux souterraines est un support qui permet d'une part de confirmer les résultats de la prospection hydrogéologique d'où les sels dissous sont des marqueurs naturels qui permettent de caractériser un aquifère ou d'en préciser les facteurs d'écoulements, et d'autre part de connaître la qualité des eaux.

Principalement, notre étude a pour but de tenter d'expliquer, l'évolution du comportement des éléments chimiques, spécifiquement les variations spatio-temporelles de la qualité des eaux souterraines. Comme la plaine d'Hennaya est à vocation agricole, un intérêt particulier sera accordé à cet effet.

L'étude se base sur les informations hydrochimiques de deux campagnes de prélèvement effectuées pour des travaux de recherche (Annexe III):

- **S.M. Hayane, 1981**, dans le cadre d'une thèse de doctorat, il a effectué une première campagne en mois de Juin 1981, sur 20 puits et deux sources localisés sur notre secteur d'étude.
- **A.Bemoussat, 2012**, dans ses travaux de mémoire de Magister, a présenté une campagne d'analyse chimique du mois d'Octobre 2011, faite sur un nombre de 07 puits et une source situés dans la plaine d'Hennaya.

Cette présente partie du travail, comporte :

- Une description sommaire des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines des deux séries de données chimiques ;
- Une classification des faciès chimiques ;
- Une étude qualitative des eaux du point de vue irrigation, par plusieurs indices ;
- Une illustration cartographique par des cartes isoteneurs des différents indices d'irrigation, pour voir l'aspect évolutif de la qualité des eaux souterraines de la nappe Tortonienne de la plaine d'Hennaya en une période de 30 ans.

I. DESCRIPTION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Le chimisme des eaux souterraines dépend principalement du faciès lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs et mineurs.

Les analyses chimiques concernent: le pH, la conductivité électrique, les éléments majeurs : Les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), et les anions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-).

La vérification des résultats des analyses physico-chimiques, et aussi la fiabilité des interprétations, dépendent des pourcentages trouvés par la balance ionique BI, calculée par la formule suivante :

$$BI = \frac{|\sum r^+ + \sum r^-|}{\sum r^+ + \sum r^-} \times 100$$

- BI < 2 => Une bonne analyse.
- 2 < BI < 5 => Une analyse acceptable.
- BI > 5 => Une mauvaise analyse.

La description des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines porte sur une comparaison des minimas et maximas des différents teneurs des éléments chimiques, ainsi qu'une comparaison des concentrations des éléments dissous par rapport aux normes de potabilité de l'OMS [WHO, 2011].

II. DETERMINATION DES PRINCIPAUX FACIES HYDROCHIMIQUES

D'après Jaeckli (1970), les faciès hydrochimiques sont fréquemment utilisés en hydrogéologie pour décrire grossièrement la composition des eaux naturelles [Gouaidia L., 2008]. On les détermine par le calcul des quantités en réaction (conversion des concentrations en meq/L), et en tenant compte de la classification des ions (formule ionique).

Dans le but de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyse s'avère un outil inévitable.

Pour atteindre cet objectif, on a eu recours au diagramme de Piper. La réalisation de ce diagramme a été faite en utilisant le logiciel Diagramme, conçu par Roland Simler du Laboratoire d'hydrogéologie, de l'Université d'Avignon (Version de 2004).

Ce type de diagramme permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global.

Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

III. APPTITUDE DES EAUX SOUTERRAINES A DES FINS D'IRRIGATION

Afin de pouvoir déterminer les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de la plaine d'Hennaya, et leur aptitude à des fins d'irrigation, on utilise plusieurs indices :

A. Indice d'échange de bases (IEB)

Cet indice permet la détermination des échanges intervenant entre la phase aqueuse et les phases solides (principalement les minéraux argileux). En effet, les minéraux argileux échangent des ions Na^+ et K^+ contre des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} présents en solution. Il est donné par l'expression suivante [Bennabidate L., 2000 *in* Bensedjad A. 2011] :

$$IEB = \frac{r\text{Cl}^- - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{r\text{Cl}^-}$$

- Si $IEB < 0$: les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau sont échangés contre les ions Na^+ et K^+ du terrain, et il ya un apport de cations par un contact avec les argiles ;
- Si $IEB > 0$: les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont échangés contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} du terrain, et il ya des phénomènes de re-concentration des chlorures et de consommation de Na^+ et K^+ par la végétation, dus à l'évapotranspiration.

B. Meteoric Genesis (MG)

Les eaux souterraines peuvent aussi être classées sur la base du « Meteoric Genesis Index ». Il est donné par l'expression [Abdelmoneim, 1988 *in* Bensedjad A. 2011] :

$$MG = \frac{|\text{K}^+ + \text{Na}^+| - \text{Cl}^-}{\text{SO}_4^{2-}}$$

- Si $MG < 1$: la percolation de l'eau est profonde ;
- Si $MG > 1$: la percolation de l'eau est peu profonde.

C. Potentiel d'Hydrogène (pH)

C'est un paramètre physique qui détermine l'acidité ou l'alcalinité. Une valeur de PH normal, pour une eau d'irrigation, se situe entre 6,5 et 8,4 [Sundaray 2009 *in* Bensedjad A., 2011].

Tab.08- Classification des eaux d'irrigation selon pH [Gunduz et al. ,2006 *in* Bensedjad A., 2011].

	Classe I Bonne	Classe II Modérée	Classe III Mauvaise
pH	6,5 – 8,4	5,1 – 6,4 et 8,5 – 9,5	< 5,1 et > 9,5

D. Conductivité électrique

La concentration totale en sels dissous dans les eaux d'irrigation peut être exprimée en termes de conductivité électrique dans un but de diagnostique et de classification.

Tab.09- Classification des eaux d'irrigation selon la conductivité[Gunduz et al., 2006 in Bensedjad A., 2011].

paramètre	Classe I Très bonne	Classe II Bonne	Classe III Marginale	Classe IV pauvre	Classe V mauvaise
Conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	0 - 250	250 - 750	750 - 2000	2000 - 3000	> 3000

E. Chlorures

La toxicité la plus courante provient des chlorures contenus dans les eaux d'irrigation. La concentration des chlorures dans les feuilles des végétaux excède la limite de tolérance, des symptômes peuvent apparaître : dessèchement des feuilles accompagné d'une défoliation précoce [Ayers and Westcot, 1994 in Bensedjad A., 2011].

Tab.10- Classification des eaux d'irrigation selon les chlorures[Gunduz et al., 2006 in Bensedjad A., 2011].

paramètre	Classe I Très bonne	Classe II Bonne	Classe III Admissible	Classe IV Médiocre	Classe V mauvaise
Chlorure ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	0 - 142	142 - 249	249 - 426	426 - 710	>710

F. Sulfates

Certaines plantes montrent une sensibilité aux fortes concentrations en sulfates des eaux d'irrigation, mais il est probable que cette sensibilité soit reliée à la tendance qu'ont ces grandes concentrations de limiter l'assimilation du calcium par les plantes. Cette diminution est associée, d'autre part, à la diminution relative de l'absorption du sodium et du potassium [Tiwari et Manzoor, 1988 in Bensedjad A., 2011].

Tab.11- Classification des eaux d'irrigation selon les chlorures[Gunduz et al., 2006 in Bensedjad A., 2011].

paramètre	Classe I Très bonne	Classe II Bonne	Classe III Admissible	Classe IV Médiocre	Classe V mauvaise
Sulfate ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	0 - 192	192 - 336	336 - 575	575 - 960	>960

G. Kelly's Ratio (KR)

L'indice de Kelly's Ratio (KR) est représenté par le rapport des concentrations de Na^+ et la somme de Ca^{2+} et Mg^{2+} . Il constitue une base pour la détermination de l'aptitude des eaux à l'irrigation [Paliwal, 1967 in Bensedjad A., 2011]. Une grande concentration en Na^+ dans l'eau d'irrigation est considérée comme inappropriée pour son utilisation. Cet indice est donné par la relation :

$$KR = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

- Si $KR < 0$: l'eau est mauvaise pour l'irrigation ;
- Si $KR > 0$: l'eau est bonne pour l'irrigation.

H. Magnésium Hazard (MH) [Szabolcs&Darab, 1964 in Bensedjad A., 2011].

Le magnésium Ratio est le rapport de la concentration $Mg^{2+} \times 100$ et la somme de Ca^{2+} et Mg^{2+} . L'excès de Mg^{2+} affecte la qualité du sol et donne de mauvais rendements agricoles. Il est donné par la relation :

$$MH = \frac{Mg^{2+} \times 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

- Si $MH < 50$: l'eau est bonne pour l'irrigation ;
- Si $MH > 50$: l'eau est mauvaise pour l'irrigation [Lloyd&Heathcoat, 1985 in Bensedjad A. 2011].

I. Permeability Index (PI)

Doneen en 1964, à classé les eaux d'irrigation en se basant sur l'index de perméabilité (PI).[Bensedjad A., 2011].

Il est défini par la relation suivante:

$$PI = \frac{Na + \sqrt{HCO_3}}{Ca + Mg + Na} \times 100$$

- Si $PI > 75\%$: l'eau est bonne pour l'irrigation ;
- Si $25\% < PI < 75\%$: l'eau est admissible sous certaines conditions pour son utilisation ;
- Si $PI < 25\%$: l'eau n'est plus utilisable.

J. Pourcentage sodium (%Na)

Le pourcentage du sodium (%Na) de l'eau est un paramètre utilisé dans l'évaluation de l'aptitude des eaux à l'irrigation [Wilcox, 1948, Tiwari and Manzoor, 1988 *in* Bensedjad A., 2011]. Le Na% peut être calculé par la relation suivante :

$$\%Na = \frac{100 \times (Na^+ + K^+)}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+)}$$

Tab.12- Classification des eaux d'irrigation selon les %Na.

paramètre	Classe I Très bonne	Classe II Bonne	Classe III Admissible	Classe IV Médiocre	Classe V mauvaise
%Na	<20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	>80

K. La méthode de Wilcox

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau exprimée en pourcentage. La représentation des différents échantillons sur ce diagramme permet la caractérisation des eaux pour leur aptitude à l'irrigation.

L. Sodium Absorption Ratio (SAR)

Les sols à grandes concentration en Na^+ (en solution) sont connus pour avoir une mauvaise structure physique [Appelo and Postma, 1993 *in* Bensedjad A. 2011]. La toxicité en Na^+ a lieu avec l'accumulation du sodium dans les tissus des plantes.

Une augmentation du SAR des eaux d'irrigation augmente celle des solutions du sol et de ce fait le sodium échangeable du sol [Isaac et al, 2009 *in* Bensedjad A. 2011].

Le SAR peut être déterminé par l'équation suivante :

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

L'eau avec un SAR se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec une faible accumulation de sodium. Quand le SAR se situe entre 6 et 9, les risques de problèmes liés avec la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas, le sol devrait être

échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol [Couture, 2004 in Bensedjad A. 2011].

I. CARTOGRAPHIE HYDROCHIMIQUE : Cartes d'isovaleurs des indices d'irrigation.

Les eaux souterraines contiennent toujours des sels dissous qui leur confèrent les caractéristiques du milieu dont elles sont issues. Ces sels peuvent également provenir de phénomènes exogènes qui ont contribué à des modifications de la chimie du milieu.

A cet effet, nous avons choisi, la répartition spatio-temporelle des indices d'irrigation, pour observer l'évolution de la qualité des eaux souterraines de l'aquifère gréseux Tortonien à des fins d'irrigation, de la campagne de juin 1981 à celle d'octobre 2011.

Afin de montrer cette répartition, on a procédé à l'établissement de la cartographie hydrochimique (en cartes des isovaleurs des indices). La répartition des indices, dépend de plusieurs facteurs tels que la composition chimique des eaux (sels dissous), la lithologie, l'état hydrodynamique de la nappe (les profondeurs de la surface piézométrique, la vitesse d'écoulement), les conditions climatiques, ... etc.

Pour l'élaboration des cartes d'isovaleurs des indices d'irrigation, on a utilisé "**logiciel SURFER 7.0**" et exporter les résultats au logiciel "**MapInfo Professional 8.0**" ; puis caler et digitaliser les courbes d'isovaleurs. Suivi par une mise en page des cartes obtenues.

I. DESCRIPTION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Après vérification des résultats des analyses physico-chimiques des points d'eau des deux campagnes par la balance ionique, il s'avère que seuls deux points d'eau (P 05 et P 12) de la campagne de juin 1981(Annexe III), ont des valeurs supérieures à 5 (de 6,16 et 7,27% successives), mais restent proches et tolérables, donc considérées comme analyses acceptables pour toutes les interprétations.

Les résultats d'analyse physico-chimique (les valeurs minimales, maximales, moyennes, et celles des écart-type) des eaux de la plaine d'Hennaya, pendant les périodes d'observation, ont été consignés dans le tableau 13.

Tab.13- Caractéristique des paramètres physico-chimique.

Eléments	Norme OMS	Campagne 1981				Campagne 2011			
		Min.	Max.	Moy.	Ecart-type	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type
pH	6.5<pH<8.5	7,2	7,8	7,5	0,146	7,18	7,26	7,22	0,033
Cond. (µS/cm)	2500	1267	2029	1554	203,26	1300	1500	1398,7	61,51
Ca ²⁺ (mg/l)	100	86	171	112,7	20,08	50	160	98,75	42,48
Mg ²⁺ (mg/l)	50	44	106	77,26	12,59	49	100	75,13	21,02
Na ⁺ (mg/l)	150	57	127	85,78	15,35	120	152	137,88	12,9
K ⁺ (mg/l)	12	1	15	3	2,8	2	5	3,5	2,12
Cl ⁻ (mg/l)	250	170	525	302,2	71,98	175	300	236,38	42,31
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	250	43	70	59,96	6,53	70	120	95,63	17,204
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	250	208	470	360,6	49,81	380	550	486,25	58,53

A. Potentiel hydrogène :

C'est un paramètre physique qui détermine l'acidité ou l'alcalinité. Les valeurs du pH (Fig.20) montrent que tous les puits se trouvent dans l'intervalle de norme de potabilité de l'organisation mondiale de la santé (OMS) pour les deux campagnes (1981 et 2011). Ces valeurs sont Respectivement de 7,5 et 7,22 pour les moyennes, des maximas de 7,8 (P8, P20 en 1981) et 7,26 (P1 en 2011) et des minimas de 7,2 (P21 en 1981) et de 7,18 (P4, P5 et P6 en 2011).

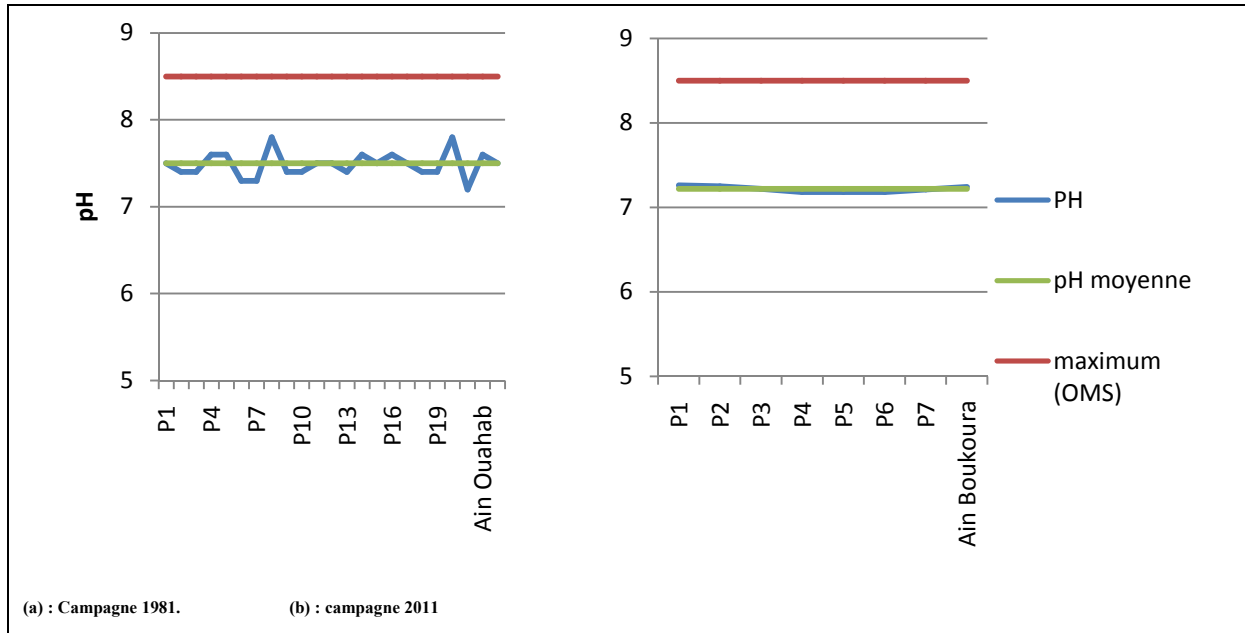


Fig.20-Variation du pH au niveau des points d’eau de la plaine d’Hennaya.

B. Conductivité électrique :

La conductivité permet d’apprécier le degré de minéralisation de l’eau dans la mesure où la plupart des matières dissoutes dans l’eau, se trouvent sous forme d’ions chargés électriquement.

