



Faculté des Sciences de la Terre

Département de Géologie

ANNÉE 2015

THÈSE

PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT EN
SCIENCES

**Mécanismes de transfert des polluants
métalliques dans la vallée de la Meboudja
(W. d'Annaba)**

Option

Hydrogéologie

Par

BOUGHERIRA NABIL

(Ingénieur d'Etat en Hydrogéologie, Magister en Hydrogéologie)

DIRECTEUR DE THÈSE :

M. HANI Azzedine

Professeur (U.B.M. Annaba)

DEVANT LE JURY

PRESIDENT :

M. DJABRI Larbi

Professeur (U.B.M. Annaba)

EXAMINATEURS :

M. BAALI Fethi

Professeur (U. Tébessa)

M. ALAYAT Hacène

MC A (U. El Tarf)

M. BENHAMZA Moussa

MC A (U.B.M. Annaba)

M. FEHDI Chemseddine

MC A (U. Tébessa)

REMERCIEMENTS

Au terme de cette thèse, je tiens en premier lieu à exprimer ma profonde gratitude, à **ALLAH** qui m'a facilité le travail et m'a donné de la volonté, du courage et de la patience pour arriver à mener à bien ce travail.

Je remercie profondément mon directeur de thèse le Professeur Azzedine HANI, je suis très reconnaissant de m'avoir formé, orienté et conseillé, merci pour votre gentillesse et votre sympathie.

Merci à toutes les personnes qui m'ont été pour un énorme soutien : Pr. Larbi DJABRI d'avoir accepté de présider le jury de la soutenance ; qui m'a aidé par ces précieux conseils ; jamais je n'oublierai votre accompagnement à l'université de Franche-Comté.

Ma profonde reconnaissance va envers M. CHAFFAI H ; M. KHERICI N, M. DERRADJI F, M. MERDES B ; M. OULARBI A ; et tous mes collègues pour leur conseil et intérêt qu'ils ont apporté pendant que je suis parmi eux, je cite ; M. BELOULOU L M. CHAAB S ; M. SAAIDIA B ; M. MAHIA M. Aussi toute ma reconnaissance envers M. BOULEDROUA A & M. ZERDAZI A ; pour leurs efforts, et avec qui j'ai appris beaucoup de choses.

Je remercie également ; Messieurs les membres du jury :

- Pr; BAALI Fethi et Pr ; FEHDI Chems Eddine, de l'université de Tébessa, ainsi que monsieur ALAYAT Hacene, Maître de conférences A, de l'université d'el Tarf, d'avoir examiné et évalué ce travail.
- Je tiens à remercier M BENHAMZA Moussa mon enseignant, et ; mon collègue qu'il trouve ici l'expression de mes sincères gratitude ; et pour avoir accepté d'examiner et évaluer ce travail.

Je voudrais également remercier mes collègues pour leur conseil ; qui sont mes enseignants du département de géologie de l'Université Badji Mokhtar - Annaba.

Je n'oublierai jamais l'aide, les conseils et surtout les encouragements et le soutien moral de ma famille qui a toujours cru en moi, et les encouragements de mes précieux amis.

A toutes les personnes qui n'ont pas hésité un seul instant à m'encourager même avec un sourire **je vous remercie de tout mon cœur**

إهداء

إلى روح الشهيد: محمود بوغريرة المدعو سي محمد،

تخليداً لذكراه وعرفانا بتضحياته من أجل وطنه.

المجد والخلود لشهدائنا

RESUME

La caractérisation d'un site aquifère contaminé, situé en bordure de l'oued Meboudja (Annaba, Algérie), a été entreprise en mettant en place une surveillance de la qualité des eaux de surface et souterraines affectés par les nombreux rejets industriels et urbains sur une période de 11 ans (1999-2009). Les déchets industriels sont déposés directement sur le sol et les effluents sont déversés dans l'oued Meboudja sans aucun traitement préalable.

Les résultats de ce suivi montrent que les eaux souterraines présentent une conductivité électrique élevée (de 1000 à 6000 μScm^{-1}), de fortes teneurs en chlorure et en sodium avec respectivement un maximum de 1400 mg L^{-1} et 730 mg L^{-1} .

Partant des résultats de l'analyse en composantes principales effectuée sur 33 puits en juillet 2009, les trois principaux processus responsables de l'évolution chimique observée au niveau de l'aquifère ont été identifiés : (1) l'apport salifère du lac Fetzara et le lessivage des formations métamorphiques carbonatées (responsables de l'augmentation de la minéralisation), (2) l'alimentation de la nappe par les eaux de l'oued Meboudja, recevant de nombreux polluants industriels (responsable des fortes teneurs en fer et en manganèse), (3) l'utilisation des produits chimiques dans l'agriculture (responsable de l'augmentation des teneurs en nitrates).

Les fortes minéralisations sont enregistrées notamment dans les puits situés à proximité des rejets industriels. En outre, de fortes concentrations métalliques en fer et en manganèse sont observées dans les eaux de l'oued. L'évolution de ces deux éléments dans les eaux de la nappe au cours d'un cycle hydrologique montre que l'augmentation des teneurs est liée notamment à une réalimentation de la nappe par l'oued et à une mauvaise oxygénation de la nappe. L'existence de niveaux argileux peut en effet jouer le rôle d'écran en surface et favoriser les conditions réductrices dans la nappe.

La Meboudja agit par conséquent comme une source diffuse de contaminants tout au long de son parcours. Les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère ont été estimés à l'aide de l'interprétation des données des pompages d'essai effectués dans plus d'une dizaine de puits. Des modèles d'écoulement et de transport de polluants ont été élaborés en utilisant le code MODFLOW-MT3D. L'ampleur de la migration des contaminants a été évaluée pendant une période de 11 ans (1999-2009). L'interaction oued-nappe est considérée comme responsable de la migration des contaminants dans la plaine de la Meboudja.

Mots-clés : Industrie sidérurgique, migration de contaminant, pollution industrielle, modélisation de transport de masse, interaction oued-nappe, concentration TDS.

ABSTRACT

The characterization of a hydrologically complex contaminated site bordering the Meboudja river (Annaba, Algeria) was undertaken by investigating surface water and groundwater affected by number of industrial rejections have been established during 1999-2009 in the El-Hadjar Industrial Development Area in the Annaba region, North-East of Algeria. The treated and untreated effluents from the industries are being discharged in Meboudja wadi. Groundwater level and water quality monitoring was carried out during 1999 and 2009 in El-Hadjar and its environs. Surface water samples were also analyzed for the water quality. The groundwater shows a high electric conductivity (more than 1000 cm^{-1} with a maximum exceeding $6000 \mu\text{S cm}^{-1}$), a high chloride content (with a maximum exceeding 1400 mg L^{-1}), and a high sodium concentration (maximum = 730 mg L^{-1}).

From the results of principal component analysis, the three main processes responsible of a chemical evolution in the aquifer have been identified: (1) dissolution of the evaporites and carbonated formations (producing an increase of electric conductivity), (2) relation between aquifer and Meboudja river (resulting in an increase in iron and manganese in a groundwater) and (3) Agricultural, by intensive use of chemical fertilizers (giving a high concentration in nitrates).

The high conductivity values are observed for the wells located down gradient and near the industrial rejections.

Also, high iron and manganese concentrations are observed in these wells. The Meboudja is acting as a diffuse source of contaminations all along its course. Aquifer parameters were estimated by carrying out pumping test at a number of wells. Groundwater flow and mass transport models were prepared using visual MODFLOW software. The extent of migration of contaminants from the Meboudja and other streams has been assessed for 11 years (1999-2009). The stream-aquifer interaction was found to be responsible for faster migration of contaminants in the over-exploited area east of the Seybouse.

Keywords: steel industry, contaminant migration, industrial pollution, mass transport modeling, stream-aquifer interaction, TDS concentration.

الملخص:

أجري وصف لموقع طبقة المياه الجوفية الملوثة، وتقع على طول وادي مبعوجة (عنابة، الجزائر) و في تنفيذ رصد نوعية المياه الجوفية والسطحية المتضررة من العديد من النفايات الصناعية والحضرية على فترة 11 عاما (1999-2009). إذ تودع النفايات المتنوعة في الطبيعة من دون أي علاج. نتائج هذه التجربة تشير إلى أن المياه الجوفية لديها التوصيل الكهربائي عالي $6000/1000 \mu S/cm$ وتركيزات عالية من الكلوريد والصوديوم وبحد أقصى 1400 ملغ/ل , 730 ملغ/ل على التوالي. وبناء على نتائج تحليل المكونات الرئيسية أجريت على 33 بئرا في يوليو 2009، تم تحديد العمليات الرئيسية الثلاث المسؤولة عن انتشار التشكيلات الكيميائية:

- (1) مساهمة بحيرة فنزارة عن زيادة تمعدن بذوبان الصخور المتحولة الكربونية.
 - (2) وتلقي طبقة المياه الجوفية من مياه النهر العديد من الملوثات الصناعية (المسؤولة عن ارتفاع في مستويات عالية من الحديد والمنغنيز).
 - (3) استخدام المواد الكيميائية في الزراعة (مسؤولة عن زيادة مستويات النترات).
- تم تسجيل تمعدن قوي خصوصا في الآبار قرب الصرف الصناعي. وبالإضافة إلى ذلك، تم العثور على تركيزات المعادن الثقيلة من الحديد والمنغنيز في مياه النهر. تطور هذين العنصرين في مياه الخزان الجوفي خلال الدورة الهيدرولوجية يدل على أن الزيادة في المستويات و بشكل خاص راجع إلى تغذية المياه الجوفية من النهر وضعف الأوكسجين . ووجود طبقات من الطين في الواقع يمكن أن تلعب دور الشاشة على السطح تحت شرط الإرجاع لطبقة المياه.
- وادي مبعوجة كمصدر منتشر للملوثات على طول الطريق ، وقدرت الخصائص الهيدروديناميكية لطبقة المياه، باستخدام تفسير البيانات من اختبارات الضخ التي نفذت في أكثر من عشرة آبار، وقد وضعت نماذج تدفق وانتقال الملوثات باستخدام MODFLOW-MT3D
- تم تقييم مدى الهجرة الملوثة لمدة 11 عاما (1999-2009) ، ويعتبر التفاعل الوادي - المياه الجوفية مسؤولة عن هجرة الملوثات في سهل مبعوجة.