L’évolution de la conductivité présentée sur la figure au-dessous (Fig.21), indique que dans les deux campagnes, les puits ont des valeurs en conductivité qui ne dépassant pas les 2500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ fixées par les normes de potabilité de l’OMS.

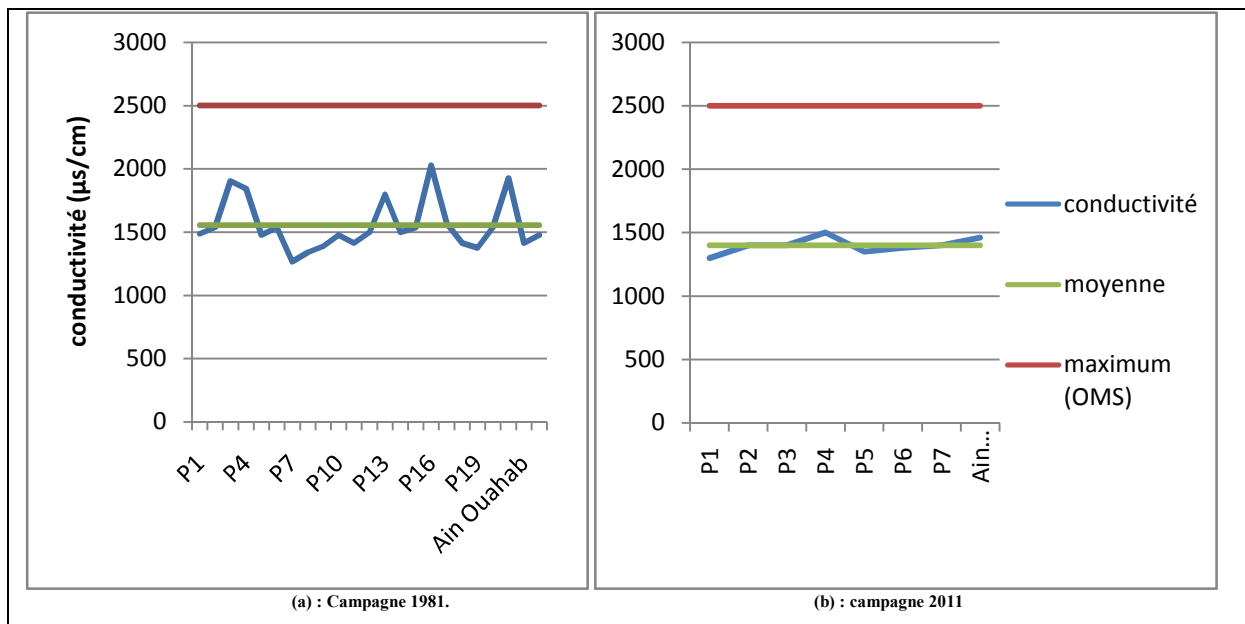


Fig.21-Variation de la conductivité au niveau des points d’eau de la plaine d’Hennaya.

C. Calcium Ca^{2+}

Métal alcalin terreux, composant majeur de la dureté de l'eau (TH). Sa teneur varie essentiellement selon la nature des terrains traversés [Rodier, 2009].

Les teneurs en Ca^{2+} des eaux de la nappe d'Hennaya (Fig.22), varient entre 86 mg/L (P11) et 171 mg/L (P21) en 1981, et varient entre 50mg/l (P2) et 160mg/l (P4) en 2011, la quasi-totalité des valeurs des concentrations en 1981, dépassent la valeur limite recommandée par les normes d'OMS de potabilité, fixée à 100 mg/L, à l'exception des teneurs aux puits P5, P7, P8 et P11. En 2011, seuls les points d'eau P3, P4 et P7 ont des teneurs supérieures à la valeur limite.

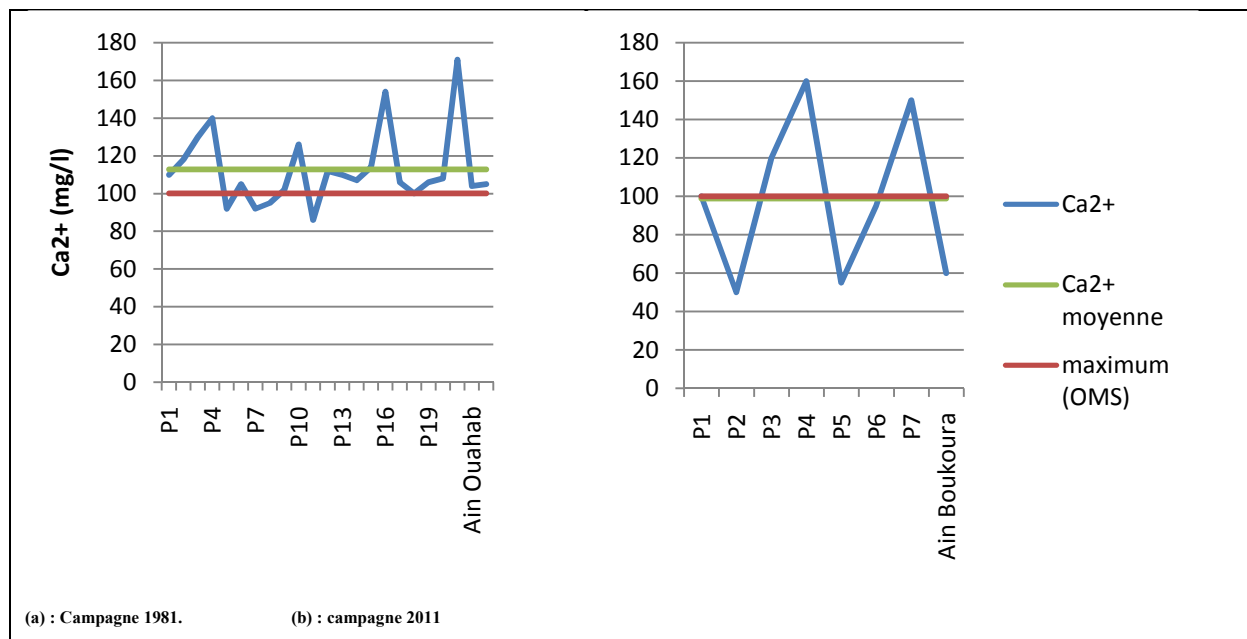


Fig.22- Variation de Ca^{2+} au niveau des points d'eau de la plaine d'Hennaya.

D. Magnésium Mg^{2+}

Les ions (Mg^{2+}) proviennent, comme les ions calcium, de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium (dolomite).

Les valeurs de concentration de Mg^{2+} au niveau des points d'eau de la plaine d'Hennaya (Fig.23), varient dépassent les 150 mg/L fixée par les normes d'OMS à l'exception de deux puits le P21 en 1981 et le P4 en 2011.

Elles varient entre 44 (P 21) et 106 mg/l (P 16) pour 1981 et varient entre 49 (P 04) et 100 mg/L (P 02) pour 2011.

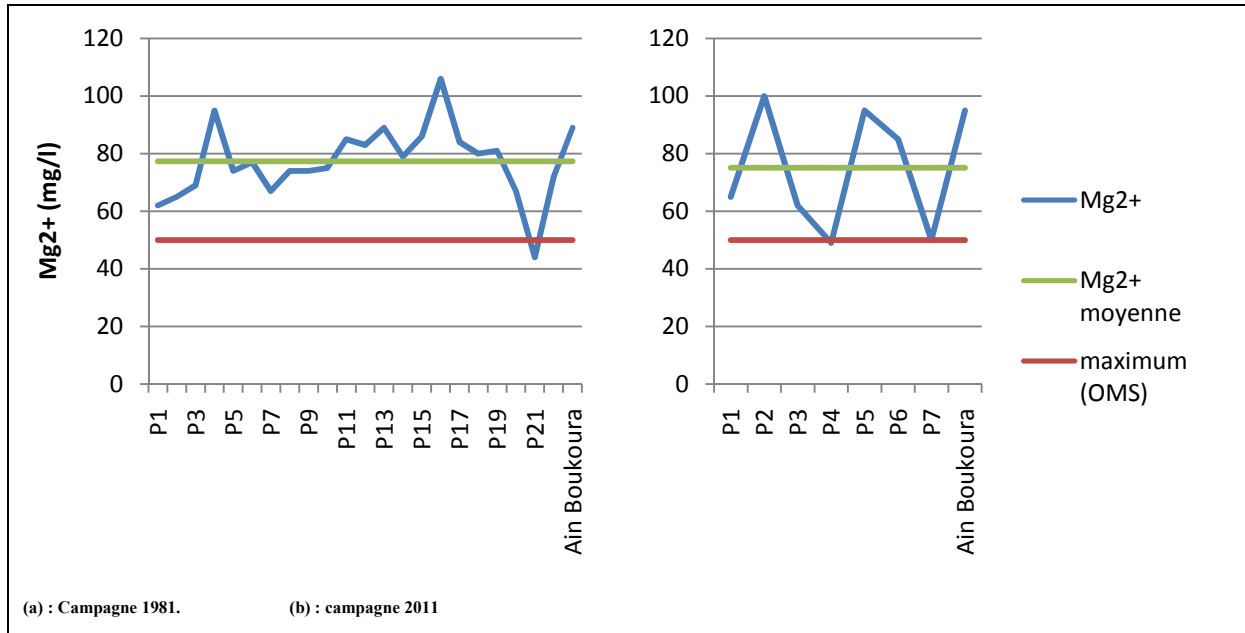


Fig.23-Variation de Mg^{2+} au niveau des points d’eau de la plaine d’Hennaya.

E. Sodium Na^+

Les teneurs en Na^+ (Fig.24) sont comprises entre 57mg/L (P 11) et 127 mg/L (P 21) pour la campagne 1981, et entre 120 (P 01 et P 02) et 152 mg/l (P 06) pour la campagne 2011. Seul le puits P6 à une valeur légèrement supérieure à la valeur seuil de L’OMS (150 mg/L).

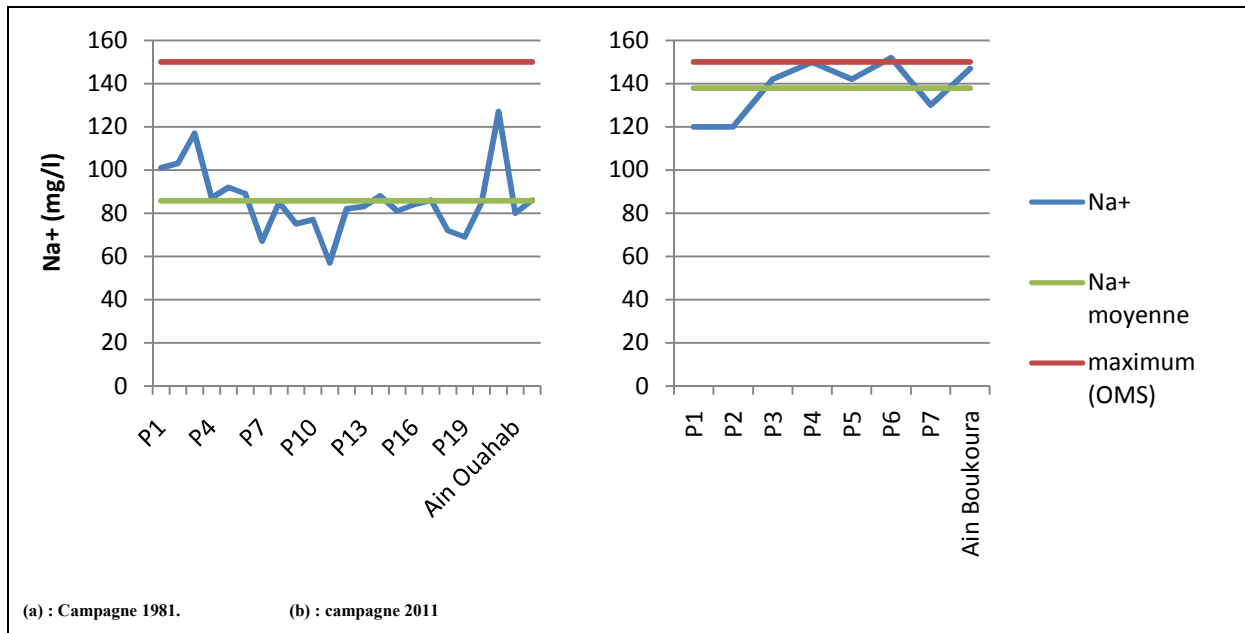


Fig.24-Variation de Na^+ au niveau des points d’eau de la plaine d’Hennaya.

F. Potassium K^+

Les concentrations en ions potassium en campagne de 1981, sont comprises entre 1 et 15 mg/L, en dépassant ainsi la valeur seuil de 12 mg/L recommandée par L'OMS, au niveau du puits P 07.

Pour la campagne de 2011, la totalité des points d'eau, sont dans les normes avec des valeurs inférieures à la limite fixée par OMS.

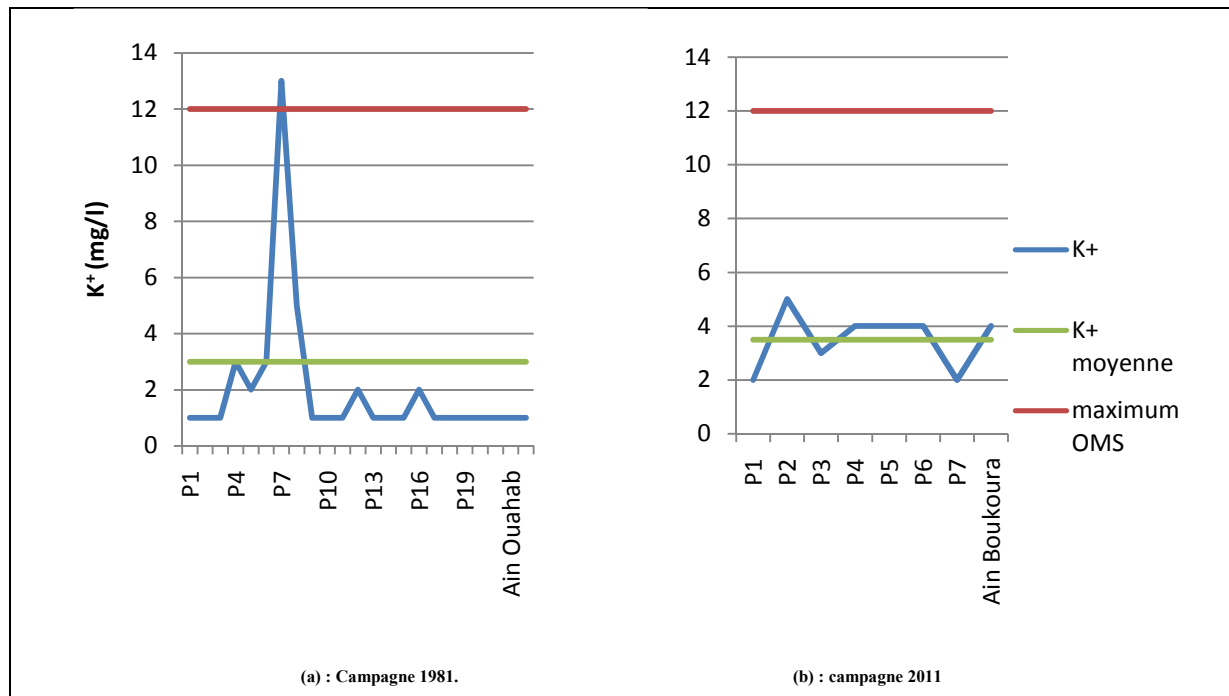


Fig.25- Variation de Na^+ au niveau des points d'eau de la plaine d'Hennaya.

G. Les chlorures Cl^-

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments. Il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile.

Sachant que les normes d'OMS de potabilité, fixe la valeur limite à 250 mg/l, les concentrations en chlorures dans les différents points d'eau (Fig.26), sont comprises entre 170 mg/L (P 07) et 525 mg/L (P 16) pour la campagne de 1981, elles sont largement au-dessus du maximum de l'OMS, à l'exception des points d'eau (5, 7 et 19).

Pour la campagne 2011, seuls P4, P7 et la source d'Ain Boukoura, ont des concentrations qui dépassent la norme fixée par l'OMS.