كلمات البحث:

صناعة الصلب،
الهجرة الملوثة والتلوث الصناعي،
النمذجة النقل الجماعي،
التفاعل النهر المياه الجوفية،
تركيز المواد الصلبة الذائبة

LISTE DES TABLEAUX

N°		PAGE
Tab.1.	Pluies mensuelles : Moyenne des hauteurs pluviométriques enregistrées de 1913 à 1938 aux stations de Cap de Garde et d'Annaba (avant port) et 1926 à 1938 a la station de Séraïdi.....	05
Tab.2.	Les températures moyennes mensuelles de l'air enregistrées de 1913 à 1938 d'après SELTZER.....	05
Tab.3.	La population de la wilaya d'Annaba par sexe.....	07
Tab.4.	Evolution de la population de la wilaya d'Annaba entre 1966-1997 et 2008.....	08
Tab.5.	Caractéristiques générales des principaux ensembles topographiques Est-algérien	16
Tab.6.	Classification mensuelle de Moral.....	17
Tab.7.	Classification des climats selon l'indice de De Martonne.....	18
Tab.8.	Stations pluviométriques des sous-bassins de la Seybouse.....	21
Tab.9.	Estimation des coefficient pluviométrique (1981-2010).....	24
Tab.10.	Estimation des valeurs de la RFU selon la formule de Hallaire (Brochet et al., <i>in Habes, 2013</i>).....	28
Tab.11.	Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite (Station des Salines 1981-1982/2009-010).....	30
Tab.12.	Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwait Pour la station de Pont Bouchet (1981-82/2009-2010).....	30
Tab.13.	Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwait Pour la station de Ain Berda (1981-82/2009-2010).....	31
Tab.14.	Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwait Pour la station de Berrahal (1981-82/2009- 2010).....	31
Tab.15.	Caractéristiques morpho métriques des bassins du Nord-est algérien (Carte au 50 millièmes).....	39
Tab.16.	Tableau récapitulatif des aquifères existants et leurs réserves renouvelables dans l'extrême Nord-Est algérien (Derradji, 2004).....	42
Tab.17.	Besoins en eau industrielle.....	43
Tab.18.	Besoins en eau agricole de la région d'Annaba.....	43
Tab.19.	Résultats de deux pompages d'essai effectués dans la nappe phréatique.....	68
Tab.20.	Résultats du pompage effectué dans le secteur central de la plaine de Annaba (Aoun, 2010).....	68
Tab.21.	Caractéristiques techniques de l'appareil Multiline P4.....	73
Tab.22.	Analyse physico-chimique de l'eau du rejet urbain de Sidi Amar (novembre 1999, 2007, 2009).....	74
Tab.23.	Composition physico-chimique des rejets industriels dans l'oued Meboudja (Avril 2007 et Juin 2009).....	75
Tab.24.	Composition physico-chimique des eaux de l'oued Meboudja au niveau du site O4, d'août 1999 à décembre 2009.....	75

Tab.25.	Composition physico-chimique des eaux au niveau de trois puits de la nappe d'août 1999 à décembre 2009.....	77
Tab.26.	Détérioration de la qualité de l'eau d'irrigation (d'après le diagramme de Wilcox 1999 - 2009).....	79
Tab.27.	Synthèse du calage hydrodynamique – Bilan des flux – Système aquifère.....	88
Tab.28.	Variation des valeurs de TDS lors de l'analyse de sensibilité.....	90
Tab.29.	Tableau périodique des éléments, (table de Mendeleïev, 1869).....	98
Tab.30.	Principaux polluants à Annaba.....	100
Tab.31.	Nombre de véhicules par type et par âge, wilaya d'Annaba (inventaire 2009, in Mourdi, 2011).....	100
Tab.32.	Valeurs maximales, minimales, médianes et moyennes arithmétiques des teneurs du Fer (T) de 1999 à 2005 et 2006.....	104
Tab.33.	Valeurs maximales, minimales, médianes et moyennes arithmétiques des teneurs du Mn(T) de 1999 à 2005 et 2006.....	105
Tab.34.	Valeurs maximales, minimales, médianes et moyennes arithmétiques des teneurs de la C.E.....	105
Tab.35.	Valeurs limites des paramètres des rejets d'effluents liquides industriels (Journal de la République Algérienne, 2006).....	114
Tab.36.	Normes de potabilité des eaux pour les métaux (d'après Normes Européennes CEE 1975).....	114
Tab.37.	Résultats des analyses par D. R. X.....	147
Tab.38.	Résultats des analyses par M. E. B.....	148
Tab.39.	pH- Eh des sédiments.....	153

LISTES DES FIGURES

N°	PAGE
Fig.1. Carte de réseau des oueds du Bassin de la seybouse.....	2
Fig.2. Carte du relief de la wilaya de Annaba.....	4
Fig.3. Carte des routes de la wilaya de Annaba.....	9
Fig.4. Relief de l'Algérie du Nord (D'après MEBARKI. A ; 2005 ; source étude A.N.R.H., 2002).....	12
Fig.5. Contrôle des précipitations annuelles par la méthode des doubles cumuls (Pont Bouchet – Annaba).....	14
Fig.6. Contrôle des précipitations annuelles par la méthode des doubles cumuls. (Ain Berda – Annaba).....	14
Fig.7. Contrôle des précipitations annuelles par la méthode des doubles cumuls (Berrahal – Annaba).....	14
Fig.8. Les principaux domaines bioclimatiques de l'Algérie du Nord [selon l'indice annuel de Moral, période (1976-2005)].....	15
Fig.9. Evolution du climat selon l'indice de De Martonne pour la période (1982-2010).	18
Fig.10. Exemples de climats méditerranéens selon le coefficient d'Emberger.....	20
Fig.11. Carte des précipitations réalisée selon l'indice de Gaussen.....	21
Fig.12. Exemple de diagrammes Ombrothermiques de Gaussen.....	22
Fig.13. L'indice Ombrothermique de Gaussen, période (1981-2010).....	22
Fig.14. Précipitations annuelles médianes « normales» (1965-95) (d'après étude ANRH GTZ,2003).....	25
Fig.15. Carte de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne de l'Est Algérien.....	27
Fig.16. Graphique du bilan d'eau de la station des Salines (1981-82-2009-2010).....	32
Fig.17. Graphique du bilan d'eau de la station de Pont Bouchet (1981-82-2009-2010)....	32
Fig.18. Graphique du bilan d'eau de la station de Aîn Berda (1981-82-2009-2010)....	33
Fig.19. Graphique du bilan d'eau de la station de Berahal (1981-82-2009-2010).....	33
Fig.20. Oro-hydrographie de l'Algérie du Nord (Mebarki, 2005).....	35
Fig.21. Localisation des stations pluviométriques de sous-bassin de la Seybouse (<i>in</i> Hani.2003) modifiée.....	36
Fig.22. Ressources en eau des bassins versant de L'est d'Algérie (Mebarki, 2009).....	37
Fig.23. Carte des sous bassins Hydrographiques du Nord Est de l'Algérie (Mebarki, 2009)...	38
Fig.24. Variations des débits au niveau de la station de Mirebeck 1972 - 73à 1990 - 91 (sources A.N.R.H).....	40
Fig.25. Carte des retenues collinaires dans la région d'Annaba (<i>in</i> Derradji, 2004).....	41
Fig.26. Carte structurale de la Méditerranée.....	48
Fig.27. Le bassin algéro-sud baléare.....	49

Fig.28.	Esquisse géologique de la région d'étude (in Djabri <i>et al.</i> 2003, modifiée).....	50
Fig.29.	Carte géologique de la région d'étude (Hani, 2007).....	52
Fig.30	Log micropaléontologique du sondage BAD 3 (Sonatrach, 1969).....	56
Fig.31	Bloc diagramme au travers de la plaine de Annaba (Hani, 2003, modifié).....	57
Fig.32	Coupe géologique montrant les différentes nappes de la plaine d'Annaba (D.G.R.H.A 1967) modifiée.....	61
Fig.33	Carte des isopaches de la nappe phréatique (Hani.2003).....	62
Fig.34	Coupes au travers de la plaine d'Annaba.....	63
Fig.35	Coupes au travers de la plaine d'Annaba.....	63
Fig.36	Variation du niveau piézométrique.....	67
Fig.37	Localisation de la région d'étude.....	72
Fig.38	Résultats de l'analyse en composantes principales.....	76
Fig.39	Sels dissous totaux (TDS) et fer dans les eaux de surface et souterraines de la plaine de l'oued Meboudja (mg L-1).....	78
Fig.40	Diagramme de Wilcox.....	80
Fig.41	Evolution dans le temps des teneurs en fer et manganèse de la nappe alluviale de la Meboudja de novembre 2008 à octobre 2009.....	81
Fig.42	Conditions aux limites du système aquifère de la plaine de Meboudja.....	83
Fig.43	Reconstitution de la piézométrie de la nappe en m pour juillet 2009 (traits pleins :piézométrie mesurée, traits discontinus : piézométrie simulées).....	86
Fig.44	Comparaison entre côtes piézométriques mesurées et côtes simulées, juillet 2009.....	86
Fig.45	Carte des perméabilités calculées de la nappe alluviale de la Meboudja.....	87
Fig.46	Concentration en TDS simulée en mg L-1 pour juillet 2009.....	89
Fig.47	Comparaison entre valeurs de TDS mesurées et simulées, juillet 2009.....	89
Fig.48	Schématisation de l'évolution des teneurs en fer dans la nappe alluviale.....	91
Fig.49	Répartition schématique des phénomènes influant la spéciation des métaux dans les milieux naturels (Buffle, 1988).....	97
Fig.50	Déplacements intercommunaux (source : URBAN Annaba, 2006).....	101
Fig.51	Carte des rejets du sous Bassin de la Seybouse.....	102
Fig.52	Carte d'inventaire des points de prélèvement.....	103
Fig.53	Corrélation des teneurs en fer et manganèse de la nappe alluviale de la Meboudja de novembre 2009 à octobre 2010.....	104
Fig.54	Evolution dans le temps des teneurs en fer et manganèse de la nappe alluviale de la Meboudja de octobre 2009 à novembre 2010.....	112
Fig.55	Concentration totale en Zinc dissous dans les eaux souterraines de la plaine de la Meboudja.....	114
Fig.56	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du fer (mois Déc. 09. Janv. Fév.2010).....	118
Fig.57	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du fer (mois Mars. Avr. Mai. 2010).....	118
Fig.58	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du fer (mois Sept. Oct. Nov. 2010).....	119
Fig.59	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du fer (mois Sept. Oct. Nov. 2010).....	119
Fig.60	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'azote (mois Déc. 09. Janv. Fév. 2010)...	120
Fig.61	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'azote (mois Mars. Avr. Mai. 2010).....	121

Fig.62	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'azote (mois Juin. Jui. Août. 2010).....	121
Fig.63	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'azote (mois Sept. Oct. Nov. 2010).....	122
Fig.64	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du Soufre (mois Déc. 09. Janv. Fév.2010)...	123
Fig.65	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du Soufre (mois Mars. Avr. Mai. 2010).....	123
Fig.66	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du Soufre (mois Juin. Jui. Août. 2010).....	124
Fig.67	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du Soufre (mois Sept. Oct. Nov. 2010).....	124
Fig.68	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'Arsenic (mois Déc. 09. Janv. Fév. 2010).....	125
Fig.69	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'Arsenic (mois Mars. Avr. Mai. 2010)...	126
Fig.70	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'Arsenic (mois Juin. Jui. Août. 2010)....	126
Fig.71	Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'Arsenic (mois Sept. Oct. Nov. 2010)....	127
Fig.72	Rôle du sol dans les transferts et le stockage.....	139
Fig.73	Croquis géologique de la région de Annaba.....	141
Fig.74	Différents phases constituant un sol.....	141
Fig.75	Carte de types de sol.....	143
Fig.76	Plan d'échantillonnage dans la plaine de la Meboudja.....	144
Fig.77	Diffractogrammes des échantillons MO16-17.....	147
Fig.78	Etude par le MEB des teneurs atomiques et massiques.....	149
Fig.79	Photos des sédiments par le M.E.B.....	150
Fig.80	Comparaison entre les différentes méthodes.....	152