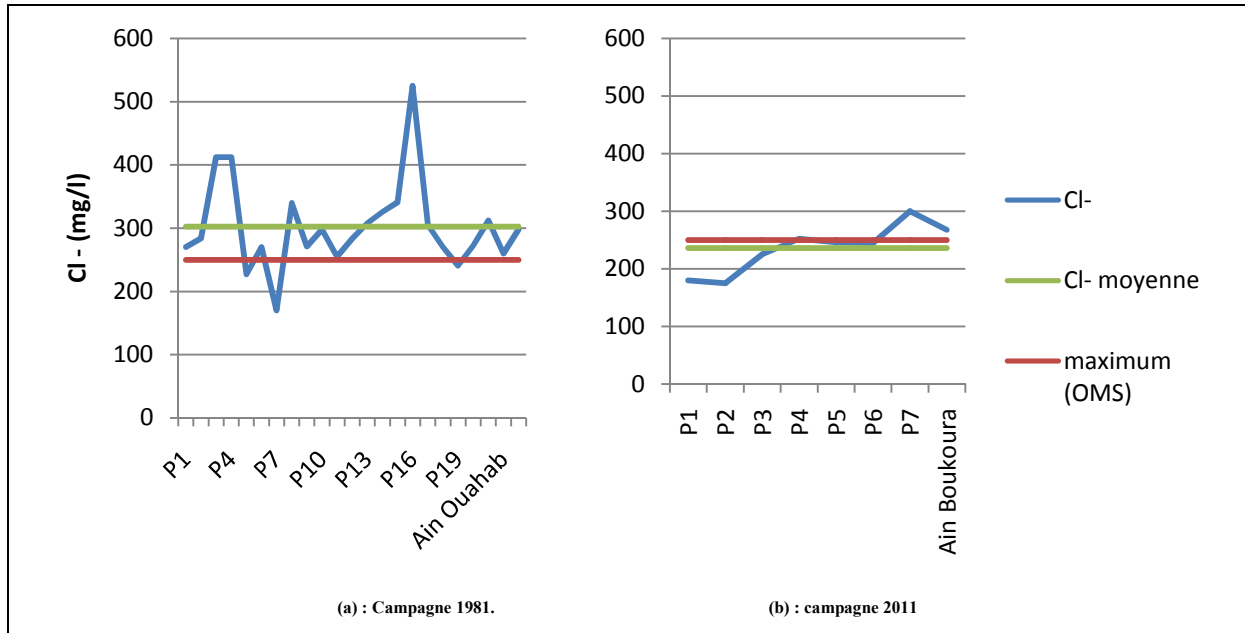


Fig.26- Variation de Cl⁻ au niveau des points d’eau de la plaine d’Hennaya.

H. Les sulfates SO₄²⁻

La présence des sulfates dans l’eau est liée à la dissolution du gypse et au lessivage des dépôts évaporite.

Selon les normes d’OMS de l’eau potable pour les sulfates, fixée à 250 mg/l, les concentrations sont comprises entre 43mg/L (P 10) et 70mg/L (P 16) en 1981, et entre 70mg/l (P 05) et 120mg/l (P 06) en 2011, dans les deux campagnes les concentrations ne dépassent pas la limite fixée (Fig.27).

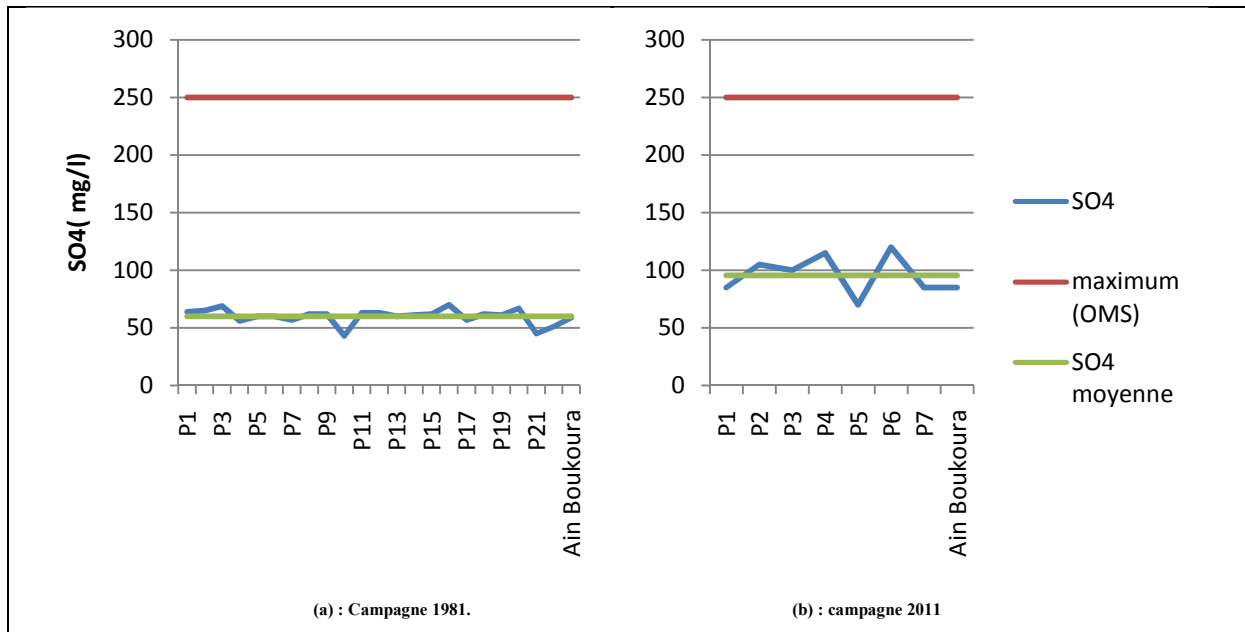


Fig.27- Variation de SO₄²⁻ au niveau des points d’eau de la plaine d’Hennaya.

I. les carbonates HCO_3^-

La présence des hydrocarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées.

Les concentrations des HCO_3^- (Fig.28) dépassent largement la limite fixée (250 mg/L) par les normes d'OMS de l'eau potable, les concentrations sont comprises entre un maximum de 470 mg/l (P7) et un minimum de 280mg/l (P12) en 1981, et avec un maximum de 550mg/l (P2) et un minimum de 380mg/l (P7) en 2011.

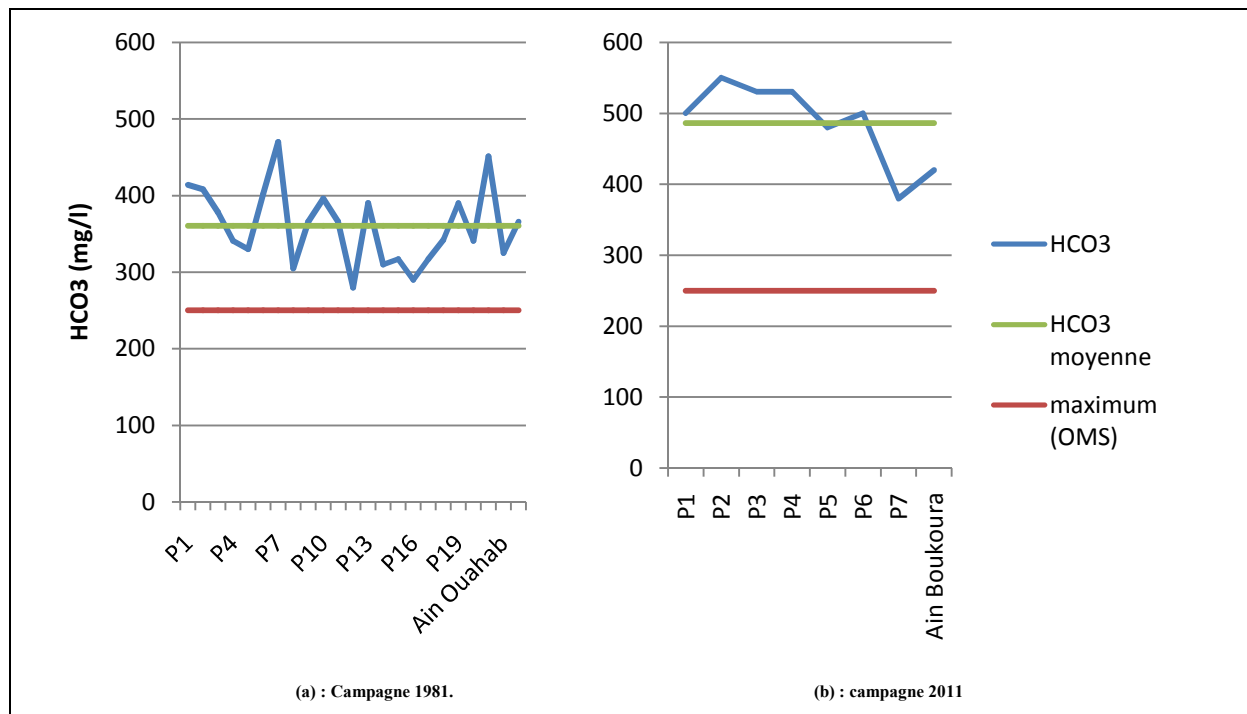
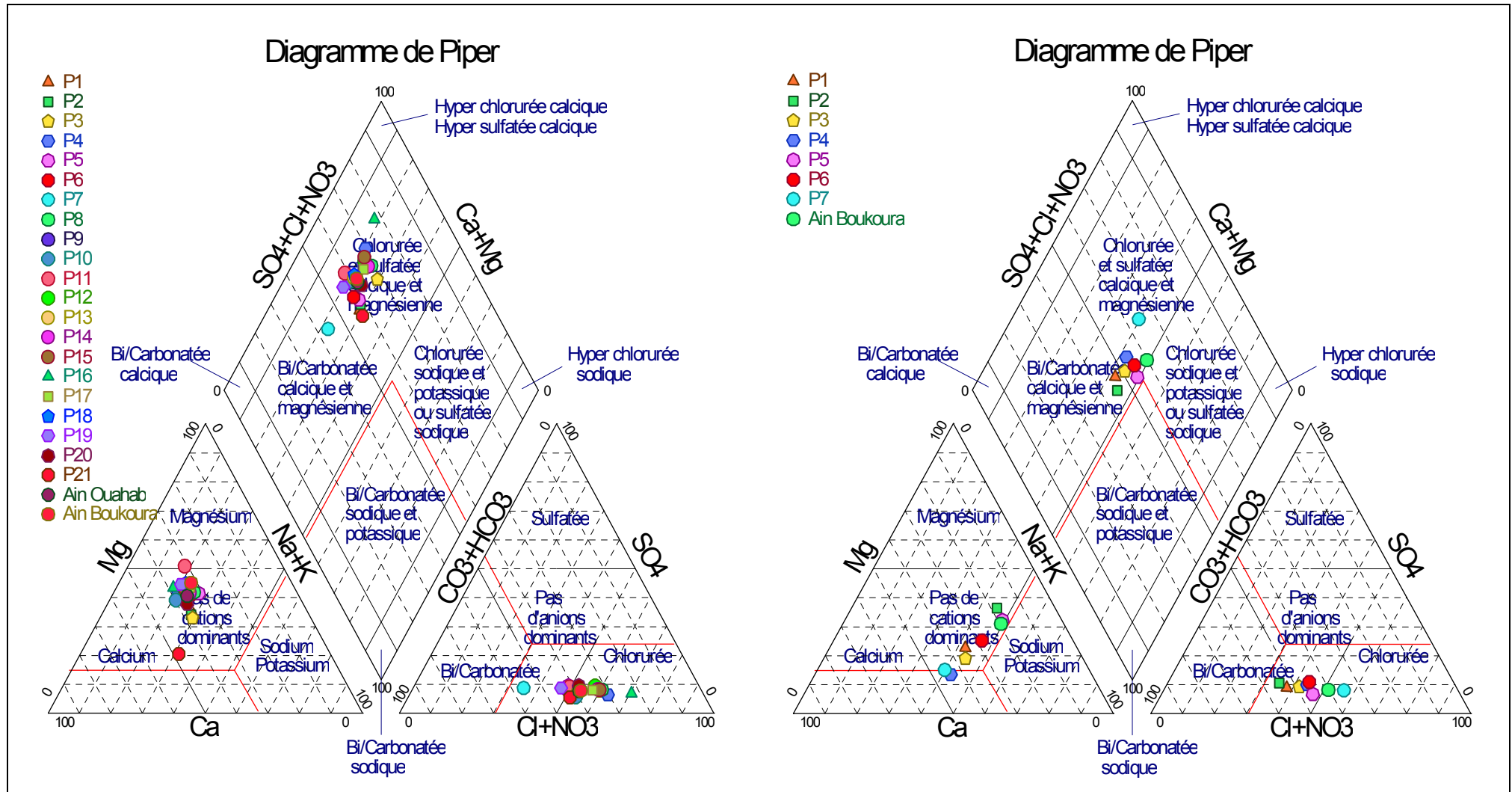


Fig.28- Variation de HCO_3^- au niveau des points d'eaux de la plaine d'Hennaya.

II. DETERMINATION DES PRINCIPAUX FACIES HYDROCHIMIQUE

D'après les diagrammes représentés sur la figure 29, nous pouvons classer les eaux souterraines de la plaine d'Hennaya selon deux grandes familles :

- Famille des eaux Bicarbonatées Calciques et Magnésiennes ;
- Famille des eaux Chlorurées et sulfatées Calciques et Magnésiennes.



(a) : Campagne 1981.

(b) : campagne 2011

Fig.29 – Diagramme de piper des points d’eau de la plaine d’Hennaya (1981) et (2011).

III. ETUDE A DES FIN D'IRRIGATION

A. Indice d'échange de bases (IEB)

Les histogrammes de la figure 30 représentent la variation de l'indice d'échange de base (IEB) pour les eaux souterraines de la plaine d'Hennaya.

Quasiment, la totalité des points d'eaux, ont des valeurs d'IEB supérieures à 0, à l'exception des deux puits P1 et P2 de la campagne de 2011, qui ont des valeurs inférieure à 0.

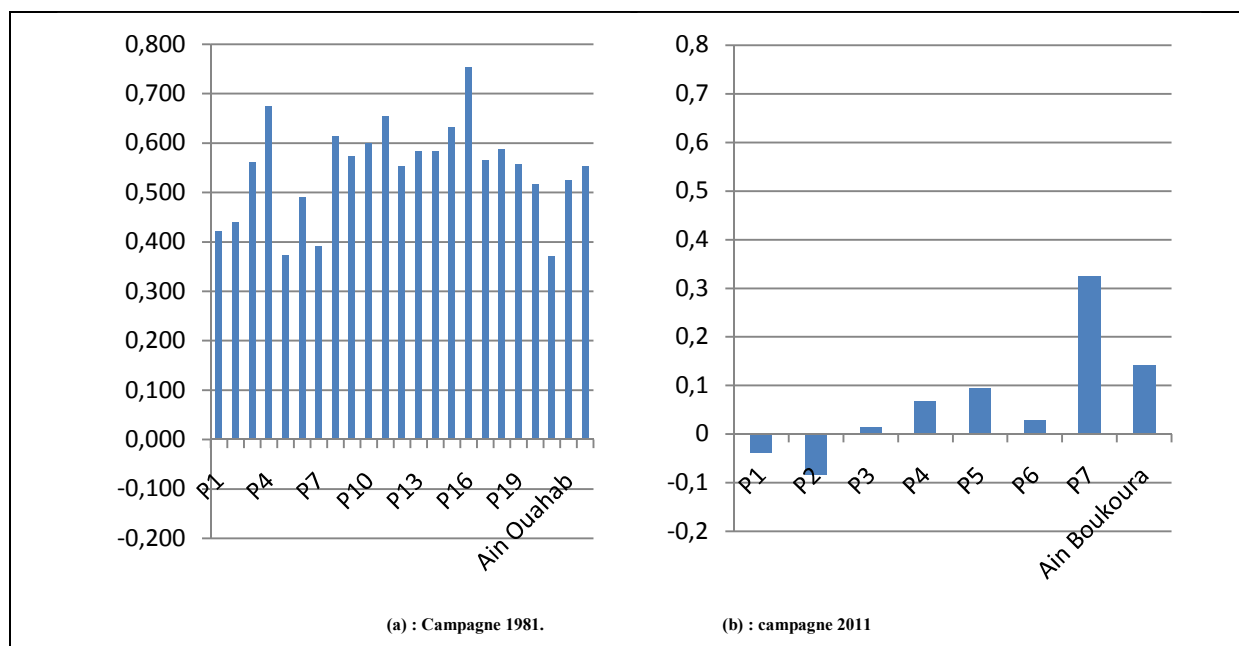


Fig.30-Variation d'IEB

B. Meteoric Genesis (MG)

Tous les points d'eau de la plaine aux niveaux des deux campagnes, présentent des valeurs de l'indice MG inférieurs à 1. (Fig. 31).

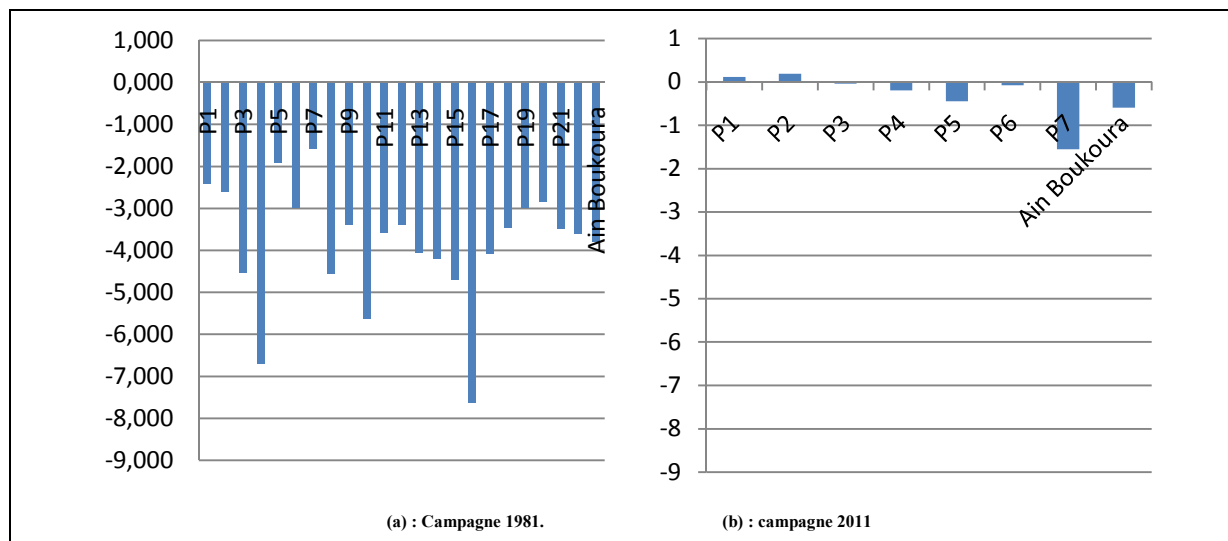


Fig.31- Variation de MG au niveau des points d'eaux de la plaine d'Hennaya.

C. Potentiel d'Hydrogène (pH)

D'après le tableau 15, tous les points d'eaux dans les deux années 1981 et 2011, on des valeurs de pH qui entre dans la classe I, donc ils ont considérées comme étant de bonne qualité pour l'irrigation.

Tab.15- Classification des eaux d'irrigation selon pH.

	Classe I Bonne	Classe II Modérée	Classe III Mauvaise
pH	6,5 – 8,4	5,1 – 6,4 et 8,5 – 9,5	< 5,1 et > 9,5
1981	Tous les puits Et sources		
2011	Tous les puits Et sources		

D. Conductivité électrique

D'après le tableau 16, tous les points d'eaux dans les deux années 1981 et 2011, on des valeurs de conductivités comprises entre 750-2000, ce qui correspond à la classe III (Marginal). Seul le puits 16 de la campagne 1981, se trouve dans la classe IV (Pauvre).

Tab.16- Classification des eaux de la plaine d'Hennaya selon conductivité.

paramètre	Classe I Très bonne	Classe II Bonne	Classe III Marginale	Classe IV pauvre	Classe V mauvaise
Conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	0 - 250	250 - 750	750 - 2000	2000 - 3000	> 3000
1981			Tous les autres puits et sources	P16	
2011			Tous les puits Et sources		

E. Chlorures

Selon les chlorures (Tab. 17), majoritairement, les eaux souterraines de la plaine de campagne 1981, font partie de la classe admissible, excepté P7 et P19 qui occupent la classe II (Bonne) et P16 en classe IV (Médiocre).

Tandis que, pour 2011, les eaux souterraines partagent les deux classes II et III (Bonne et Admissible).

Tab.17- Classification des eaux d'irrigation selon les chlorures.

paramètre	Classe I Très bonne	Classe II Bonne	Classe III Admissible	Classe IV Médiocre	Classe V mauvaise
Chlorure (mg.l ⁻¹)	0 - 142	142 - 249	249 - 426	426 - 710	>710
1981		P7, P19	Tous les autres puits et sources	P16	
2011		Tous les autres puits	P4, P7, Ain Boukoura		

F. Sulfates

D'après le tableau 18, tous les points d'eaux dans les deux années 1981 et 2011, on des valeurs de Sulfates qui entre dans la classe I (Très bonne).

Tab.18- Classification des eaux d'irrigation selon les chlorures.

paramètre	Classe I Très bonne	Classe II Bonne	Classe III Admissible	Classe IV Médiocre	Classe V mauvaise
Sulfate (mg.l ⁻¹)	0 - 192	192 - 336	336 - 575	575 - 960	>960
1981	Tous les puits Et sources				
2011	Tous les puits Et sources				

G. Kelly's Ratio (KR)

D'après la figure 32, la totalité des points d'eaux en 1981(Fig.32- a) et en 2011(Fig.32- b), ont des valeurs de KR inférieures à 1, donc l'eau est bonne pour l'irrigation.

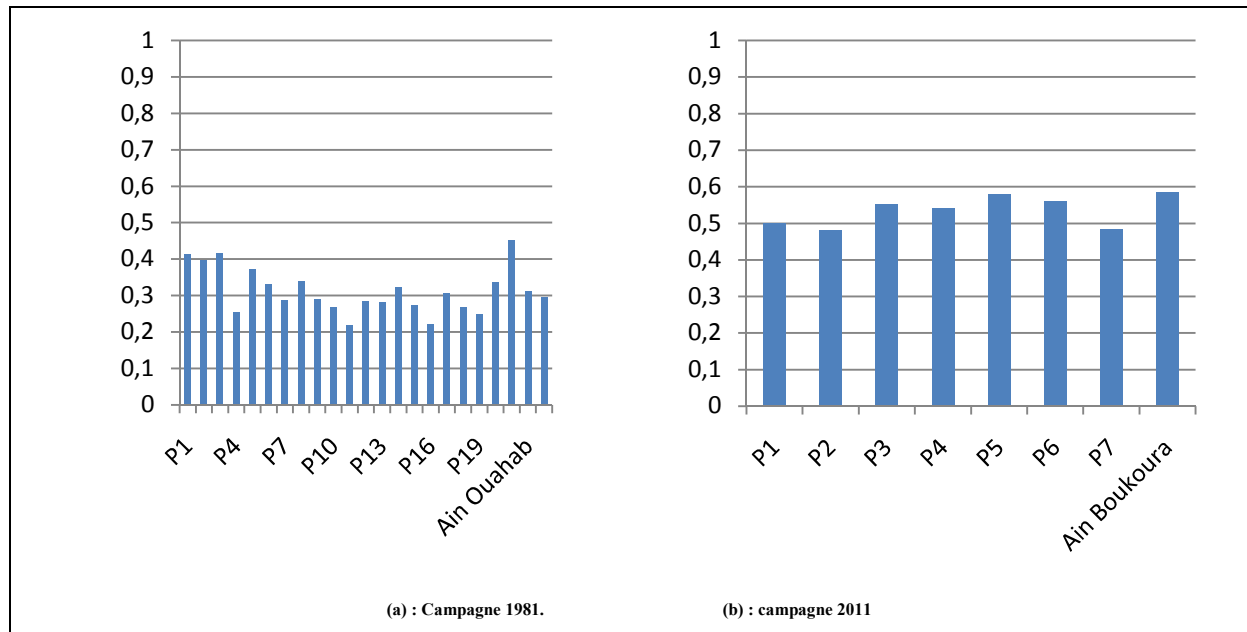


Fig. 32-Variation de KR

H. Magnésium Hazard (MH)

Sur la figure 33.a correspondante à la campagne 1981, seuls cinq points d'eau (P 01, P02, P 03, P 10 et P21), ont des pourcentages de MH ; inférieurs à 50, indiquent une bonne qualité de leurs eaux pour l'irrigation.

Pour la campagne 2011(Fig 33.b), quasiment l'ensemble des points ont des pourcentages supérieurs à 50, confirment une mauvaise qualité des eaux pour l'irrigation pour cet indice, exceptés P3, P4 et P7 (% >50) donc bonne qualité pour l'irrigation.

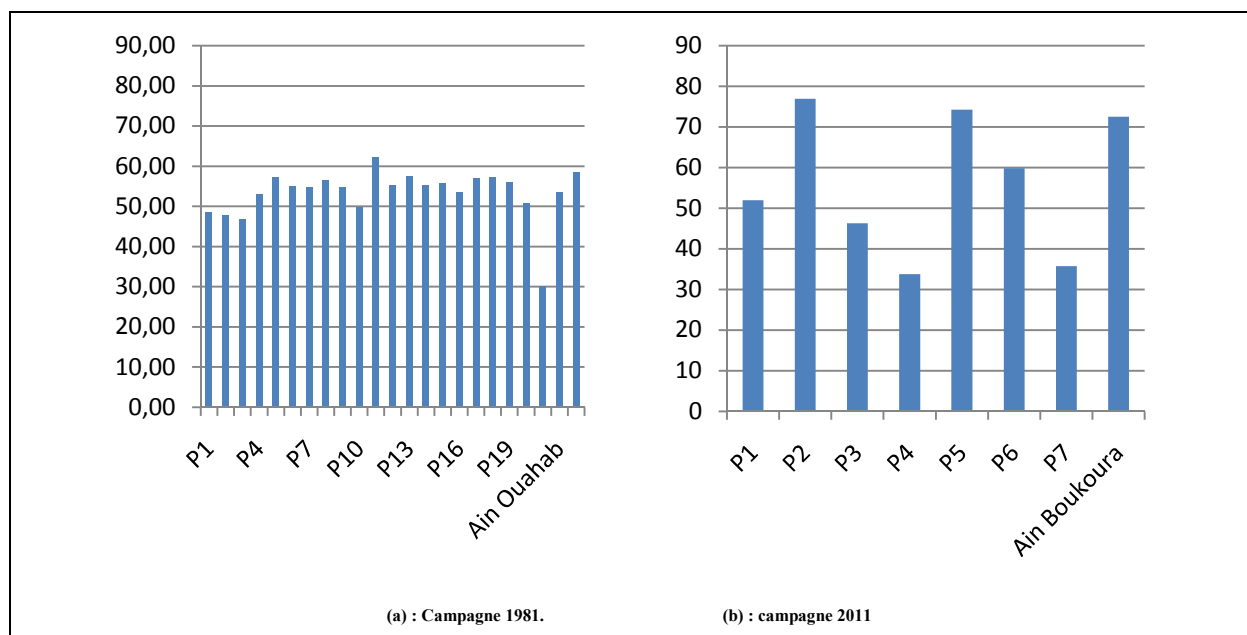


Fig.32- Variation de MH au niveau des points d'eaux de la plaine d'Hennaya.

I. Permeability Index (PI)

Les valeurs de l'indice PI pour les eaux des deux campagnes (Fig. 34), sont comprises entre 25 et 75%, ce que implique que les eaux d'après cette indice est admissible aussi pour l'irrigation. .

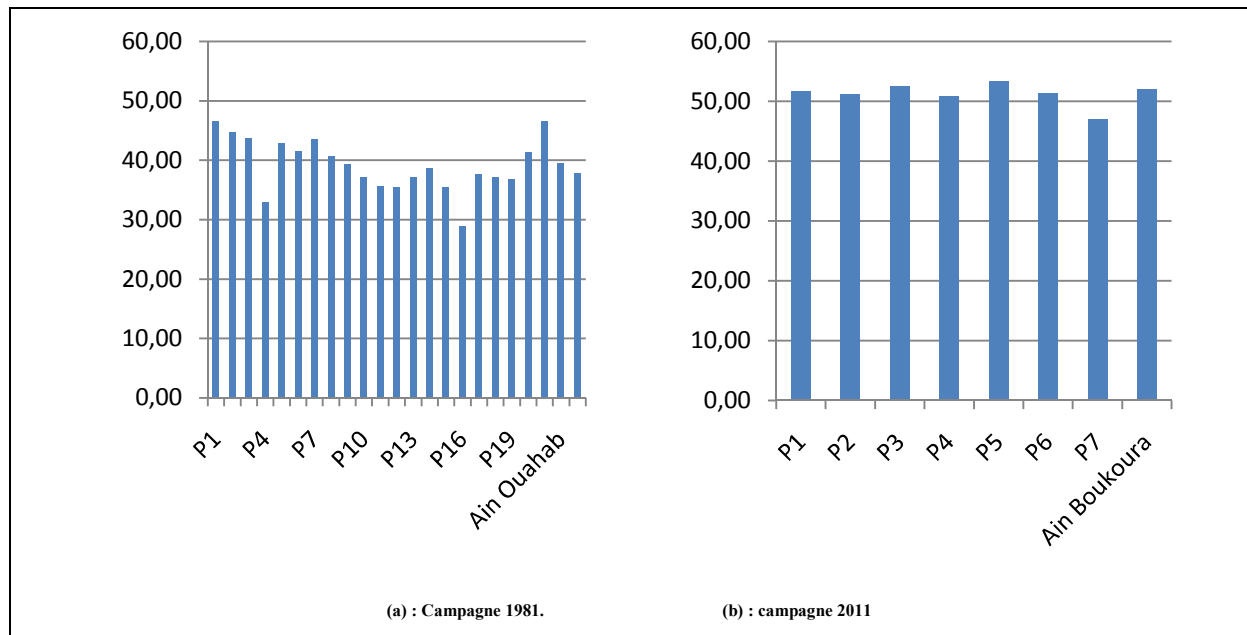


Fig.34- Variation de PI au niveau des points d'eaux de la plaine d'Hennaya.

J. Pourcentage sodium (%Na)

Pour Pourcentage Sodium en pourcentage (Tab.19), les eaux des puits P11, P16 et P19 (1981) ont des pourcentages de Na% de l'ordre inférieur à 20, les qualifiants de très bonnes pour l'irrigation. Le reste des points d'eau de la campagne, et ceux de la campagne 2011, font partie de la classe bonne.

Tab.19- Classification des eaux d'irrigation selon les %Na.

paramètre	Classe I Très bonne	Classe II Bonne	Classe III Admissible	Classe IV Médiocre	Classe V mauvaise
%Na	<20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	>80
1981	P11, P16, P19	Tous les autres puits et sources			
2011		Tous les puits Et sources			

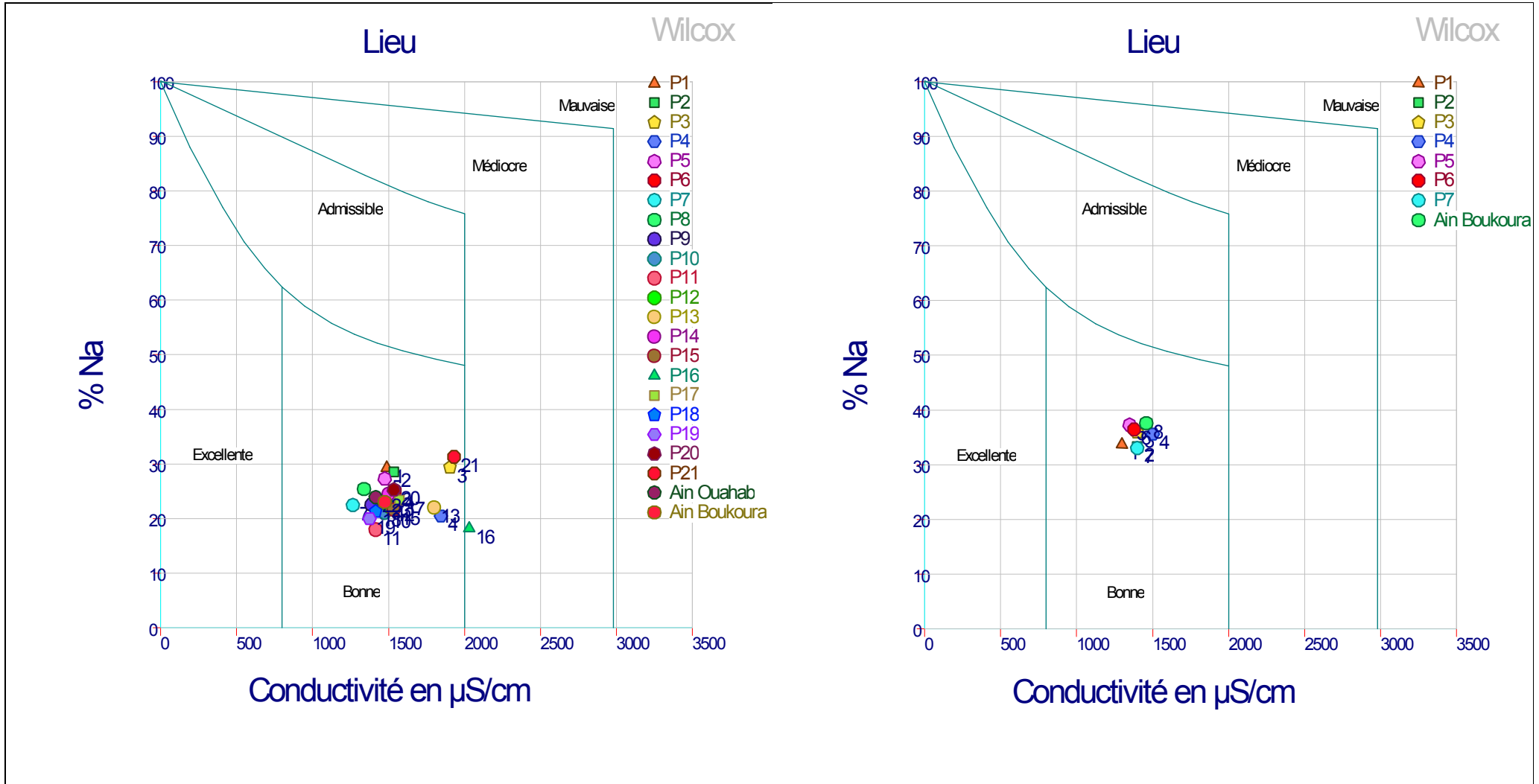
K. La méthode de Wilcox

D'après le diagramme de Wilcox (Fig. 35), les eaux de la plaine d'hennaya des deux compagnes, appartiennent à la classe bonne. A l'exception du point d'eau P16 de la compagnie 1981(Fig. 35- a) qui appartient à la classe Médiocre.

L. Sodium Absorption Ratio (SAR)

La figure 36, (Diagramme de Richards), montre que les eaux de la plaine d'hennaya des deux compagnes, appartiennent à la classe (C3-S1) qui exprime une qualité admissible.