SOMMAIRE

N°	PAGE
Résumé.....	i
Abstract.....	ii
الملخص.....	iii
Liste des tableaux.....	iv
Liste des figures.....	v
Table de matières.....	vi
INTRODUCTION GENERALE.....	vii

CHAPITRE I : DESCRIPTION DU CADRE GENERAL DE L'AIRE D'ETUDE

I. Spécificités physico-géographiques de l'aire d'étude.....	1
I.1. Les grandes lignes du relief.....	1
II.1.1. Le massif de l'Edough	1
I.2. Les plaines.....	1
I.2.1. l'Oued Kébir de l'Ouest.....	2
II.2.2. l'Oued Seybouse.....	2
II.2.3. l'Oued bou Namoussa.....	2
I.2.4. l'Oued Kébir de l'Est.....	2
I.3. Aperçu sur le climat	4
I.4. Géologie et pédologie.....	6
I.5. Population et Démographie.....	7
I.6. La structuration et l'organisation de l'espace intercommunal.....	8
I.6.1. La Maille routière.....	8
Conclusion.....	10

CHAPITRE II : ETUDE HYDROCLIMATOLOGIQUE ET, HYDROLOGIE DE LA REGION D'ETUDE

Introduction.....	11
II.1. Les températures.....	12
II.2. Les précipitations.....	13
II.3. Critique des données	13
II.3.1. Le contrôle des totaux annuels des précipitations.....	13
II.3.2. Les domaines bioclimatiques.....	15
II.4. Les principaux indices climatiques.....	16
II.4.1. L'indice pluviométrique annuel (Moral).....	16
II.4.2. L'indice d'aridité de De Martonne.....	17
II.4.3. Le quotient pluviométrique d'Emberger.....	19
II.4.4. L'indice Ombrothermique de Gaussen.....	20
II.5. Le régime annuel.....	23

II.6. Étude de la pluviométrie annuelle.....	24
II.6.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP).....	25
II.6.1.1. Formule de Thornthwaite	25
II.6.2. l'évapotranspiration réelle (ETR).....	27
II.6.3. Interprétation du bilan hydrique.....	28
II.6.3.1. La méthode du bilan d'eau selon C.W. Thornthwaite.....	29
II.6.3.2. Interprétation du bilan hydrique.....	34
II.7. Hydrologie de la zone d'étude	35
II.7.1. Les ressources en eau superficielles.....	37
II.7.2. Les ressources en eau souterraines.....	38
II.8. Les besoins en eau.....	42
II.8.1. Les besoins en eau potable de la zone d'Annaba – El Hadjar.....	42
II.8.1.1. Les Besoins en eau industrielle.....	42
II.8.1.2. Les besoins en eau agricole de la région d'Annaba.....	43
Conclusion	44
Références bibliographiques	45

CHAPITRE III : GEOLOGIE

Introduction	47
Histoire géologique de la Méditerranée	47
III.1. La Plaine de Annaba	51
III.2. Le Paléozoïque.....	52
III.3. Le Mésozoïque.....	53
III.4. Le Cénozoïque.....	53
III.5. le Quaternaire	54
Conclusion	58
Références bibliographiques	59

CHAPITRE IV : HYDROGEOLOGIE

Introduction	60
VI.1. La nappe des sables fins superficiels (ou nappe superficielle).....	61
VI.2. La nappe des graviers (ou nappe profonde).....	62
VI.3. Variation du niveau piézométriques dans l'espace et dans le temps.....	63
IMPACT DE LA RELATION OUED-NAPPE SUR LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES	69
VI.3. Matériels et méthodes.....	70
VI.3.1. Site étudié.....	70
VI.4. Méthodologie	72
VI.5. Résultats et Discussion.....	74
VI.6. Les apports anthropiques.....	74
VI.7. Etat de la qualité des eaux superficielles et souterraines.....	75
VI.8. Evolution du fer-manganèse.....	80
VI.9. Modélisation des écoulements souterrains et du transport de masse.....	81
Conclusion	91
Références bibliographiques	93

CHAPITRE V : ETUDE DES CONCENTRATIONS, DE LA MOBILITE ET DE LA SPECIATION DES METAUX LOURDS

Introduction	96
V.1. Les différentes formes des métaux	97
V.2. Origine des métaux lourds.....	99
a- Pollutions causées par l'industrie	99
b- Pollution indirecte par transport atmosphérique d'émission d'automobiles.....	100
V.3. Interprétation des résultats des analyses physico-chimiques.....	104
V.3.1 Evolution du fer-manganèse.....	104
V.3.2. Quelles concentration en fer et en manganèse rencontre-t- on dans les eaux de la plaine de la Meboudja ?.....	104
V.3.3.Le pH	105
V.3.4. La Conductivité électrique C.E.....	105
V.3.5. Le Eh.....	106
V.3.6. La salinité	106
V.4. Etat de la pollution des eaux par les métaux lourds.....	113
V.4.1. Le Chrome	113
V.4.2. Le Plomb.....	113
V.4.3. Le cuivre	113
V.4.4. Le zinc.....	113
V.5. Diagrammes de Pourbaix.....	114
V.5.1. Définition.....	115
V.5.2. Tracé du diagramme H ₂ O.....	117
V.5.3. Tracé du diagramme du fer.....	117
V.5.4. Tracé du diagramme de l'azote.....	120
V.5.5. Tracé du diagramme du Soufre.....	122
V.5.6. Tracé du diagramme de l'arsenic.....	125
V.6. Résultats de la spéciation en solution avec PHREEQC.....	129
V.6.1. Les possibilités de PHREEQC.....	129
V.6.2. La spéciation en solution.....	129
V.6.3. Le coefficient d'activité gi.....	129
V.6.4. Etat de saturation	130
V.6.5. Indice de saturation (IS).....	130
V.6.6. Les ETM.....	130
Conclusion	136
Références bibliographiques	137

CHAPITRE VI : ETUDE DES CONCENTRATIONS, DES METAUX LOURDS DANS LES SEDIMENTS

Introduction	138
I. Géologie de la région :	140
II. Les métaux lourds et le sol.....	141
III. Les relations entre les paramètres du sol et les concentrations en ETM.....	142
IV. objectif et lieu d'étude.....	143
V. Matériel et méthodes.....	144
a. Nature et modalités de la préparation des prélèvements	145
b. principe et théorie.....	145
c. appareillage	145
d. conservation des échantillons.....	146
c. préparation des échantillons.....	146
VI. Étude aux rayons X.....	147
Interprétation.....	148
VII. Étude par le M.E.B.....	148
VIII. Méthode d'extraction des ETM.....	151
IX. Eh-pH.....	153
Conclusion	154
Références bibliographique	155
CONCLUSION GENERALE	156
ANNEXES	

INTRODUCTION GENERALE :

Le monde a connu des progrès rapides de la science et de la technologie. Mais tous ces progrès ont contribué à diverses formes de pollution. La pollution industrielle affecte notre environnement de nombreuses façons et est une cause majeure de préoccupation. La grande quantité de déchets générés par les industries conduit à la pollution des ressources comme l'air, l'eau et des terres.



À Annaba, Avec l'augmentation de la population, l'urbanisation croissante, l'industrialisation et intensification de l'agriculture, l'industrie reste le premier pollueur, elle représente plus de la moitié du volume de pollution de l'eau.

L'industrie métallurgique est à l'origine des principales contaminations métalliques de l'environnement de la plaine. Déversés dans le cours d'eau, l'oued Meboudja est devenu le réceptacle des eaux usées et des déchets dans leurs formes et leurs quantités qui n'ont pas cessé d'évoluer dans le temps. Les métaux s'accumulent principalement dans les sédiments de l'oued, et se comportent alors comme des réservoirs de polluants constituant ainsi une source potentielle de pollution au gré des changements de certains paramètres physico-chimiques du milieu (pH, potentiel redox,...). Il en résulte alors de réels problèmes d'ordre environnemental. En effet, leur lessivage peut être à l'origine de leur accumulation le long des chaînes alimentaires et ainsi entraîner des problèmes de santé publique. Il est, par conséquent, nécessaire, d'une part d'identifier et de caractériser les sites pollués, et d'autre part de mettre en place des stratégies de dépollution.

Le fer et le manganèse que l'on rencontre dans l'eau ou les sédiments sont suffisamment abondants et réactifs pour influencer le devenir des contaminants métalliques. Ils méritaient donc bien une attention particulière dans le thème Mobilisation des contaminants dans la plaine de la Meboudja.

Dans cette thèse :

Le chapitre 1 ; présente l'état de connaissance, la localisation, la répartition, la description du cadre général de l'aire de l'étude.

Pour présenter et discuter l'étude climatologique et Hydrologique de la région d'étude on a fait appel à des méthodes de traitement de données, présentées au **chapitre 2**.

Le **chapitre 3** ; s'appuie sur des approches scientifiques du cadre géologique et structural de la région d'étude.

Le comportement de la nappe libre est ces fluctuations de son niveau piézométrique contrastés au cours de douze mois a été étudié. Il est, à ce titre, décrit au **chapitre 4**.

Si l'on considère un cycle général de douze mois d'observation des éléments traces dans les sédiments et les hydro-systèmes on constate que des migrations sont possibles et se produiront parfois sous forme solubles, mais aussi sous forme colloïdales et particulaires, par lixiviation et par érosion hydrique ou éolienne en surface, ou par entrainement en profondeurs vers les nappes. Il ya aussi une liaison étroite entre l'oued Meboudja et l'hydro-système (nappe superficielle). La mobilité, la toxicité, et la biodisponibilité des éléments en traces, qui conditionnent les transferts aux eaux, sont déterminées par des phénomènes (adsorption, désorption, dissolution, précipitation,.....) définis par la nature de l'élément et les paramètres du milieu concerné au cours de quelques années d'observation. Ces mécanismes sont décrits au **chapitre 5**.

La définition des méthodes de présentation et de traitements des sédiments contaminés par les éléments comme ceux retenus (Hg, Pb, Cd, Cu, Zn, As, Ni, Se, Cr) doivent donc être envisagées et conduire à des recommandations visant à restaurer, maintenir ou contrôler les fonctions et la qualité de ces sédiments globalement et localement menacées par accumulation continues qui, si elle se poursuivait aux taux constatés depuis la mise en marche des unités après l'indépendance, seraient insoutenable à long terme est présentée au **chapitre 6**.

**Partie 1 : « Cadre général, étude du climat et
Hydrologie de la région d'étude »**

*Chapitre 01 : Description du cadre générale de
l'aire d'étude.*

*Chapitre02 : Etude climatologique ; et Hydrologie
de la région d'étude.*

Chapitre I:

Description du cadre général de l'aire d'étude

I. Spécificités physico-géographiques de l'aire d'étude :

La présente étude concerne le territoire des communes d'El Hadjar et de Sidi Amar. Cet espace géographique fait partie du prolongement Nord oriental de la chaîne tellienne dont l'orientation générale suit une direction Sud-ouest, Nord-est.

Il est limité au Sud par les communes de Aîn Berda et Cheurfa, au Nord et au Nord-Est par la mer Méditerranée, à l'Ouest par les communes de Berrahal, Oued El Aneb et Séraïdi et enfin à l'Est par la commune d'Echatt (W. d'El Tarf).

D'une superficie approximative de 26 582,9 ha, il a une morphologie assez caractéristique opposant un relief de montagne assez brutal à une plaine basse et parfaitement plate où subsistent des zones hydromorphes.

Du point de vue géologique ce relief est argilo-gréseux (flysch numidien). Malgré la présence de quelques petites sources issues des grès au contact des intercalations d'argile.

I.1- les grandes lignes du relief :

Sur le plan orographique, on peut distinguer trois principales unités géomorphologiques :

I.1.1- Le massif de l'Edough : Au contact brutal de la plaine de Annaba et la mer s'élève l'entité cristallophyllienne : le massif de l'Edough qui culmine au Bou Zizi à 1.008 m et s'allonge sur 56 km en direction Sud-Ouest / Nord-Est sur une largeur moyenne de 16 km. Puis s'abaisse régulièrement pour s'achever par la presqu'île du cap de garde. Il est constitué par des terrains anciens (gneiss, granite, micaschistes), particulièrement pauvres du point de vue hydrologique.

I.2- Les plaines

Entre le massif de l'Edough et la chaîne côtière s'étend une large dépression en forme de gouttière, cintrée en plan, qui constituait certainement autrefois un large bras de mer d'une centaine de km de longueurs et qui a été progressivement comblée par les alluvions des fleuves qui s'y jettent et dont les principaux sont, d'W en E :

I.2.1- l'Oued Kébir de l'Ouest, drainant les montagnes côtières, grossi sur sa rive droite de l'Oued et Aneb et de **l'Oued Magroun**, descendant du massif de l'Edough ;

I.2.2- l'Oued Seybouse, le plus important des cours d'eau de la région (voir Fig.1), canalisant les débits de ruissellement d'un bassin versant de 5 960 km², dont le débit annuel est de l'ordre de 450 millions de m³ ; son dernier affluent de rive gauche, l'Oued Méboudja, lui apporte les eaux du bassin versant du Lac Fetzara et de la plaine Ouest ;

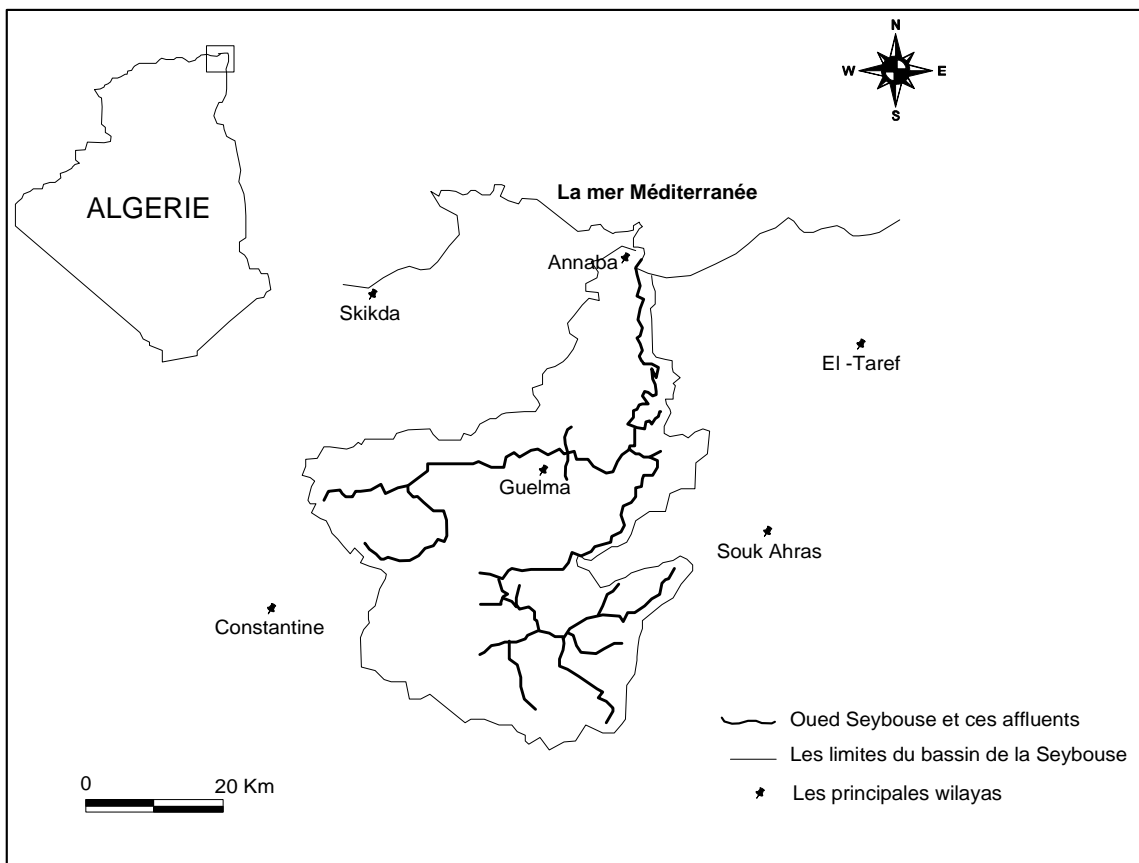


Figure 1. Carte de réseau des oueds du Bassin de la Seybouse.

I.2.3- l'Oued bou Namoussa, gros cours d'eau descendant de la région de Souk-Ahras, dont le bassin versant est de 600 km² environ, et susceptible d'un débit annuel moyen de 180 millions de m³;

I.2.4- l'Oued Kébir de l'Est, formé par la réunion de trois oueds importants (Kébir, Ballouta et Bougous), qui draine les flancs W des montagnes de Tabarka (Tunisie) et reçoit dans sa vallée moyenne de nombreux affluents de rive gauche (Guergour, Halloufa et Bou Lathan). Son bassin versant est de l'ordre de 750 km² et son débit moyen annuel de 250 millions de m³.

Les alluvions de ces fleuves ont constitué un chapelet de plaines côtières et subcôtières, séparées les unes des autres soit par les bourrelets de rive des cours d'eau, soit par des zones plus marquées de dépôts alluvionnaires formant barrages dans la dépression générale. Ces plaines (Fig.2) ont chacune un caractère et une composition agrolologiques propres, correspondant à la nature des terrains traversés par les différents oueds et au degré d'alluvionnement de chaque dépression.

On peut ainsi distinguer, en allant de l'ouest vers l'Est:

- **Le delta commun de l'Oued Kébir de l'Ouest et de l'Oued el-Aneb**, plaine d'environ 9.000 ha de superficie ;

- **Le Lac Fetzara et ses abords** : zone de 23.000 ha dont la cuvette a constitué pendant des siècles un marécage permanent où le plan d'eau s'étalait sur une superficie de 14.000 ha. Ne bénéficiant plus, à partir d'une certaine époque, de l'alluvionnement des deux grands fleuves qui le bordent, il ne s'est lentement comblé que par les apports des petits oueds descendant au N et au S des collines de Aîn Berda et du massif de l'Edough. Sa côte de fond est de l'ordre de + 10,50. Sa vidange totale est obtenue chaque année vers la fin mars par un canal de 14 km de long qui le traverse dans le sens W-E et rejoint, après traversée de son bourrelet oriental, le cours moyen de l'Oued Méboudja.

- **La plaine d'Annaba-Ouest**, d'environ 10.000 ha, se situe entre le bourrelet oriental du Lac Fetzara et la rive gauche de l'Oued Seybouse.

- **La plaine d'Annaba-Est**, d'une superficie approximative de 20.000 ha, est comprise entre la rive droite de l'Oued Seybouse et la rive gauche de l'Oued bou Namoussa.

- **Le marais M'Krada** est le delta commun de l'Oued bou Namoussa et de l'Oued Kébir de l'Est. Cette plaine, d'une superficie de l'ordre de 14.000 ha, constitue à l'heure actuelle une sorte de lagune dont l'altitude est très basse (cotes +3 à +1), dans laquelle s'accumulent les débits des deux fleuves avant de pouvoir s'écouler vers la mer par leur exutoire commun, " la Maffrag ", lorsque le niveau d'amont arrive à submerger la barre sableuse qui l'obstrue et qui se reconstitue rapidement sous l'action de la mer.

- **La moyenne vallée de l'Oued Kébir de l'Est**, plaine très étroite et allongée d'environ 9.500 ha, présente deux renflements à hauteur de Bouteldja et d'El Tarf.

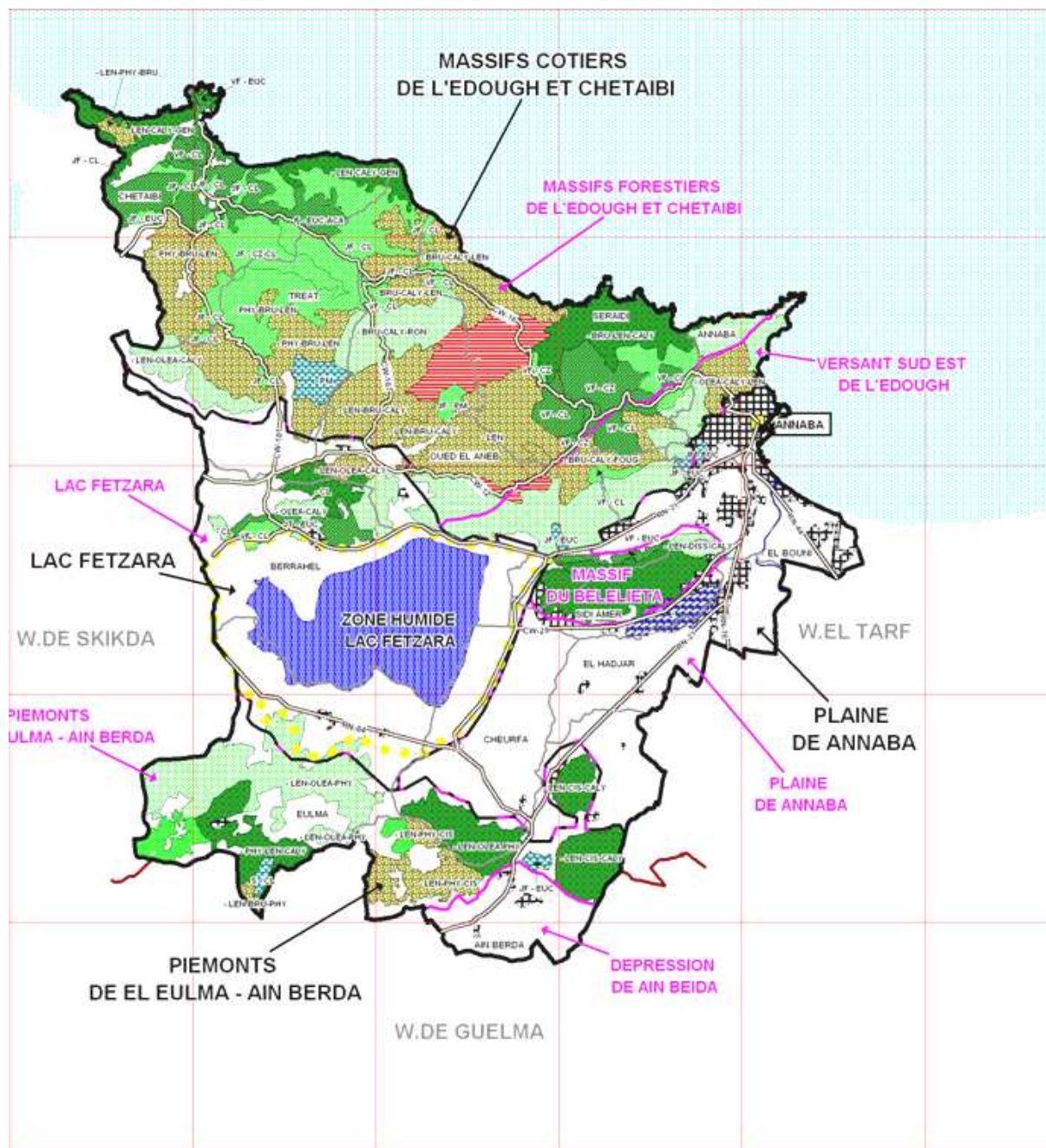


Figure 2. Carte du relief de la wilaya de Annaba (source : Direction des forêts de la Wilaya).