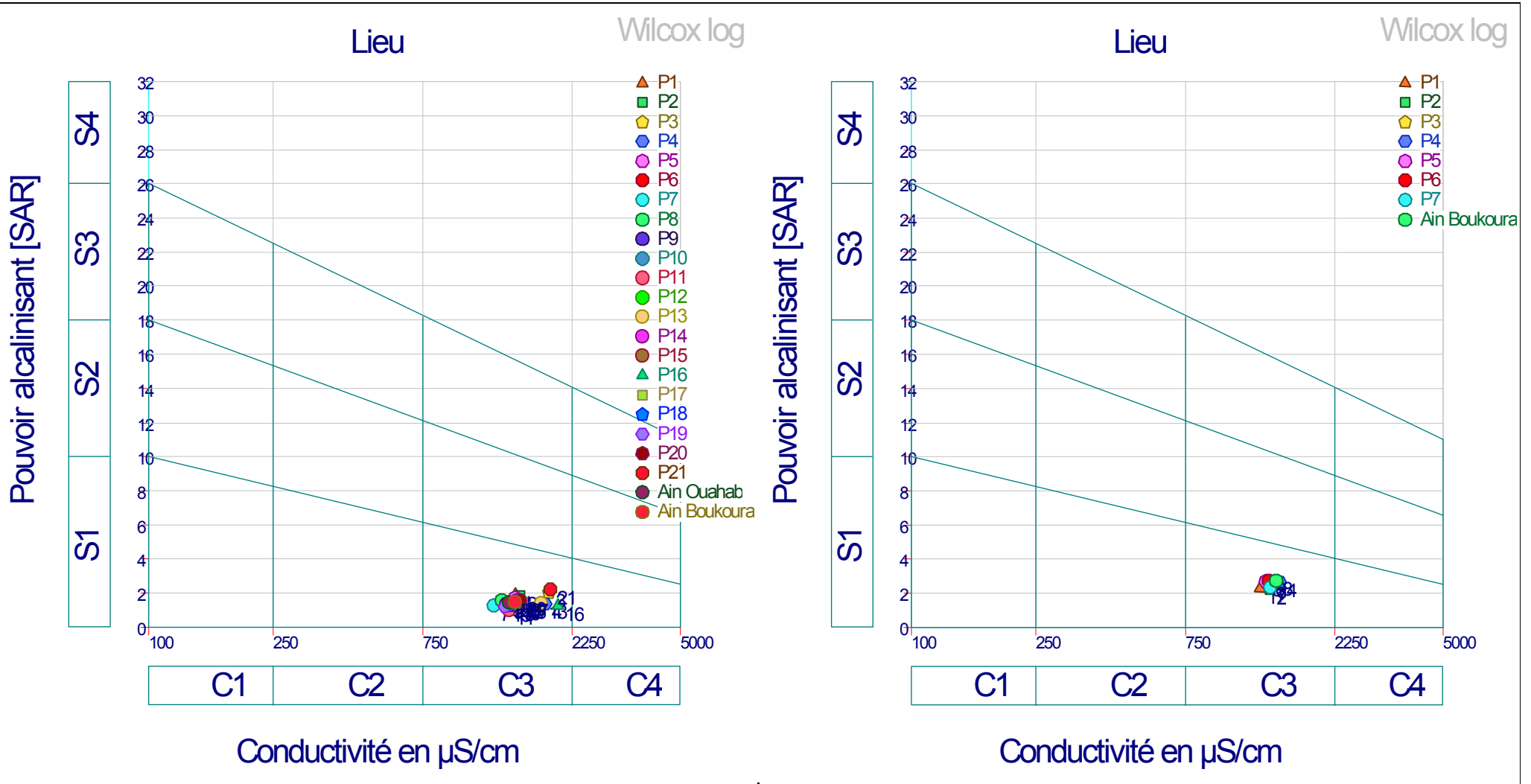
En général, c'est une classe, d'eau convenable à l'irrigation de cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.



(a) : Campagne 1981.

(b) : campagne 2011

Fig. 35– Diagramme de Wilcox.



(a) : Campagne 1981.

(b) : campagne 2011.

Fig. 36- Diagramme de richards.

IV. CARTOGRAPHIE HYDROCHIMIQUE : Cartes d'isovaleurs des indices d'irrigation.

L'observation de la répartition spatiale des différents indices d'irrigation des campagnes 1981 et celle de 2011, représentés successivement sur les figures suivantes (37 à 44) indiquent que pour :

- Indice d'échange de base IEB

Les valeurs de cet indice, augmente de l'amont vers l'aval de la plaine (Fig. 37), elles sont supérieures à 0 pour la campagne de 1981, indiquant que globalement les ions Na^+ et K^+ des eaux souterraines sont échangés contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} du terrain (probablement des formations marneuses), il pourrait y avoir aussi des phénomènes de re-concentration des chlorures, et de la consommation des Na^+ et K^+ par la végétation, dus à l'évapotranspiration.

Pour campagne 2011, à l'extrême sud de la plaine, les valeurs d'IEB deviennent inférieures à 0, nous supposons alors qu'au bout de 30 ans, l'élévation du niveau statique des eaux souterraines de la nappe d'aquifère gréseux de la plaine, mettant ces eaux plus en contact avec les argiles, argiles calcaires, et les graviers argileux, peut-être à l'origine des apports de cations dans l'eau et aussi de l'échange des ions calciques et magnésiens contre les ions sodiques et potassiques.

- Meteoric Genesis MG

Inversement à l'indice précédent, La variation spatiale (Fig. 38) montre que, les valeurs de cet indice diminues de l'amont vers l'aval, pour les deux campagnes, ($\text{MG} < 1$) indiquant ainsi une percolation profonde au sud à très profonde au Nord de la plaine.

- Conductivité électrique

Les teneurs de la conductivité électrique comme indice d'irrigation, montrent qu'en 1981, ils sont extrêmes au Sud et au Centre de la plaine avec des valeurs dépassant les 1750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 39- a) ; cette répartition à évoluer en 2011 pour virer vers des concentrations moins importants sur toute la surface de la plaine (Fig. 39- b).

- Chlorures

D'après la répartition spatiale de cet indice, nous remarquons que positivement la classe I (Eau bonne pour l'irrigation) présente une amélioration en 2011 qu'en 1981, en occupant une plus importante surface de la plaine de Hennaya. Le reste de la surface est occupée par une qualité admissible (Classe II) par rapport à cet indice.

- Sulfures

Globalement, toutes les eaux souterraines de la plaine d'Hennaya, présente une bonne très bonne qualité des eaux, de part, leurs concentrations comprises entre 0 et 192 mg/L de SO_4^{2-} , néanmoins, nous observons une augmentation des teneurs (peut atteindre deux fois plus la concentration), en campagnes de 2011 par rapport à celle de 1981.

- Kelly's Ratio KR

La répartition spatiale de cet indice, présente des teneurs supérieures à 0, qualifiant ces eaux comme bonnes pour l'irrigation, néanmoins sur la figure 42- b (Campagne 2011), les

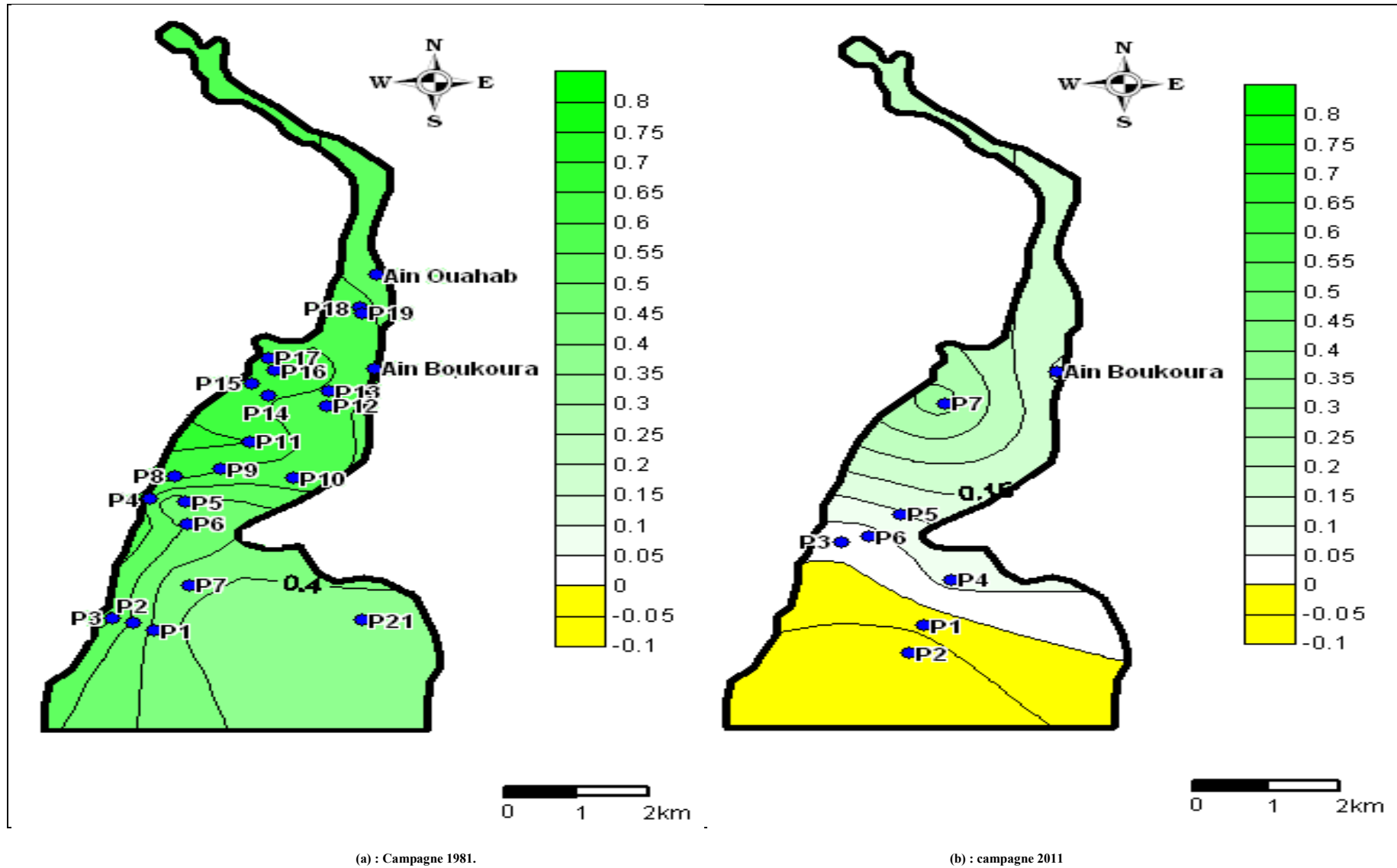
valeurs se rapprochent de 0 vers le Sud de la plaine, nécessitant une surveillance de l'augmentation des concentrations des Sodium, Calcium et Magnésium.

- **Magnesium Ratio MH**

Sur les cartes de la figure 43, nous observons une évolution la variation spatio-temporelle de la qualité des eaux à des fins d'irrigation pour cet indice : La bonne qualité, en 1981, s'observe au Sud, pour devenir plus au moins médiocre au Nord de la plaine, pour occuper en 2011, uniquement des surfaces réduites au centre de la plaine d'Hennaya.

- **Index de perméabilité PI**

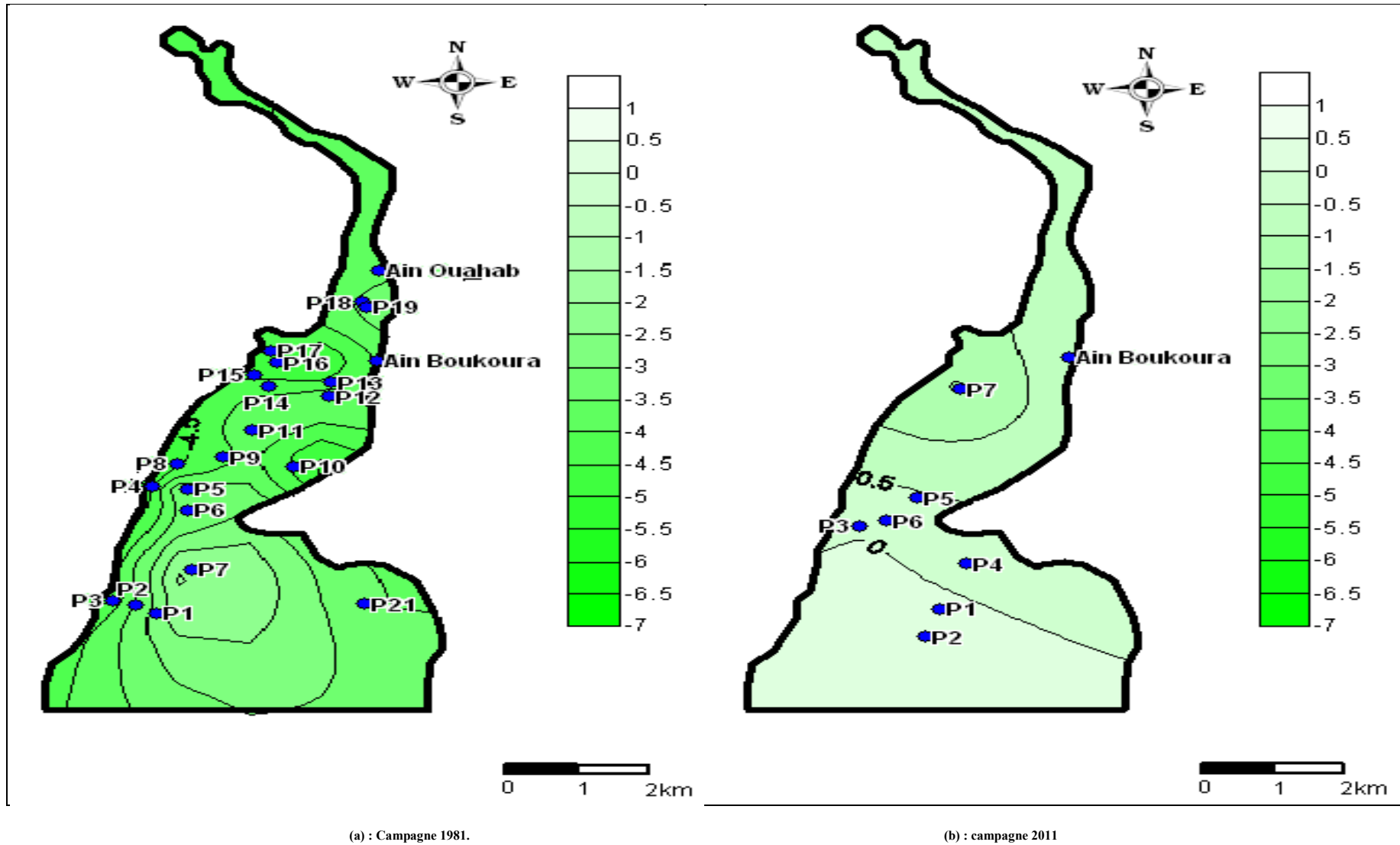
L'index de perméabilité prend en considération tous les cations majeurs des eaux souterraines, pour notre secteur d'étude, nous classons ses eaux souterraines en classe admissible pour l'irrigation (valeurs comprise entre 25 et 75%) (Fig. 44), mais nous observons aussi que ces pourcentages se rapprochent de 25% donc de la mauvaise qualité pour l'irrigation au centre pour 1981 et 2011.



(a) : Campagne 1981.

(b) : campagne 2011

Fig. 37– Variation spatiale d’IEB.



(a) : Campagne 1981.

(b) : campagne 2011

Fig.38– Variation spatiale de MG.