I.3- Aperçu sur le climat :

La région d'Annaba est soumise au climat méditerranéen c'est-à-dire caractérisé par une saison pluvieuse allant d'octobre à mai et par un été sec et ensoleillé. Pour une année donnée, la répartition des pluies diffère d'ailleurs le plus souvent du tout au tout de leur répartition moyenne, et cette irrégularité constitue une donnée fondamentale de ce climat.

Le relief agit comme un rempart qui provoque la condensation et la précipitation d'une partie de la vapeur d'eau amenée par le vent soufflant de la mer, avec des maxima pluviométriques sur les massifs montagneux les plus élevés et les plus proches de la mer et des minima pluviométriques sous le vent de ces massifs.

Voici d'ailleurs quelques chiffres qui donnent la moyenne de la pluviométrie annuelle enregistrée par quelques stations météorologiques :

Tableau 1 : Pluies mensuelles : Moyenne des hauteurs pluviométriques enregistrées de 1913 à 1938 aux stations de Cap de Garde et d'Annaba (avant port) et 1926 à 1938 a la station de Séraïdi.

Stations	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Ann.
Annaba	31	75	108	133	149	105	73	57	37	15	03	07	787
Cap de Garde	31	73	103	111	120	82	60	45	33	14	04	06	682
Séraïdi	36	87	126	158	154	115	90	71	47	20	05	10	919

En bordure de mer, le climat est remarquablement tempéré, dû à l'action modératrice et immédiate de celle-ci, l'amplitude diurne est partout et en toute saison inférieure.

. Les températures :

Tableau 2 : Les températures moyennes mensuelles de l'air enregistrées de 1913 à 1938 d'après SELTZER.

Stations	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy. Ann.
Annaba	23.53	20.0	16.25	12.8	11.4	11.9	13.65	15.45	18.4	22.04	24.06	25.40	17.95
Cap de Garde	24.7	20.5	16.7	13.1	14.8	12.2	15.7	18.7	20.7	22.3	25.4	26.3	19.3
Séraïdi	20.2	15.5	10.6	6.8	5.8	6.8	9.3	11.5	18.5	18.7	21.5	22.4	13.8

La moyenne des températures du mois le plus froid (janvier) est de 11.40° avec minimum absolu de 0° ; celle du mois le plus chaud (août) de 25.40° avec maximum absolu de 45°.

Les gelées et la neige y sont pratiquement inconnues. Les chutes de grêle sont peu fréquentes. Enfin, l'humidité relative est à peu près constante toute l'année, avec les moyennes suivantes selon les heures de la journée (Station du Cap de Garde) :

7 h.....	74 %
13 h.....	67 %
18 h.....	76 %

D'après Emberger, Annaba est à la limite de l'étage méditerranéen subhumide, avec un quotient de 91,5, correspondant sensiblement à celui de Perth en Australie.

I.4- Géologie et pédologie

Du point de vue géologique, si l'on s'en réfère à Joleaud (1936), la région littorale fut, durant le Quaternaire, l'objet d'une succession d'oscillations vers le haut et vers le bas, correspondant à des mouvements apparents de la mer, positifs (transgressions) lors des affaissements du littoral, négatifs (régressions) lors des exhaussements. Cette théorie est basée sur l'observation des successions des terrasses fluviales et plages marines.

Un affaissement correspond à une transgression de la mer et à un relèvement apparent du niveau de base des fleuves. Une telle période est marquée par un dépôt alluvial considérable.

Un exhaussement, au contraire, se traduit par une activité érosive plus intense, puisque le niveau de base s'est abaissé. On note, en effet, la présence, sur tout le pourtour du relief gréseux, de terrasses alluvionnaires étagées de 15 à 150 m, au-dessus du niveau actuel des fleuves.

On admet qu'à la fin de cette période d'oscillations : le Lac Fetzara était déjà isolé par ses deux bourrelets W et E ; le reste des plaines constituait une immense lagune comprise entre un cordon dunaire côtier et la base du relief argilo-gréseux. Suivent alors, au Quaternaire récent, un comblement rapide du marécage par les matériaux détritiques arrachés au relief par un ruissellement important, et la formation d'un alluvionnement de galets, de cailloutis, de sables et de limons superposés ou étagés, tant dans le sens horizontal que vertical, suivant la violence et l'intensité des érosions.

En ce qui concerne l'aperçu agro-pédologique, (ouvrage consacré à l'Agriculture de la Région de Annaba par Liger, Ingénieur des Services Agricoles), la classification des sols suivante :

- Les sols occupent les bourrelets des Oueds Seybouse, Kébir de l'Est et de l'Ouest et bou Namoussa et de leurs affluents. On distingue au moins deux types de sols alluviaux : les sols sablo-argileux ou sablo-limoneux et les sols limono-argileux. Ces derniers sont les plus étendus.

A cette famille de sols, peu évolués du point de vue pédologique, se rattachent des sols sablo argileux d'origine gréseuse des bords des cônes de déjection.

- Les profondes alluvions de la Seybouse recouvrent fréquemment un cailloutis fluvial qui forme drain naturel. Au point de vue chimique, elles se distinguent des autres alluvions par leur teneur relativement élevée en calcaire.

- **Les sols noirs** forment une grande partie de la plaine qui s'étend entre l'Oued Seybouse et l'Oued bou Namoussa, de celle qui va de la Seybouse au Lac Fetzara. Ce sont des terres argileuses ou limono-argileuses, légèrement chlorurées, qui constituaient les sols d'anciens marécages, sous-salins, améliorés par la culture et le drainage.

- **Les sols salins et sous-salins**, profonds en général et d'épaisseur variant de 0,80 à 1,50 m, reposent très souvent sur une couche d'argile jaune. Leur origine est lagunaire. La salure de ces terres est due à l'évaporation des eaux qui les recouvraient sous une faible épaisseur. Mais on trouve aussi un grand nombre de sous-types à différents stades. Ces sols couvrent près de 30.000 ha notamment dans le Lac Fetzara, les Beni Urgine et les Marais M'Krada.

I.5- Population et Démographie

Cinquième ville du pays par le nombre de ses habitants (La population résidente dans la ville d'Annaba est de 390 000 habitants en 2005, selon les données publiées par la Wilaya, Cependant la population pendulaire peut atteindre durant la saison estivale, un million de personnes), son expérience de développement local dans ses aspects les plus significatifs, est objectivement représentative des autres processus socio-économiques vécus dans les autres agglomérations urbaines (in Khaoua *et al.*, 2010)

De par les atouts tant naturels et géographiques que matériels et humains dont elle dispose, le développement local est susceptible de réaliser dans cette zone, des niveaux parmi les plus élevés du pays. Elle compte selon les données les plus actualisées, la ville et sa proche banlieue comptent environ 609499.000 habitants en 2008 [5]. Cela équivaut à peu de chose près à [1/58] de la population totale du pays (35 000 000 d'habitants).

La ville d'Annaba concentre intra-muros la plus grande partie de ces habitants, soit environ 390.000. La distinction par sexe, nécessaire dans l'analyse des taux d'activité respectifs entre hommes et femmes, nous donne :

Tableau 3 : La population de la wilaya d'Annaba par sexe.

Masculin	Féminin	Total	Taux d'accroissement
305030	304469	609499	0.9

1- Femmes : 53 % = 200.000 habitants

2- Hommes : 47 % = 190.000 habitants

En effet, les données démographiques disponibles à ce sujet montrent :

3- Population de moins de 35 ans = 75 %

4- Population de moins de 16 ans = 53 %

En appliquant ces taux à la population de la ville d'Annaba, on obtient :

5- Femmes de moins de 35 ans = 154.500 habitants

6- Femmes de moins de 16 ans = 109.180 habitants

7- Hommes de moins de 35 ans = 144.750 habitants

8- Hommes de moins de 16 ans = 102.290 habitants

Tableau 4 : Evolution de la population de la wilaya d'Annaba entre 1966-1997 et 2008.

(Sources [3] [4] [5] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_wilayas_d'Alg%C3%A9rie#cite_note-3)

Code 23	Wilaya Annaba	Nombre	Nombre	Superficie	Population	Population	Population	Densité (hab. /km ²)
		de daïras	de communes	Km ²	(1966[3])	(1977[4])	(2008[5])	2008
		6	12	1 439	218 638	350 032	609 499	424

I.6- La structuration et l'organisation de l'espace intercommunal :

I.6.1- La Maille routière :

L'analyse de la carte des routes suivante (Fig.3) de la W. de Annaba, permet de distinguer à l'échelle globale trois grands axes porteurs de croissances et de développement :

- l'axe RN 16 qui relie les deux grands et anciens pôles Annaba et El Hadjar,
- L'axe RN 44-Est reliant Annaba à El Tarf,
- L'axe RN 44-Ouest reliant Annaba à Constantine.

Ces trois axes qui convergent vers la ville centre de Annaba et la traversent sont reliés transversalement par :

- La rocade Ouest,
- Et le CW 22.

Considérée à cette échelle, la maille routière semble assez achevée, mais nécessite toutefois un certain achèvement transversal du côté Est vers le côté Ouest.

Des liaisons transversales sont nécessaires au niveau de Sidi Ammar et Hadjar Eddiss pour permettre une meilleure inscription de l'urbanisation par rapport à son territoire.