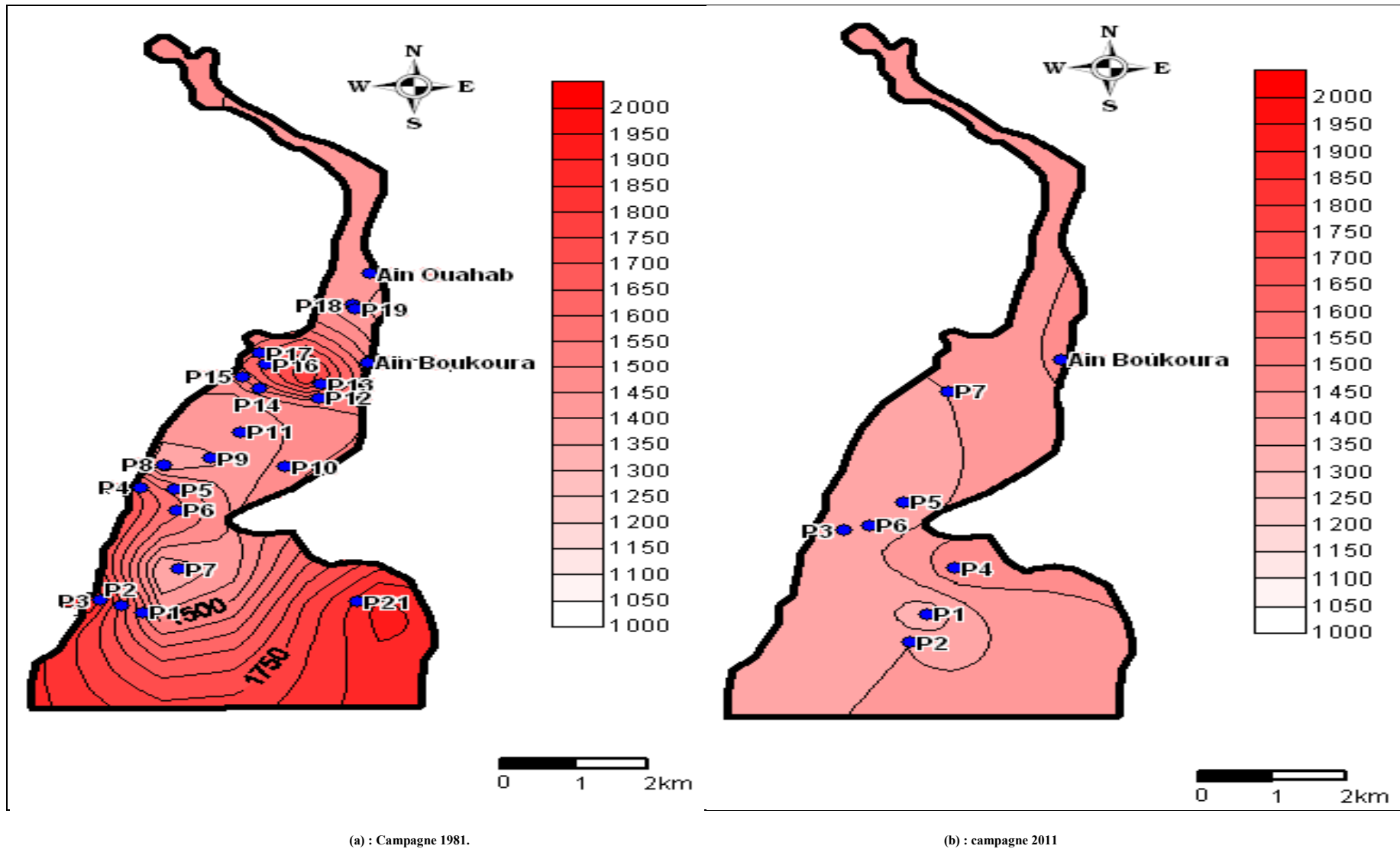


Fig.39– Variation spatiale de la conductivité.

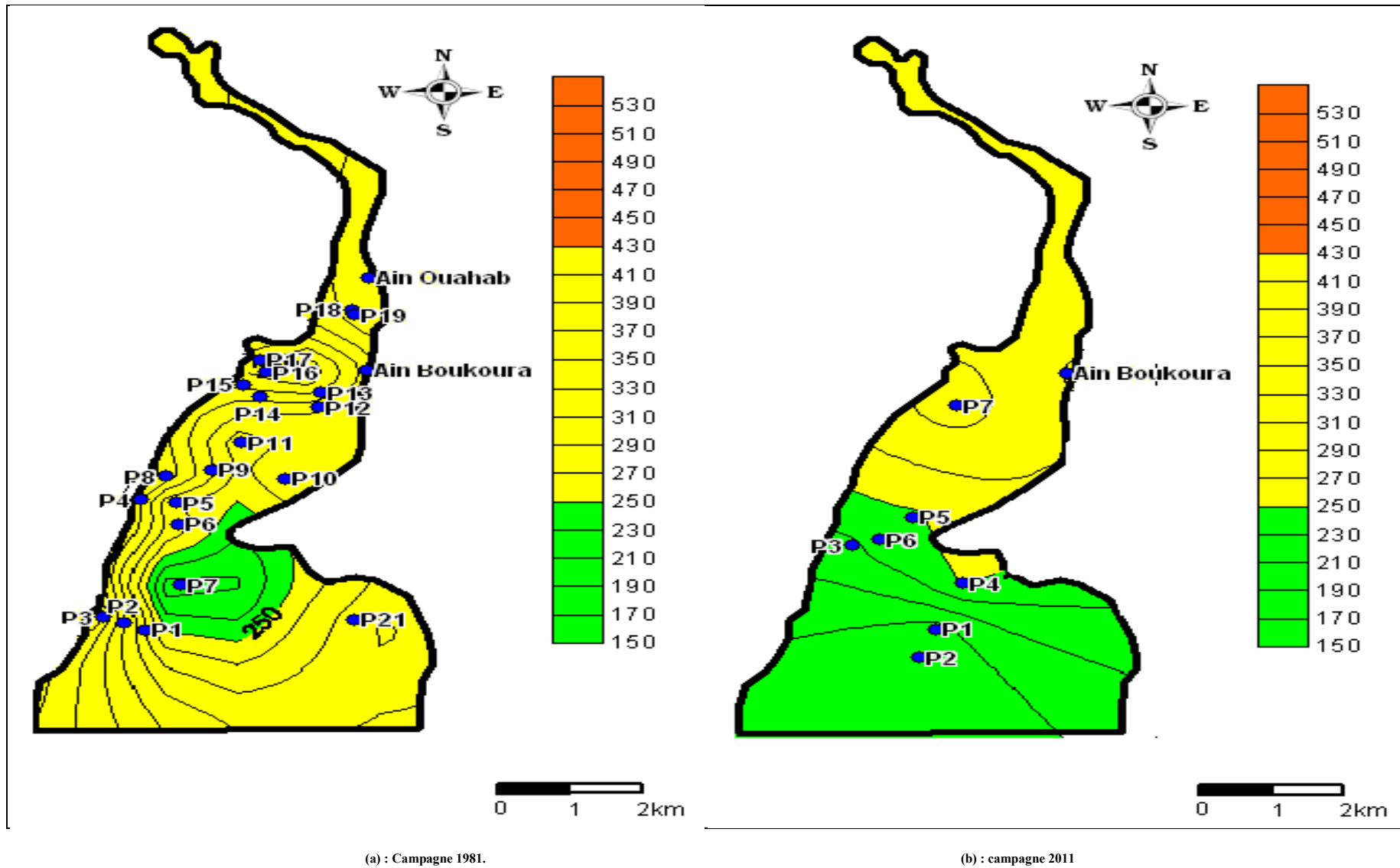


Fig.40- Variation spatiale des chlorures.

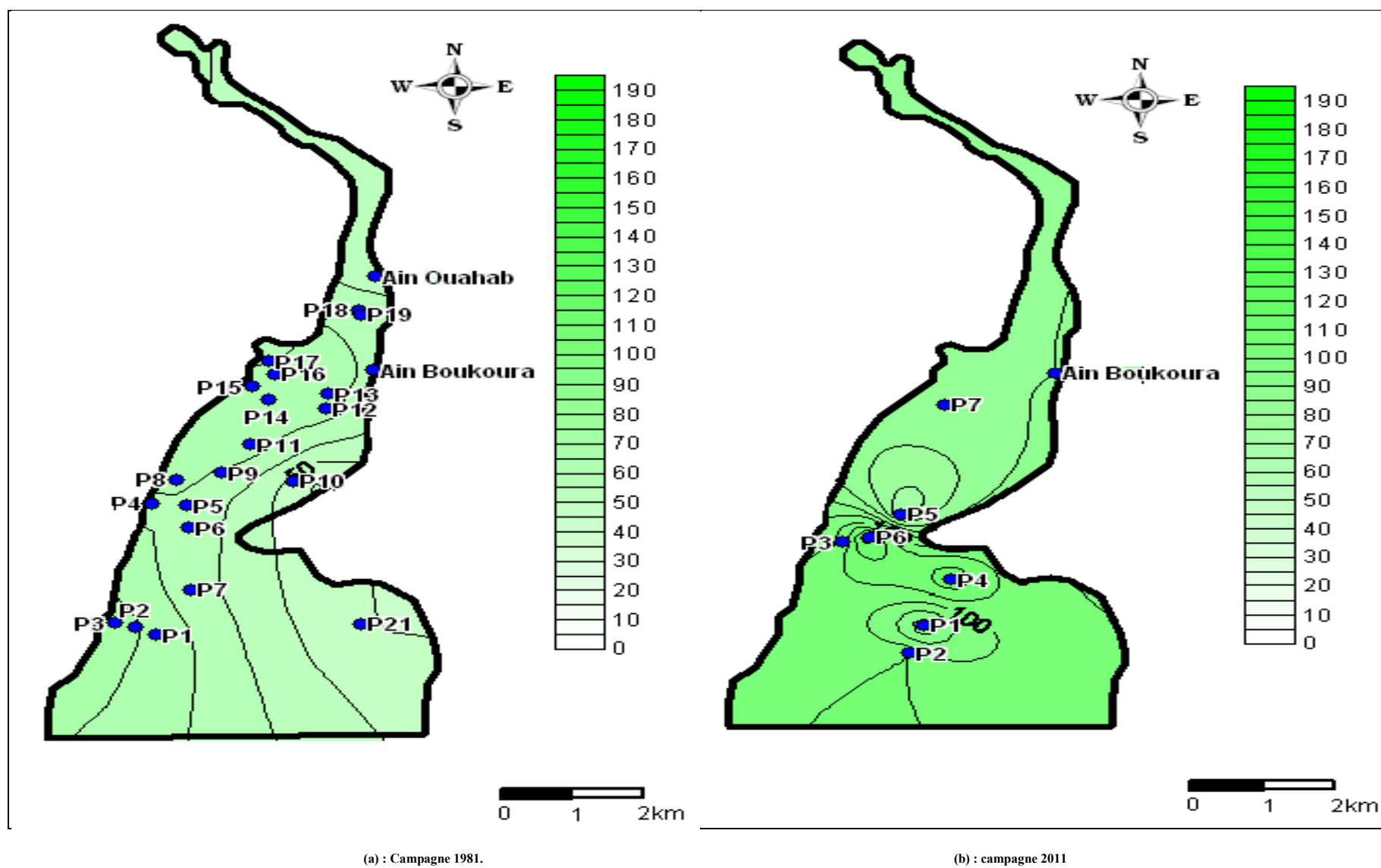
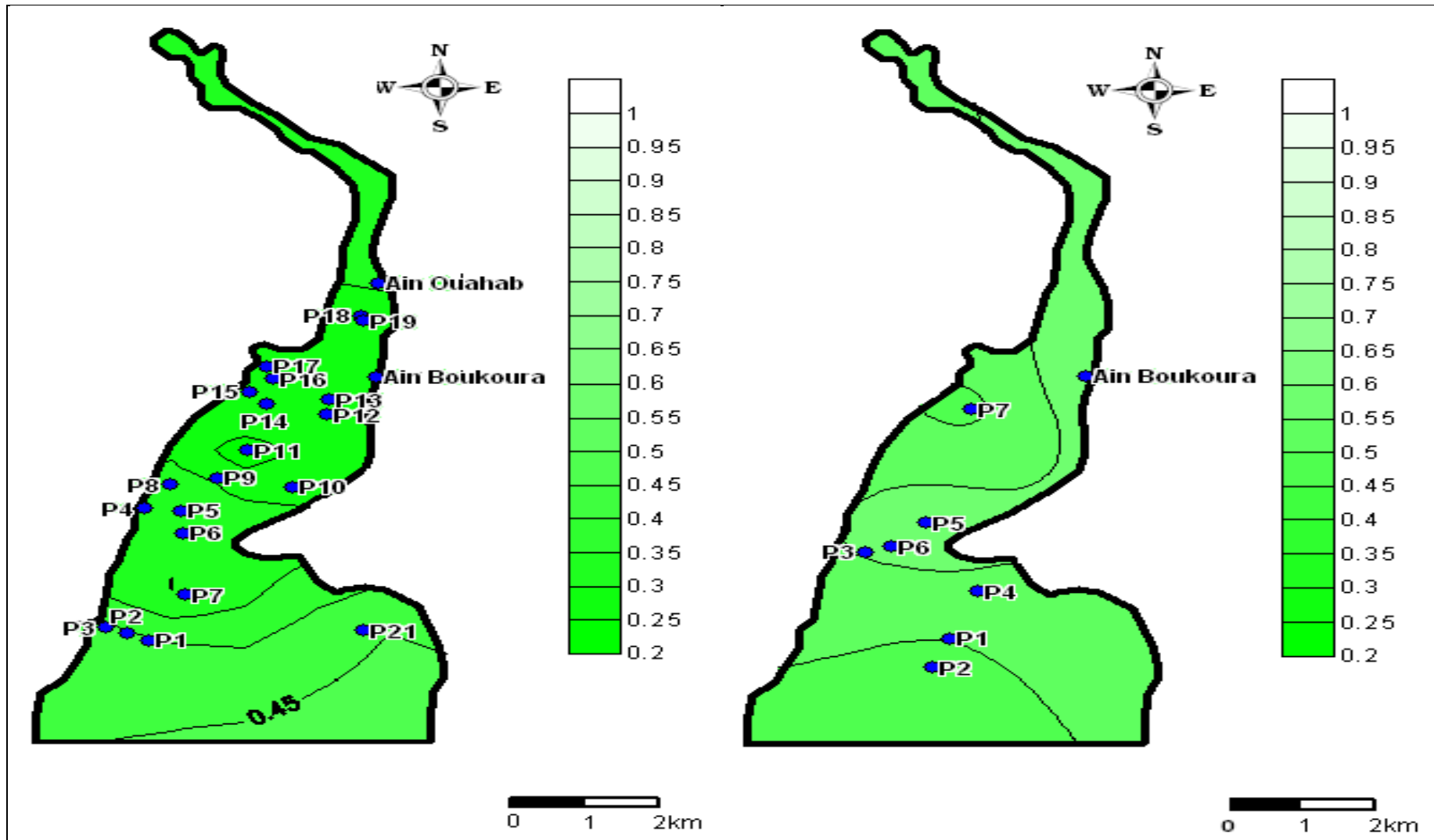


Fig.41- Variation spatiale des sulfates.



(a) : Campagne 1981.

(b) : campagne 2011

Fig.42– Variation spatiale de KR.