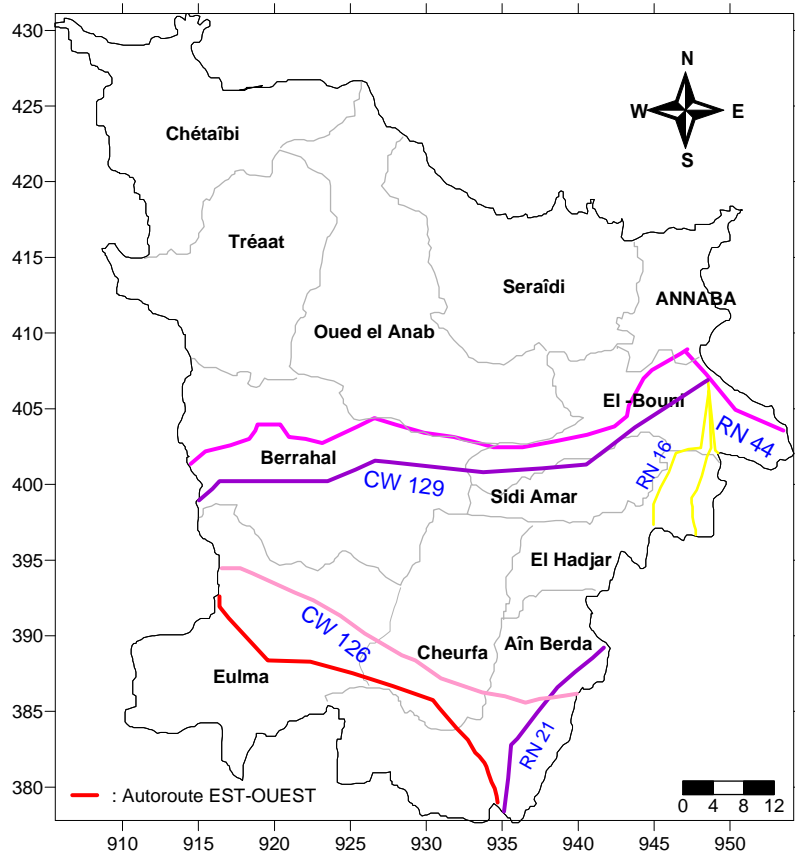


Figure 3. Carte des routes de la wilaya de Annaba.

Conclusion :

Depuis quatre décennies, la mutation socio-économique de la région d'Annaba a engendré un véritable bouleversement des groupements paysagers aussi bien dans leur nature que dans leur vocation. Ils comprennent : le tissu industriel englobant plusieurs unités source d'une pollution multiforme (**D.Fadel & al, 2009**) ;

La maille routière de l'agglomération est marquée par trois radiales, la RN44 Est qui se prolonge à l'échelle de la ville centre par la pénétrante Ouest et la RN 16 qui se prolonge par l'axe Nord-Sud et La RN 44-Est.

La RN 16 qui est l'axe le plus important contourne la ville d'El Hadjar et donne naissance à la RN 21.

L'axe CW 22 trace une autre rocade qui relie la partie Est de la ville de Annaba au centre de l'ensemble d'El Bouni.

Les deux CW 129 et 56 assurent des liaisons entre le Port et El Hadjar.

L'analyse de l'armature urbaine de l'agglomération de Annaba, composée des quatre communes permet de distinguer à l'échelle globale trois grands axes porteurs de croissance et de développement :

- l'axe RN 16 qui relie les deux grands et anciens pôles Annaba et El Hadjar,
- L'axe RN 44-Est reliant Annaba à El Tarf,
- L'axe RN 44-Ouest reliant Annaba à Constantine.

Chapitre II:

Etude du climat et Hydrologie de la région d'étude

Introduction :

Les études et les expériences faites sur le climat méditerranéen remontent à 1926 par De Martonne, Kipper (1936), L. Emberger (1941), Dubief (1953), Gausson (1957), Charles. W. Thornthwaite (1948)... Les principaux indices seront utilisés et leurs significations seront retenues.

C.W. Thornthwaite a défini le climat devant la commission de climatologie de l'OMM, comme : « une intégration des facteurs météorologiques et climatiques qui concourent à donner à une région donnée son caractère et son individualité » (G.Viers, J.P. Vigneau, 1990).

M. Sorre, le définit comme : « l'ambiance atmosphérique constituée par la série des états de l'atmosphère au-dessus d'un lieu dans leur succession habituelle » (M. Sorre, 1943).

Le climat méditerranéen est un climat de transition entre la zone tempérée et la zone tropicale. Souvent, barré par les chaînes montagneuses proches du littoral, (Atlas Tellien et Atlas Saharien) Fig.4, ce climat ne pénètre guère vers l'intérieur. Ces climats de bordure, presque linéaires, ne sont pas des climats maritimes, mais des climats contrastés traduisant, ainsi, plus d'influences continentales qu'océaniques et reflétant avant tout leur double appartenance aux franges de la zone tempérée et à celles de la zone tropicale.

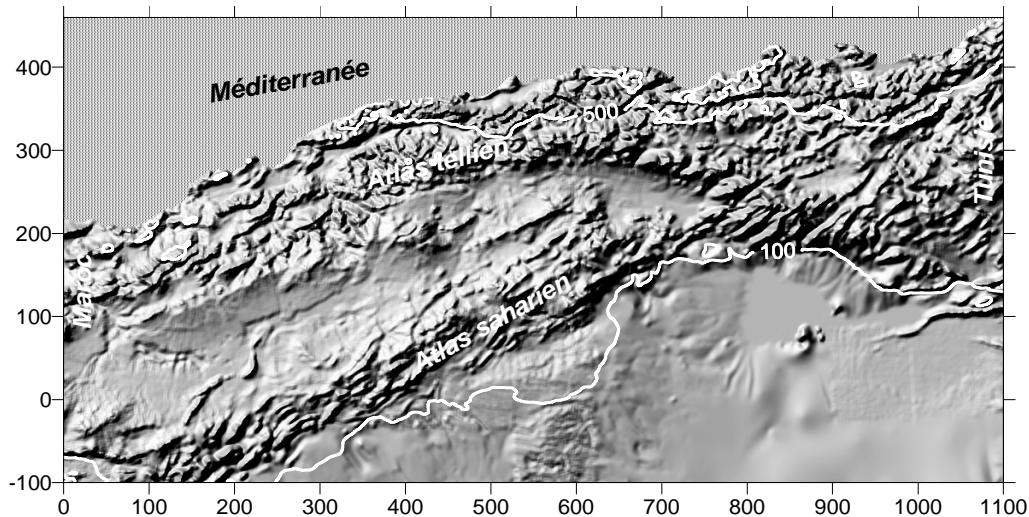


Figure 4. Relief de l'Algérie du Nord (D'après MEBARKI. A ; 2005 ; source étude A.N.R.H., 2002)

1. Les températures :

Les variations spatiales des températures de surface La température de l'air est fondamentale à la surface de la terre, puisqu'elle conditionne tous les processus liés à la vie végétale et animale, elle s'associe à l'érosion par le biais de la destruction des roches et intervient dans le régime des cours d'eau, etc. Il existe de 2 types de températures :

- *La température vraie*; c'est la valeur thermique réellement observée dans une région donnée,
- *la température réduite au niveau de la mer*; c'est la température ramenée à la valeur qu'elle aurait en l'absence de tout relief, elle est égale à la température *vraie* observée en altitude à laquelle est ajouté ou soustrait un gradient de 0,5 à 0,6°C pour chaque 100 m de dénivellation [Godard *et al* ; 1993]

Sur les cartes climatiques figurent des lignes d'égales températures, appelées isothermes. Il existe de fortes différences de température d'un point à l'autre de la planète.

Aussi, les températures varient-elles en fonction :

A/ De la latitude : La latitude est un facteur de zonalité ; les températures sont d'autant plus fraîches que l'on va de l'équateur vers les pôles.

B/ De la situation continentale ou océanique : C'est un important facteur de zonalité dans la répartition des températures. A latitude égale, l'air situé au-dessus d'un continent peut avoir une température fort différente de celle de l'air au dessus d'un océan, parfois de plus de 30°C.

C/ De la position de la station de mesure à l'ouest ou à l'est d'un continent ou d'un océan En général, aux moyennes et hautes latitudes en hiver, les parties orientales des océans sont relativement plus chaudes que les occidentales et c'est l'inverse pour les côtes continentales.

D/ De l'altitude : Sur les cartes de températures, on constate que le tracé des isothermes est souvent étroitement lié à l'altitude. La température décroît d'environ 0,5 à 0,6°C chaque fois que l'on s'élève de 100 m en altitude (on parle de gradient thermique vertical).

E/ De la topographie : L'exposition joue un rôle capital dans la distribution des températures.

2. Les précipitations :

Pour qu'il y ait précipitation il faut, cependant, qu'il y ait jonction de ces gouttelettes, c'est à-dire regroupement de gouttelettes qui acquièrent, alors, un poids suffisant pour chuter. Le phénomène de jonction est rendu possible grâce aux turbulences dans la masse d'air.

La répartition des précipitations à la surface du globe La lame d'eau moyenne annuelle tombant sur la terre est d'environ 900 à 1000 mm soit 14 millions de tonnes d'eau/seconde. Les précipitations les plus intenses se rencontrent dans le domaine méditerranéen mais, surtout, en Asie du sud-est où il peut tomber jusqu'à 1000 mm d'eau en 24 heures.

3. Critique des données

Notre étude est basée sur l'analyse de la série de données fournie par l'ONM, allant du Septembre 1980 au mois d'Août 2010 (soit une période de 29 ans). Dans ces séries d'observations, des lacunes mensuelles ou annuelles sont relevées.

3.1. Le contrôle des totaux annuels des précipitations :

La méthode dite des doubles cumuls, consiste à mettre en corrélation les totaux annuels cumulés de la station de référence avec ceux de la station à contrôler. La station de référence étant celle qui possède la série d'observation la plus longue et la plus homogène.

Comme dans la figure 5, on porte sur le papier millimétrique en abscisse les totaux annuels des précipitations de la station de référence (ex : Annaba) et en ordonnée ceux de la station à contrôler (ex : Pont Bouchet).

La courbe déterminant une corrélation normale et positive, est caractérisée par un alignement des points, représentant les totaux annuels cumulés des précipitations.