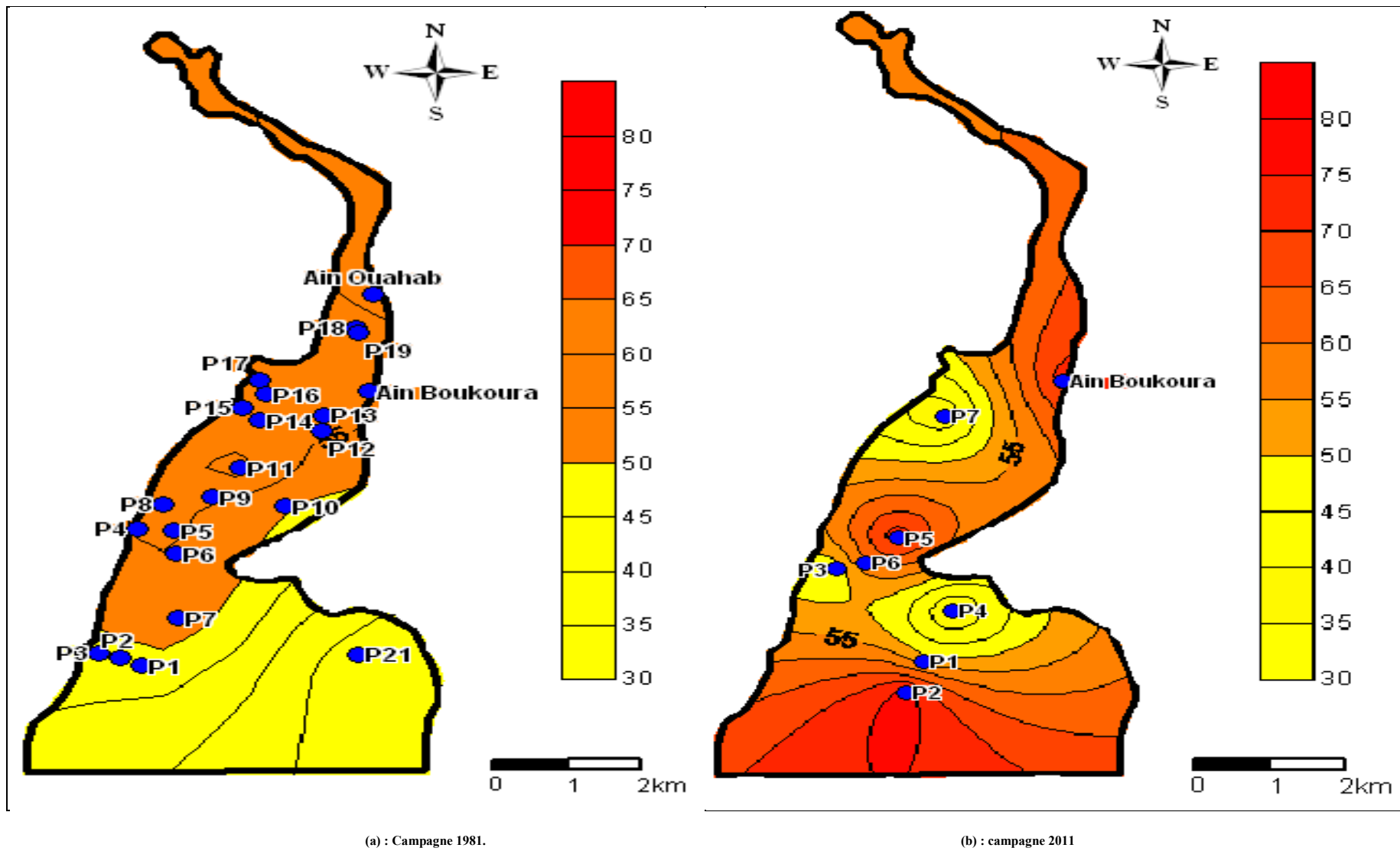
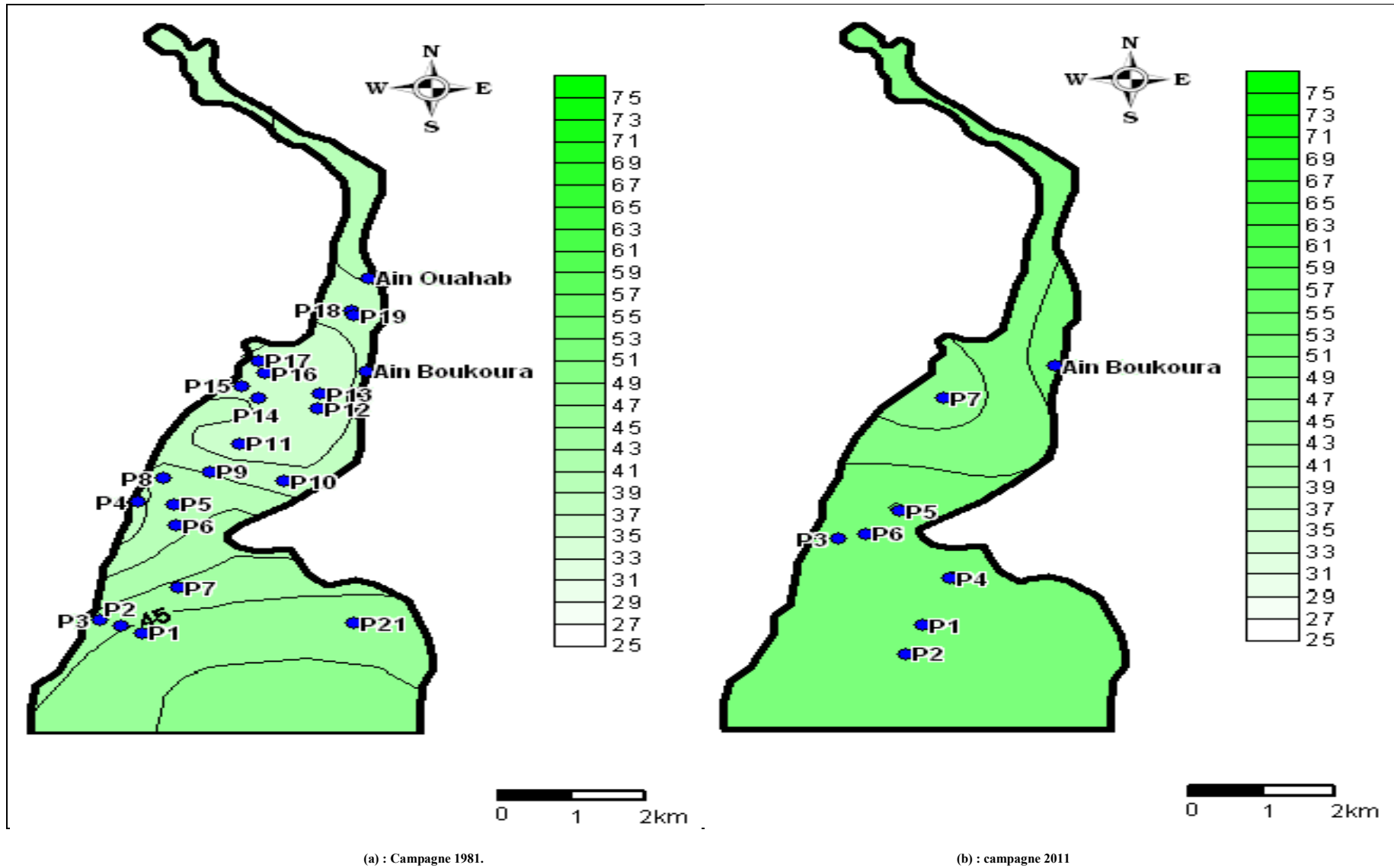


Fig.43- Variation spatiale de MH.



(a) : Campagne 1981.

(b) : campagne 2011

Fig.44– Variation spatiale de PI.

V. Conclusion

L'étude hydrochimique des eaux souterraines de l'aquifère de la plaine d'Hennaya montre que :

Les eaux sont d'une manière générale, bicarbonatées calciques et magnésiennes et chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes.

Du point de vu, qualitative, les eaux souterraines de la plaine d'étude, présentent des teneurs assez élevées pour quelques éléments chimiques analysés tels que le Calcium, le Magnésium, les Chlorures et les Bicarbonates, et cela pour les deux campagnes et dépassent largement les normes de potabilité fixées par l'organisation mondiale de la santé, présentant ainsi un réel danger pour la santé de la population de la région.

L'estimation de la qualité des eaux souterraines à des fins d'irrigation par l'utilisation de des indices tels que IEB, MG, pH, Conductivité, Chlorures, sulfates, KR, et bien d'autre ; démontre que les puits de la plaine d'Hennaya, pour les deux campagnes de 1981 et celle de 2011, se classent majoritairement dans les catégories (très bonne, bonne et admissible pour l'irrigation), et médiocre et mauvaise pour quelques indices et cela, aux niveaux de quelques puits répartis sur toute la plaine, limitant ainsi l'utilisation de leurs eaux.

L'établissement des cartes d'isovaleurs des indices d'irrigation pour les deux campagnes d'analyse, nous a permis de montrer que :

- D'après l'indice d'échange de base, globalement, en 1981, les ions Na^+ et K^+ des eaux souterraines sont échangés contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} du terrain (probablement des formations marneuses), il pourrait y avoir aussi des phénomènes de re-concentration des chlorures, et de la consommation des Na^+ et K^+ par la végétation, dus à l'évapotranspiration ; tandis qu'en 2011, à l'extrême sud de la plaine, les valeurs d'IEB deviennent inférieures à 0, ce qui nous laisse supposer qu'au bout de 30 ans, l'élévation du niveau statique des eaux souterraines de la nappe d'aquifère gréseux, mettant ces eaux plus en contact avec les argiles, argiles calcaires, et les graviers argileux, peut-être à l'origine des apports de cations dans l'eau et aussi de l'échange des ions calciques et magnésiens contre les ions sodiques et potassiques.
- Pour le MG, ses valeurs diminues de l'amont vers l'aval, pour les deux campagnes, indiquant une percolation profonde au sud à très profonde au Nord de la plaine ;
- Pour la conductivité électrique, et les chlorures comme indices d'irrigation, nous observons une amélioration de la qualité des eaux pour l'irrigation pour la campagne de 2011 par rapport à celle de 1981, inversement pour les sulfures, nous remarquons que ses concentrations sont en nette augmentation en 2011 qu'en 1981, nécessitant une surveillance permanente.
- Aussi le Magnésium Ratio, présente une détérioration de la qualité, observée au niveau de la campagne de 2011, seules deux petites surfaces au Sud-Est et au Nord-Ouest exposent de la bonne qualité.

Conclusion générale

L'essor rapide de l'étude de l'aptitude des eaux souterraines à des fins d'irrigation et l'élaboration des cartes spatio-temporelles, des indices d'irrigation joue un rôle important dans l'étude des classifications des nappes du point de vue qualitatif.

Notre étude a été faite sur la plaine de Hennaya afin de monter la disponibilité de la quantité et de la qualité de son eau. A cet égard, nous avons en premier lieu étudié le contexte géographique et climatique.

Elle est située au nord de la ville de Tlemcen, limitée à l'Est par Oued Sikkak, à l'Ouest par l'Oued Khallouf, au Nord par l'Oued Isser et au Sud par les terrains karstiques du jurassique supérieur. Cette plaine occupe une superficie de 28 km²

Selon les données, le climat de la plaine d'Hennaya est de type semi-aride, avec une température moyenne annuelle proche de 18°C et une moyenne des précipitations annuel d'environ 316,6 mm. Il est caractérisé par deux périodes : une humide s'étalant de la mi-octobre à la mi-avril, et une autre sèche dans les autres mois de l'année.

Le bilan hydrique montre que, L'évapotranspiration potentielle moyenne interannuelle a été évaluée à environ 794,5 mm. Cette valeur calculée représente environ deux fois la valeur de la moyenne des précipitations annuelles (316,6 mm).

En second lieu, on a fait une étude géologique et hydrogéologique qui nous a permis de mieux cerner la nature des formations de la plaine :

La plaine d'Hennaya renferme un aquifère alluvionnaire constitué des grès tortoniens au Sud et des conglomérats surmontés par les travertins et des graviers argileux au Nord, ils ont une capacité d'environ 22 millions m³ avec une épaisseur importante dans la partie centrale et plus faible on allant vers le Nord.

L'étude piézométrique de l'aquifère tortonien de la plaine d'Hennaya, a donné les conclusions suivantes :

- La recharge de la nappe s'effectue par une alimentation latéralement, par les dolomies de Tlemcen qui affleurent au Sud de la plaine d'Hennaya.
- La majorité des sources émergent dans les conglomérats, à l'exception de la source d'Hennaya qui émerge au niveau des grès tortoniens. La source d'Ain Boukoura avec un débit moyen (50L/s en 1981) est le principal exutoire de la nappe.
- le sens de l'écoulement se fait de manière général de Sud-Ouest vers le Nord-Est, et les courbes isopièzes sont plus espacées vers le Nord est plus rapprochées vers le Sud probablement lié à la perméabilité.
- La hauteur piézométrique varie entre 280 m et 365 m sur la carte piézométrique de juin 1981, et entre 295 m et 370 m pour celle de juin 2011. Soit une différence de charge hydraulique successive de 85 m et 75m, donc une différence de charge d'environ 10 m, soit près de 280 000 m³.

L'étude hydrochimique des eaux souterraines de l'aquifère de la plaine d'Hennaya montre que :

Les eaux sont d'une manière générale, bicarbonatées calciques et magnésiennes et chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes.

Qualitativement, les eaux souterraines de la plaine d'étude, présentent des teneurs assez élevées pour quelques éléments chimiques analysés tels que le Calcium, le Magnésium, les Chlorures et les Bicarbonates, et cela pour les deux campagnes et dépassent largement les normes de potabilité fixées par l'organisation mondiale de la santé, présentant ainsi un réel danger pour la santé de la population de la région.

L'estimation de la qualité des eaux souterraines à des fins d'irrigation par l'utilisation de des indices tels que IEB, MG, pH, Conductivité, Chlorures, sulfates, KR, et bien d'autre ; démontre que les puits de la plaine d'Hennaya, pour les deux campagnes de 1981 et celle de 2011, se classent majoritairement dans les catégories (très bonne, bonne et admissible pour l'irrigation), et médiocre et mauvaise pour quelques indices et cela, aux niveaux de quelques puits répartis sur toute la plaine, limitant ainsi l'utilisation de leurs eaux.

L'établissement des cartes d'isovaleurs des indices d'irrigation pour les deux campagnes d'analyse, nous a permis de montrer que :

- D'après l'indice d'échange de base, globalement, en 1981, les ions Na^+ et K^+ des eaux souterraines sont échangés contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} du terrain (probablement des formations marneuses), il pourrait y avoir aussi des phénomènes de re-concentration des chlorures, et de la consommation des Na^+ et K^+ par la végétation, dus à l'évapotranspiration ; tandis qu'en 2011, à l'extrême sud de la plaine, les valeurs d'IEB deviennent inférieures à 0, ce qui nous laisse supposer qu'au bout de 30 ans, l'élévation du niveau statique des eaux souterraines de la nappe d'aquifère gréseux, mettant ces eaux plus en contact avec les argiles, argiles calcaires, et les graviers argileux, peut-être à l'origine des apports de cations dans l'eau et aussi de l'échange des ions calciques et magnésiens contre les ions sodiques et potassiques.
- Pour le MG, ses valeurs diminues de l'amont vers l'aval, pour les deux campagnes, indiquant une percolation profonde au sud à très profonde au Nord de la plaine ;
- Pour la conductivité électrique, et les chlorures comme indices d'irrigation, nous observons une amélioration de la qualité des eaux pour l'irrigation pour la campagne de 2011 par rapport à celle de 1981, inversement pour les sulfures, nous remarquons que ses concentrations sont en nette augmentation en 2011 qu'en 1981, nécessitant une surveillance permanente.
- Aussi le Magnésium Ratio, présente une détérioration de la qualité, observée au niveau de la campagne de 2011, seules deux petites surfaces au Sud-Est et au Nord-Ouest exposent de la bonne qualité.

Recommandation :

Les recommandations ci-dessous visent à élucider certains problèmes qui ont été observés, à préciser les incertitudes résultant de l'étude actuelle et à proposer des interventions en conséquence :

- Faire de nouvelles campagnes d'analyse chimique sur un maximum de points d'eau de la nappe aquifère gréseux tortonien, et aussi sur les eaux de surfaces de la plaine, sur des périodes temporelles variées, afin d'actualiser les données chimiques, dans l'objectif de suivre l'évolution spatio-temporelle de la qualité des eaux souterraines et superficielles de la plaine,

- Essayer de détecter par analyse chimique, d'autres éléments chimiques, indicateurs de pollution agricole, tels que : les nitrates, l'Ammonium, les phosphates, ...ets, afin de confirmer l'hypothèse de la contamination chimique.
- Réaliser une étude de modélisation hydro-dispersive des écoulements souterrains pour connaître les mécanismes de transfert des polluants, ce qui peut beaucoup aider à la protection de la nappe contre toute forme de pollution.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALI BELHADJ Y. & CHOUAKI A., 2013 : Applications de quelques traitements statistiques aux données hydrochimiques des eaux de la nappe alluviale de la plaine de Maghnia (Nord-Ouest Algérien). Mém. Ing.Univ. Tlemcen. Algérie.

BEMMOUSSAT A., 2012 : Impacte de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines à travers le bassin versant de la Tafna. Mém. Mag.enHydrolique. Univ. Tlemcen. Algérie. p4-93.

BENSEDJAD A., 2011: Aptitude des eaux de la plaine de Sidi Bel Abbas à des fins d'irrigation.Mém. Ing. Univ. Tlemcen. Algérie. p23-45.

BOUABID A., 2013 : Étude hydrogéologiques du bassin de Droh à partir de la bordure maastrichtienne de Tighanimine(Bassin versant de Oued Labiod Aval-Région des Aurès). Mém. Mag. Géologie. Univ. Batna. Algérie. p 50-133.

BOURBABA L., TORCHI M., 2014 : Application de quelques traitements statistiques aux données physico-chimiques des eaux la nappe alluviale de la plaine d'Hennaya (NW ALGERIE).Mém.Ing.Univ. Tlemcen.Algérie.p10-74.

BRINIS N., 2011 : Caractérisation de la salinité d'un complexe aquifère en zone aride : cas de l'aquifère d'El-Outayaregion Nord-Ouest de Biskra. Algérie. Th. Doc. Univ. Biskra. Algérie. p51-91.

CASTANY G., 2000 : Hydrogéologie Principes et méthodes. 2^e Cycle. Livre. Univ. Pierre et Marie Curie. Paris. France. 236P.

CHEKOUKI Z., BELGUERNA A. 2012 : Inventaire des points d'eau de l'Ouest d'Hennaya et leurs qualités physico-chimiques (NW Algérie).Mém. Ing. Univ. Tlemcen. Algérie. p4-74.

Dastes. D.F., 2004. article bilan hydrique ; Hyperrgé, Français- Relation Sociétés/ Environnement.

Définition Acto environnement. 2003. (définition de la transmissivité),articleSarleCo-Giterra ,Société éditrice de Actu-Environnement, Dont le siège, 167 rue de Chevaleret, Paris.

Glossaire internationale d'hydrogéologie. 1974. (Définition de la perméabilité).

GOUAIDIA L., 2008 : Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Mekiana Nord-Est Algérie. Th. Doc. Univ. Annaba. Algérie. 128P.

HAYANE S. M., 1983 : Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'Oued Sikkak (région de Tlemcen). Th. doc. 3 Cycle. Univ. Oran. Algérie. 236P.

KERZABI R., 2008 : Identification de l'aquifère des grès Serravaliens du bassin Miocène dans la region de Remchi – Hennaya- Bensekrane et Ouled Mimoun. Mém. Mag. Univ. Tlemcen. Algérie. 60P.

RODIER J., LEGUBE B., MERLET N., et Coll., 2009 : L'analyse de l'eau. 9 èmeedition, Ed DUNOD, Paris, France. 159P.

WHO, 2011: Guidelines for Drinking-Water Quality. World Health Organisation, Fourth Edition, WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 541P.

YAHIAOUI F., 2007 : L'utilisation de l'approche géostatistique dans l'étude hydrogéologique de la plaine d'Hennaya. Mém. Ing. Univ. Tlemcen. Algérie. p4- 29.

YOUSFI S., 2004 : Essai de modélisation de l'approche géostatistique dans l'étude hydrogéologique de la plaine d'Hennaya. Mém. Ing en géologie. Univ. Tlemcen. Algérie. 61P.

ZAIDI M., 2012 : Actualisation de l'étude hydrogeologique et hydrochimique de la region d'Ain Skhouna – Willaya de Saida. Mém. Mas. Univ. Tlemcen. Algérie. 40P.