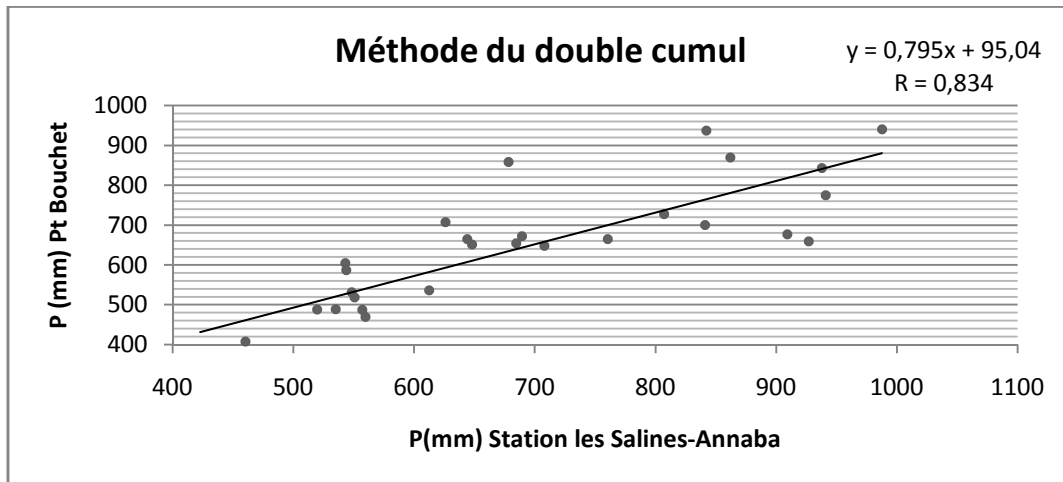


Figure 5. Contrôle des précipitations annuelles par la méthode des doubles cumuls (Pont Bouchet – Annaba)

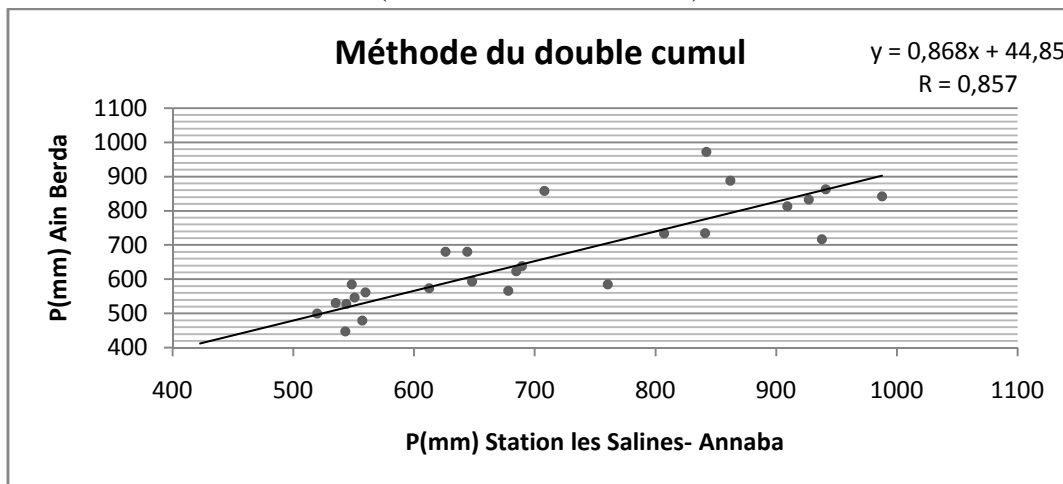


Figure 6. Contrôle des précipitations annuelles par la méthode des doubles cumuls. (Ain Berda – Annaba).

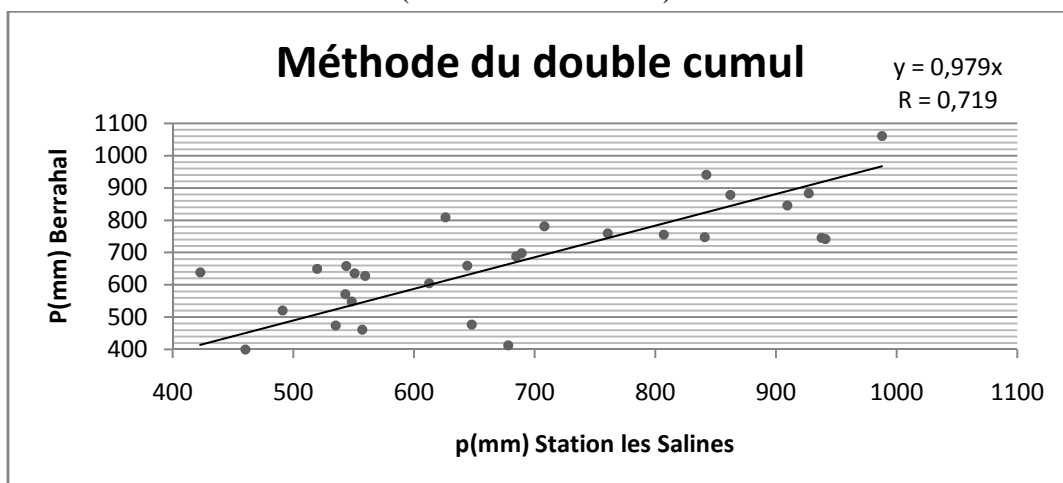
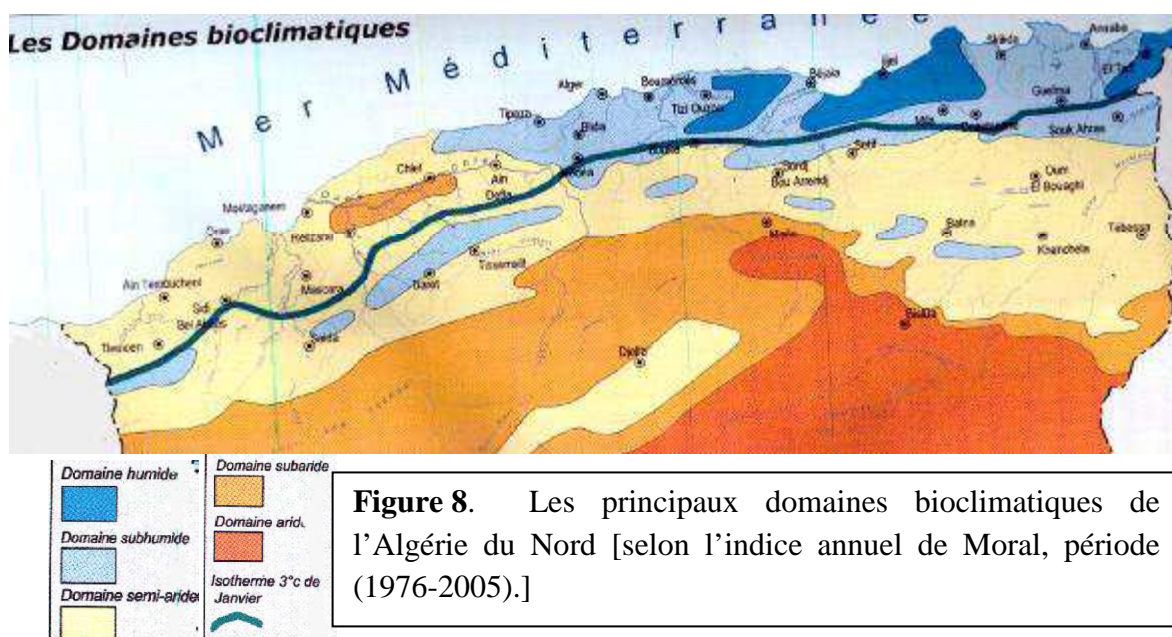


Figure 7. Contrôle des précipitations annuelles par la méthode des doubles cumuls (Berrahal – Annaba)

En effet, les indices climatiques qui seront appliquées dans ce travail, sont des expressions empiriques traduisant des résultats approximatifs dans l'ensemble, vu les contraintes qui régissent le climat méditerranéen. Cependant, la combinaison entre les différents indices et la recherche d'indices plus localisés peuvent nous donner des résultats plus logiques (applicables) et proches de l'absolu.

3.2. Les domaines bioclimatiques :

La combinaison des données climatiques fondamentales (température et précipitations) permet de définir des domaines bioclimatiques. La figure 8, indique les différentes zones bioclimatiques :



Cette région reçoit, en général, plus de 600 mm de précipitations, le nombre de mois secs ne dépasse pas 3 à 4 mois. Ce domaine comprend toute la zone côtière (surtout celle de l'Est) ainsi que l'ensemble montagneux de l'Algérie septentrionale.

L'Algérie du Nord a été subdivisée, du nord au sud, en 4 ensembles topographiques, chacun représentant une unité géographique bien définie. La subdivision s'est faite sur la base de :

- Critères topographiques; les stations d'un ensemble offrent le même profil topographique.
- Critères climatiques; les stations d'un groupe appartiennent toutes à la même trame climatique.

- Critères statistiques; les coefficients de corrélations entre les paramètres des différentes stations devant être élevés et le test de conformité de ces derniers, doit, impérativement, être significatif.

Cette subdivision nous a permis d'obtenir, du nord au sud, les ensembles du tableau suivant :

Tableau 5. Caractéristiques générales des principaux ensembles topographiques Est- algérien

Domaine	Ensemble	Précipitation	Stations représentatives
Humide et sub-humide	Plaines cotières et le versant nord de l'atlas tellien	Sup. à 600mm/ans	Annaba, Skikda, Bejaia.
Semi arides	Hauts plaines et hauts plateaux intérieurs	Entre 400 et 600mm/ans	Souk Ahras, Guelma, Constantine
Arides	Hauts plateaux et l'atlas saharien	Inférieur à 400 mm/ans	Tébessa, Batna, Sétif, Bordj- B Arreridj.
Désertique	Sahara	Inférieur à 100 mm/ans	Biskra

4. Les principaux indices climatiques :

Les indices climatiques aux quels nous avons eu recours dans notre étude, traitent, pour la plus part, de la pluviométrie (Angot et Moral), de l'aridité (De Martonne) et de la sécheresse (Mutin). D'autres indices se basent sur des représentations graphiques pour caractériser les différents climats ainsi que les différentes régions climatiques (diagrammes ombrothermiques de Gaussen et le quotient pluviothermique d'Emberger).

4.1. L'indice pluviométrique annuel (Moral) :

L'indice pluviométrique de Moral (IM), utilise la hauteur annuelle des précipitations. Proposé par Moral en 1964, cet indice est bien adapté pour la classification des climats dans la zone intertropicale. Il se calcule, selon la formule suivante :

$$I_M (= P / (T^2 - 10T + 200))$$

où

P : les hauteurs annuelles des précipitations en mm

T : les températures moyennes annuelles en °C

Le climat est considéré comme :

- Sec, lorsque $IM < 1$
- Humide, lorsque $IM > 1$.

Moral a aussi proposé un indice pour la classification des mois secs et des mois humides au cours d'une même année. Cette classification s'appuie sur la formule:

$$I_m = (P' / [(T^2/10) - T + 20])$$

où

P' : précipitations mensuelles en mm

T : température moyenne mensuelle en °C.

Les résultats donnent la classification suivante :

- mois pluvieux : $P > t^2/10 + t + 30$
- mois humide : $t^2/10 + t + 30 > P > t^2/10 - t + 20$
- mois sec : $t^2/10 - t + 20 > P > t^2/20 - t + 10$
- mois aride : $t^2/20 - t + 10 > P$

Tableau 6. Classification mensuelle de Moral

		Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
Les Salines	Indice	7,05	9,32	2,65	4,38	0,27	0,04	0,02	0,12	0,60	0,37	1,90	8,67
	Catégorie	P	P	P	P	S	A	A	A	S	S	H	P
Pt Bouchet	Indice	6,78	8,25	2,24	5,06	0,21	0,08	0,02	0,24	0,35	0,37	1,90	7,45
	Catégorie	P	P	P	P	S	A	A	A	S	S	H	P
Berrahal	Indice	8,13	10,95	1,49	5,22	0,34	0,04	0,02	0,28	0,50	0,98	2,07	7,27
	Catégorie	P	P	H	P	S	A	A	A	S	S	H	P
El kerma	Indice	6,06	8,53	1,81	4,47	0,11	0,08	0,04	0,19	0,32	0,23	0,71	1,53
	Catégorie	P	P	H	P	S	A	A	A	S	S	H	H
Ain Berda	Indice	5,35	8,07	2,05	4,50	0,33	0,06	0,12	0,54	0,35	0,17	1,33	6,42
	Catégorie	P	P	P	P	S	A	A	A	S	A	H	P

P=Pluvieux H= Humide S= Sec A= Aride

Comme défini précédemment, cet indice permet de caractériser le climat des mois sec et des mois humides. Les résultats de l'année 2005 sont repris dans le tableau ci-dessus.