Annexe I

Tab.01-Précipitations moyennes mensuelles de la station de Zenâta.

année	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
1980-1981	10	40	41	51	0	0	0	0	0	0	0	0
1981-1982	0	0	0	0	0,5	12,95	7,11	16,25	36,84	2,28	1,02	3,3
1982-1983	0,76	24,38	109,47	79,26	0	27,3	13	28	7,61	0	0,25	0,25
1983-1984	0,5	0	16,9	59,94	49,03	24,39	22,09	2,8	101,85	4,56	0	0
1984-1985	10,41	2,03	65,53	5,84	38,68	14,6	27,68	28,45	37,59	0	0	0
1985-1986	6,86	0	31,71	22,37	44,21	97,79	91,19	29,98	5,58	1,27	0	4,07
1986-1987	20,57	49,79	132,08	27,17	89,17	106,16	6,1	105,76	19,56	0,25	8,88	3,81
1987-1988	6,43	125,47	16	8,64	53,6	31,75	3,81	26,16	20,57	12,2	1,02	0
1988-1989	18,28	16,51	14,23	3,05	20,82	41,41	107,96	53,6	17,76	5,84	0,51	6,61
1989-1990	17,53	4,57	35,32	15,25	95,51	1,27	27,18	77,21	11,8	4,82	2,03	0,51
1990-1991	19,07	7,87	42,68	42,92	37,33	54,86	112	9,89	8,13	0	0,76	0,51
1991-1992	3,55	35,82	17,53	21,85	4,57	18,79	80,54	30,24	47,75	55,13	4,57	0,25
1992-1993	1,02	13,72	21,34	14,98	1,02	57,65	40,13	33,26	54,6	0	0	257,3
1993-1994	7,62	9,15	72,14	8,89	77,98	35,81	3,3	109,99	19,56	0	4,06	7,11
1994-1995	8,65	13,97	39,12	22,62	14,48	33,53	151,38	20,07	0,76	2,28	0	0
1995-1996	12,26	10,68	13,21	58,8	53,36	83,56	37,09	25,39	17,43	1,02	1,02	0,51
1996-1997	36,07	21,6	0,25	38,35	109,22	0	1,02	43,7	12,96	5,09	2,54	12,7
1997-1998	40,67	21,08	56,64	29,72	33,54	35,06	26,17	28,21	68,32	1,02	2,03	3,56
1998-1999	9,15	2,28	40,49	0,51	0	0	77,7	0	0	0	0	0
1999-2000	0	17,27	63,24	76,96	0	0	10,16	21,59	24,13	0	0	1,02
2000-2001	5,08	60,2	72,9	30,22	72,38	46,24	16	1,02	3,06	0	0	0,76
2001-2002	17,75	18,8	142,98	27,94	3,05	4,07	17,53	42,16	58,42	0	2,29	62,74
2002-2003	0	14,48	69,08	27,43	88,15	79	18,04	20,31	15,49	2,54	1,02	0
2003-2004	8,89	58,16	51,05	99,06	19,05	28,45	66,55	25,91	53,86	4,57	0,76	2,03
2004-2005	8,38	28,19	51,06	73,42	22,1	55,38	49,02	12,96	0,51	0,76	0	0
2005-2006	25,15	5,08	5,08	6,61	37,6	53,33	22,35	8,12	24,39	3,05	0,51	3,05
2006-2007	17,04	13,2	8,63	35,05	16,76	21,89	33,78	92,2	4,06	0	0	0,76
2007-2008	11,94	55,87	58,16	8,12	18,03	27,18	16,76	13,21	33,02	2,54	0	0
2008-2009	32,24	107,18	73,67	104,66	111,27	44,2	13	44,46	6,1	2,04	0	0
2009-2010	91,94	2,03	12,45	40,41	55,63	36,38	69,09	28,19	17,53	14,48	0,51	14,73
2010-2011	5,58	61,2	24,39	42,43	26,16	30,98	38,6	62,23	58,42	17,69	0	3,05
2011-2012	3,05	47,24	69,08	28,96	20,57	43,69	23,11	32,27	8,89	1,02	4,06	0
2012-2013	36,83	36,07	132,86	19,81	100,07	39,12	65,53	66,82	46,47	0	0,76	0,5
2013-2014	18,29	0	52,58	84,1	53,07	52,81	33,28	6,1	17,27	12,7	0	0,25

Tab.2- Températures moyennes mensuelles de la station de Zenâta.

année	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
1980-1981	21	17,6	13,2	8,4	8,5	10,8	14,3	14,5	17,3	21,4	23,12	23,8
1981-1982	22,7	20	15,2	14,2	11,8	11,5	13,6	14,1	17,7	23,4	25,7	25,2
1982-1983	22,5	17,2	13,9	9,6	8,4	9,7	13,9	15,4	17,6	22,8	24	24
1983-1984	24,2	20	16,4	11,3	9,6	10,1	11,6	16,2	15,4	20	25,6	24
1984-1985	23,4	17	15,2	12,2	9,2	13,7	11,3	15,8	17	22,3	25,3	25,5
1985-1986	23,9	19,3	15,9	11,6	10,5	11,4	12,3	12,8	18,8	21,1	25,2	26,5
1986-1987	23	19,1	13,5	10,5	10,3	11,5	13,14	16,8	18,2	22,3	24,2	25,4
1987-1988	24,4	19,5	14,3	12,9	12,1	11,1	14	16,2	18,1	20,9	24,9	26,9
1988-1989	22,7	20	15,7	9,5	9,8	11,7	13,4	14,5	18	21,8	26,8	27,8
1989-1990	23,2	20	16,8	15	10,1	12,9	14,4	14,6	18,8	22,8	26,1	26,5
1990-1991	26,4	19,2	14,1	10,3	8,9	10	12,5	13,7	16,8	21,8	26,1	27,5
1991-1992	24,5	17,3	13,4	10,6	8,9	10,8	12,3	15,7	18,9	19,5	24,6	26,8
1992-1993	23	17,7	13,8	11,7	8,8	10,2	13,8	15,4	17,5	21,5	24,9	26,2
1993-1994	21,1	17,5	14,3	11,1	10	11,4	13,5	14,8	19,5	22,6	28,2	27,8
1994-1995	22,3	19,6	15,6	11,7	10,9	12,9	13,7	15,3	20	27,7	25,4	26,3
1995-1996	21,5	20	17	14,3	13,6	11	13	15,4	18,1	22,9	25,1	24,9
1996-1997	21	17,3	15,3	13,4	12,3	12,3	13,6	16,8	19,1	22,4	23,4	24,7
1997-1998	23,2	20,5	15,9	12,6	11,5	12,9	13,8	15,2	17,3	23	25,8	26,6
1998-1999	23,7	17,7	14,5	10,3	11,1	10,1	13,2	15,8	19,9	23	25,8	26,8
1999-2000	23,1	20,6	13,1	11	8,7	12,9	13,7	15,5	19,6	24,1	26,1	26,4
2000-2001	23,3	17,8	14,3	13	12,1	11,5	15,8	16,2	18,7	24,8	26	26,6
2001-2002	23,2	21,5	13,3	10,9	10,4	11,9	14,2	15,6	18,4	22,9	25,3	25
2002-2003	22,7	18,8	15,5	13	10,1	10,5	14	15,2	19,1	24,6	27,1	27,2
2003-2004	23,2	18,8	14,6	11,4	11,2	12,3	12,6	14,4	16,7	23,2	26,2	27,1
2004-2005	23,8	20,4	12,8	10,4	7,3	8,3	12,8	14,9	20	23,4	26,1	26
2005-2006	22,1	19,5	17,2	10,7	9,3	10,5	14,2	17	20,1	22,4	27,1	26,1
2006-2007	23	20,7	16,2	11,4	10,4	13,3	12,7	14,4	19,1	22,2	25,5	25,9
2007-2008	22,7	18,6	13,6	10,6	11	12,3	13,7	16,9	18	22,7	26,5	26,6
2008-2009	23,4	19,3	12,4	9,7	10,3	10,6	19,81	14,1	19,5	23,8	27,6	25,9
2009-2010	22,1	20	16,9	13,8	12,1	13,6	13,7	16,3	18,7	22,2	26,6	27
2010-2011	23,7	18,3	14,2	12,8	10,8	10,6	13,3	17,5	19,9	23,4	26,3	27,2
2011-2012	23,2	19,3	14,8	10,5	8,8	8,2	12,1	14,5	20	24,9	26,3	28,4
2012-2013	23,5	19,9	15,3	11,5	11,1	10,2	13,8	14,6	17,2	20,7	24,4	25,9
2013-2014	22,9	20,7	13,3	10,6	11,5	12,1	12,6	16,8	19	22,7	24,7	26,3

Annexe II

Tab.03-Piézométrie de la plaine d'Hennaya (campagne, 1981).

Puits	X (m)	Y (m)	N.P (m)
P1	127,7	193,1	354
P2	127,4	193,25	349,85
P3	127,1	193,35	354,62
P4	127,65	195,7	317,9
P5	128,125	195,65	321,2
P6	128,15	195,225	326,7
P7	128,2	194	331,15
P8	128	196,175	313
P9	128,65	196,3	318,18
P10	129,65	196,125	306,82
P11	129,05	196,85	309,78
P12	130,15	197,55	297,35
P13	130,175	197,835	302,3
P14	129,3	197,75	301,65
P15	129,075	198	299,92
P16	129,4	198,25	297,06
P17	129,3	198,5	297,02
P18	130,6	199,5	279,92
P19	130,65	199,4	278,45
P21	130,65	193,3	363,21
Ain Boukoura	130,77	198,34	
Ain Ouahab	130,85	200,15	

Tab.04- Piézométrie de la plaine d'Hennaya (campagne, 2011).

Puits	X(m)	Y (m)	N.P (m)
P1	128,9	193,18	350
P2	128,68	192,61	370
P3	127,74	194,88	327
P4	129,29	194,11	334
P5	128,57	195,45	325
P6	128,12	194,99	327
P7	129,19	197,69	298
Ain Boukoura	130,77	198,34	

Annexe III

Tab.05-Résultats des Analyses chimiques des eaux de la plaine d'Hennaya(Campagne, 1981).

point d'eau	TH (°c)	PH	CON (µs/cm)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	BI
P1	18,5	7,5	1488	110	62	101	1	270	414	64	2,17
P2	18,5	7,4	1537	118	65	103	1	284	408	65	0,78
P3	19	7,4	1906	130	69	117	1	412	378	69	5
P4	19	7,6	1845	140	95	87	3	412	341	56	0,91
P5	19	7,6	1476	92	74	92	2	227	330	60	6,16
P6	19	7,3	1538	105	77	89	3	270	402	60	0,29
P7	18,5	7,3	1267	92	67	67	13	170	470	57	2,18
P8	19	7,8	1341	95	74	85	5	340	305	62	4,12
P9	18,5	7,4	1389	102	74	75	1	271	366	62	1,35
P10	18,5	7,4	1476	126	75	77	1	298	396	43	0,37
P11	19	7,5	1414	86	85	57	1	255	366	63	2,24
P12	18,5	7,5	1500	112	83	82	1	284	280	63	7,27
P13	19,5	7,4	1799	110	89	83	1	308	390	60	0,63
P14	19	7,6	1500	107	79	88	2	326	310	61	0,71
P15	19	7,5	1537	114	86	81	1	341	317	62	0,91
P16	19	7,6	2029	154	106	84	2	525	290	70	1,98
P17	19	7,5	1568	106	84	86	1	305	317	57	3,43
P18	19	7,4	1414	100	80	72	1	270	342	62	1,00
P19	19	7,4	1377	106	81	69	1	241	390	61	2,02
P21	19	7,2	1928	171	44	127	1	312	451	45	1,77
Ain Ouahab	19	7,6	1414	104	72	80	1	260	325	51	3,40
Ain Boukoura	19,5	7,5	1476	105	89	86	1	298	366	59	2,44

Tab.06- Résultats des Analyses chimiques des eaux de la plaine d'Hennaya
(Campagne, 2011).

point d'eau	PH	CON (μ s/cm)	Ca ² (mg/L)	Mg ² (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Cl (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	BI
P1	7,26	1300	100	65	120	2	180	500	85	2,11
P2	7,25	1400	50	100	120	5	175	550	105	0,14
P3	7,22	1400	120	62	142	3	225	530	100	0,89
P4	7,18	1500	160	49	150	4	252	530	115	1,42
P5	7,18	1350	55	95	142	4	246	480	70	2,07
P6	7,18	1380	95	85	152	4	245	500	120	2,62
P7	7,21	1400	150	50	130	2	300	380	85	2,72
Ain Boukoura	7,24	1460	60	95	147	4	268	420	85	3,59

RESUME

La plaine d'Hennaya, située au nord de la ville de Tlemcen, caractérisée par un climat semi- aride, possède actuellement des ressources hydriques relativement limitées, à savoir uniquement les eaux souterraines de la nappe Mio-Plio-Quaternaire, alimentée latéralement par les dolomies de Tlemcen. Ces dernières années, un essor agricole, a eu lieu, ce qui a entraîné, d'une part, l'accroissement des besoins en eaux et a provoqué, d'autre part, la dégradation de la qualité des eaux.

Le choix de ce thème a été guidé par le souci d'évaluer la variation spatiale et temporelle de la qualité de ces eaux souterraines, à des fins d'irrigation.

Les eaux souterraines de la plaine d'étude, présentent des concentrations assez élevées pour quelques éléments chimiques analysés tels que le Calcium, le Magnésium, les Chlorures et les Bicarbonates, et cela pour les deux campagnes d'analyse (1981 et 2011) et dépassent largement les normes de potabilité fixées par l'OMS.

L'estimation de la qualité des eaux souterraines à des fins d'irrigation par l'utilisation de des indices (IEB, MG, PI, KR, MH, N%, Wilcox,...); démontre que les puits de la plaine d'Hennaya, pour les deux campagnes, se classent majoritairement dans les catégories (très bonne, bonne et admissible pour l'irrigation).

Une amélioration de la qualité des eaux pour l'irrigation est observée sur les cartes isvaleurs, pour la campagne de 2011, pour la Conductivité et les chlorures, comme indice d'irrigation, tandis qu'une détérioration pour d'autres indices, tels que les sulfates et les MR, nécessitant une surveillance permanente des éléments chimiques concernés.

Mots clés : Eau souterraine, Cartes, Isovaleurs ; Evaluation, Qualité, Irrigation, indices.

ABSTRACT

The plain Hennaya, located in the north of Tlemcen city, characterized by the semi-arid climate, whose current hydrous resources are relatively limited consist of underground water of the Mio-Plio-Quaternary aquifer, laterally driven by Tlemcen's dolomites. In recent years a high level of water demand was felt due to remarkable increase water for agriculture use. On one hand, this has induced a shortage of water and a deterioration of its quality on the other.

This research project comes to shed more light on the spatial and temporal variation in the quality of groundwater for irrigation purposes.

Groundwater in the study plain, have fairly high concentrations analyzed for some chemical elements such as Calcium, Magnesium, the chlorides and bicarbonates, and this for both analytical field excursions (1981 and 2011) and exceed the drinking water standards set by WHO .

The estimation of the quality of groundwater for irrigation by the use of indices (IEB , MG , PI, KR , MH, N% , Wilcox , ...) demonstrates that the wells of the plain Hennaya for both field excursions is classified into categories (very good, good and qualifies for irrigation).

An improvement of water quality for irrigation is noted on iso-values maps for the 2011 field excursion, for the conductivity and chlorides, as irrigation index, while deterioration for other indexes, such as, sulfates and MR, requiring constant monitoring of chemical elements involved.

Keywords: Groundwater, maps, Isovalues; Evaluation, Quality, Irrigation, indexes.

تلخيص :

سهل الحناية، الذي يقع في شمال مدينة تلمسان، يتميز بمناخ شبه جاف و يمتلك في الوقت الحالي موارد مائية محدودة نسبيا و منها المياه الجوفية. طبقة المياه الجوفية لسهل الحناية تتميز بملء سلسلة متواصلة من الرواسب ذات الحقبية الزمنية ميو بليو كواترنار حيث يتم تغذيته جانبيا عبر السلاسل الجبلية لتلمسان، في السنوات الأخيرة، تزايد النمو الفلاحي أدى إلى ارتفاع للاحتياج للمياه من جهة و من جهة اخرى إلى تدهور نوعية المياه.

اختيار هذا الموضوع، موجه بتقييم التغيرات في الموقع و الزمن لجودة المياه للاستعمال الفلاحي.

لقد تبين بأن مياه سهل الحناية، تحتوي على عناصر كيميائية تتميز بتركيز عالي و منها " الكالسيوم، المغنيزيوم " و ذلك في السنتين 1981 و 2011 ، حيث تتجاوز معيار الصلاحية للشرب "OMS".

تقدير مدى ملائمة المياه في أغراض الري بواسطة عدة مؤشرات " IEB، MG،PI،..... " تبين بأن مياه سهل الحناية في السنتين 1981 و 2011، تصنف في فئة جيد و مقبولة للاستعمال الفلاحي.

نلاحظ تحسن واضح في نوعية المياه للاستعمال الفلاحي في الخرائط لسنة 2011 لمؤشرات " الناقلية الكهربائية و الكلور " و تدهور لمؤشرات " MH , SO4²⁻ " التي تتطلب مراقبة متواصلة للعناصر كيميائية المعنية.

الكلمات المفتاحية : سهل، المياه الجوفية، ميو بليو كواترنار، نوعية ، الري ، SAR, Na%, MHPI, KR,