4.2. L'indice d'aridité de De Martonne

* Notion d'aridité

L'aridité est un phénomène climatique impliquant une faiblesse des précipitations annuelles et un fort déficit de celles-ci par rapport à l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Etant un concept climatique à référence spatiale, l'aridité est différente de la sécheresse, qui est un concept météorologique à référence temporelle. Donc, une région peut être qualifiée d'aride et non une période.

L'indice d'aridité de De Martonne a été tiré à partir de la modification du facteur de pluie de Lang en 1923. Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température, selon l'équation suivante :

$$I_{DM} = (P / (T + 10))$$

où

P : les hauteurs annuelles des précipitations en mm

T : les températures moyennes annuelles en °C.

10 : constante, utilisée pour éviter les valeurs négatives lorsque la température moyenne de l'air est inférieure à 0°C.

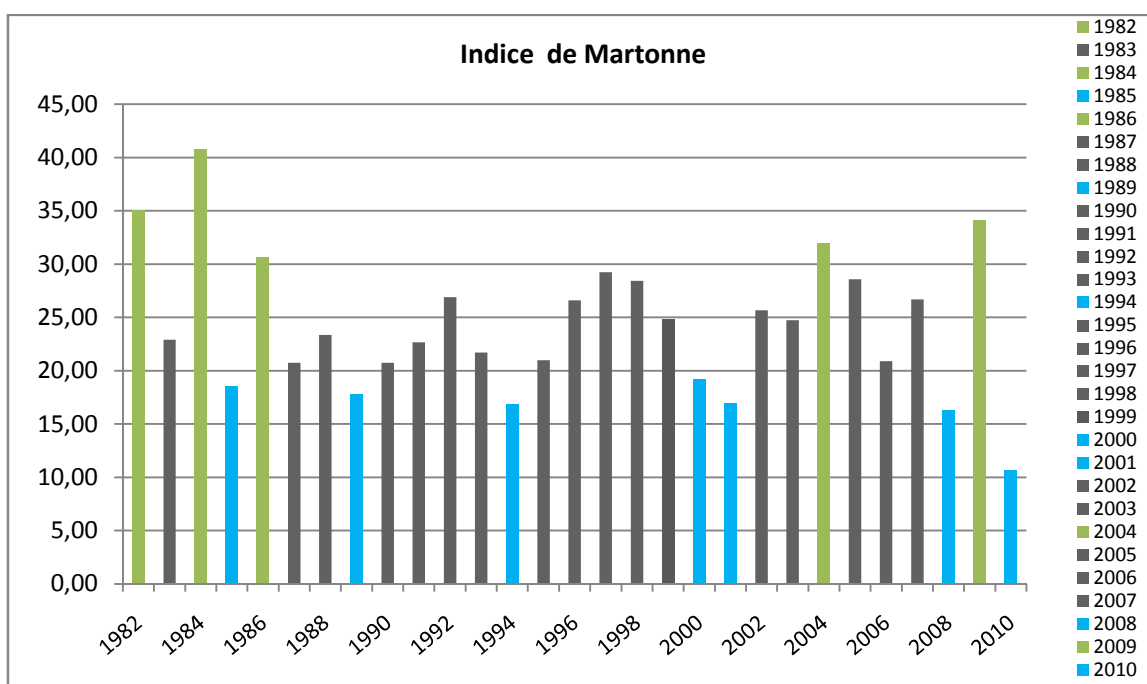


Figure 9. Evolution du climat selon l'indice de De Martonne pour la période (1982-2010)

Cet indice fait ressortir les variations du climat entre les différentes années. Pour Annaba, la tendance générale est au sub-humide, entrecoupé par des années semi-arides. La période 1982- 2010 est caractérisée par des années de climat humide avec une fréquence aléatoire.

Tableau 7. Classification des climats selon l'indice de De Martonne

Indice DE Martonne	Type de Climat	Année
$10 < I_{DM} < 20$	semi-aride	1985 -1989-1994- 2000-2001- 2008-2010
$20 < I_{DM} < 30$	semi-humide	Reste de toute la période
$30 < I_{DM} < 55$	humide	1982-1984-1986-2004-2009

4.3. Le quotient pluviométrique d'Emberger :

C'est en 1939 qu'EMBERGER préconise, pour l'étude du climat méditerranéen, l'emploi du climagramme de même nom. Ce climagramme est une tentative de synthèse climatique.

Dans un plan, défini par deux axes de coordonnées rectangulaires, sont portées les stations pour lesquelles on possède des données météorologiques. Le climat de ces stations est alors défini par deux valeurs :

- La première portée sur l'axe des ordonnées : le quotient pluviométrique Q2. Il s'obtient par la formule suivante :

$$Q2 = P \times 100 / 2(M+m) / 2 * (M-m)$$

Où

P : précipitations annuelles en mm.

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en degré °C.

m : moyenne des minima du mois le plus froid en degré °C.

- Sur l'axe des abscisses, est portée la valeur de m prise isolément.

En 1955, EMBERGER préconise un quotient pluviométrique modifié qui s'écrit :

$$Q2 = 1000 P / M + m / 2 * (M - m)$$

où :

M et m s'expriment en degrés Kelvin.

Ce climagramme a été, ensuite, amélioré par SAUVAGE en 1963 pour la région méditerranéenne, puis par STEWART (1969), formule la plus adaptée pour l'Algérie :

$$Q2 = 3,43 P / M - m$$

où :

P : pluviométrie moyenne annuelle en mm.

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en °C.

M : moyenne des minima du mois le plus froid en °C.

Ce climagramme considère qu'une région est d'autant plus sèche que le quotient est petit [S. Dekhinat, 2005].

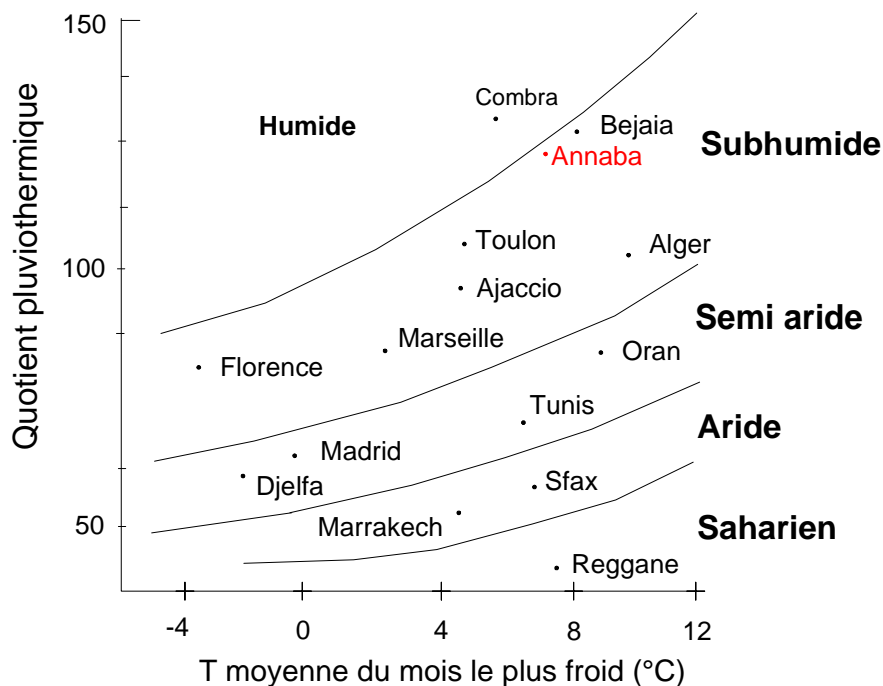


Figure 10. Exemples de climats méditerranéens selon le coefficient d'Emberger [Gyot G ; 1999].

Le quotient pluviométrique définit des types de climats, auxquels sont associés des groupes végétaux de même aptitude écologique : ce sont les domaines ou régions bioclimatiques.

Emberger distingue 5 domaines :

- Humide, subhumide, Semi-aride, aride et Désertique
- Avec des hivers : froids, frais, doux et chauds.

4.4. L'indice Ombrothermique de Gaussen

Cet indice a été proposé par Gaussen en 1952. Il est, largement, utilisé pour sa simplicité et son efficacité. L'indice de Gaussen s'exprime par un diagramme Ombrothermique qui permet de calculer la durée de la saison sèche. Il tient compte des précipitations et des températures moyennes mensuelles qui sont portées sur deux axes, sa formule est :

$$P = 2 T$$

où :

P : précipitations mensuelles en mm

T : température moyenne mensuelle en °C

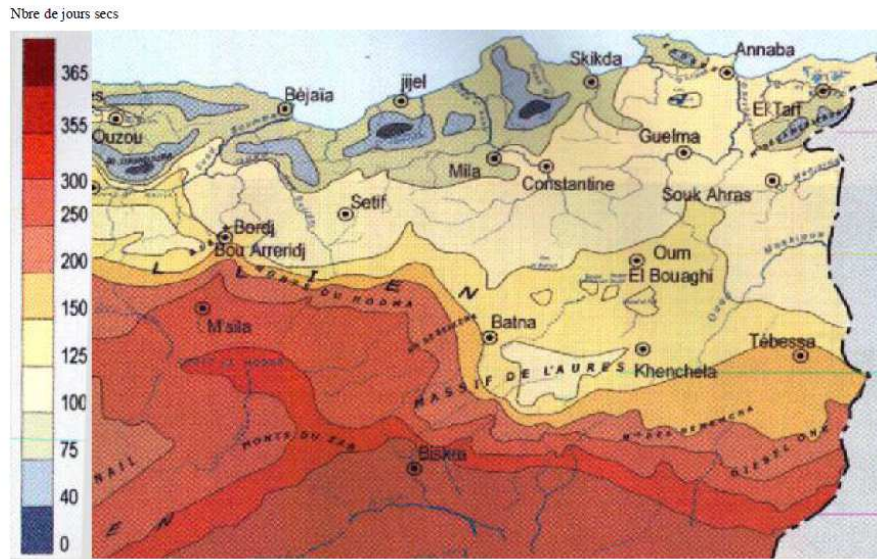


Figure 11. Carte des précipitations réalisée selon l'indice de Gaussen.

Cette représentation met en évidence les périodes sèches et les périodes pluvieuses. On souligne une période sèche, chaque fois que la courbe des précipitations passe au dessous de la courbe des températures [<http://www.wikipedia.org>. Dernière mise à jour 16/03/2013].

Tableau 8. Stations pluviométriques des sous-bassins de la Seybouse.

Station	Code	X	Y	Longitude	Latitude	Alt. (m)
Salines	60360	955.200	403.80	7 49 E	36°50 N	3
Pont-Bouchet	140631	949,976	402,826	7 45 E	36°47 N	6
El-Kerma	140609	944.600	395.5	7 41 0 E	36°45 26	14
Ain-Berda	140606	937.600	387.75	7 35 58 E	36°41 28	100

Alt. : altitude en m.

La figure suivante présente, quelques exemples de diagrammes ombrothermiques correspondant à différents types de climats.

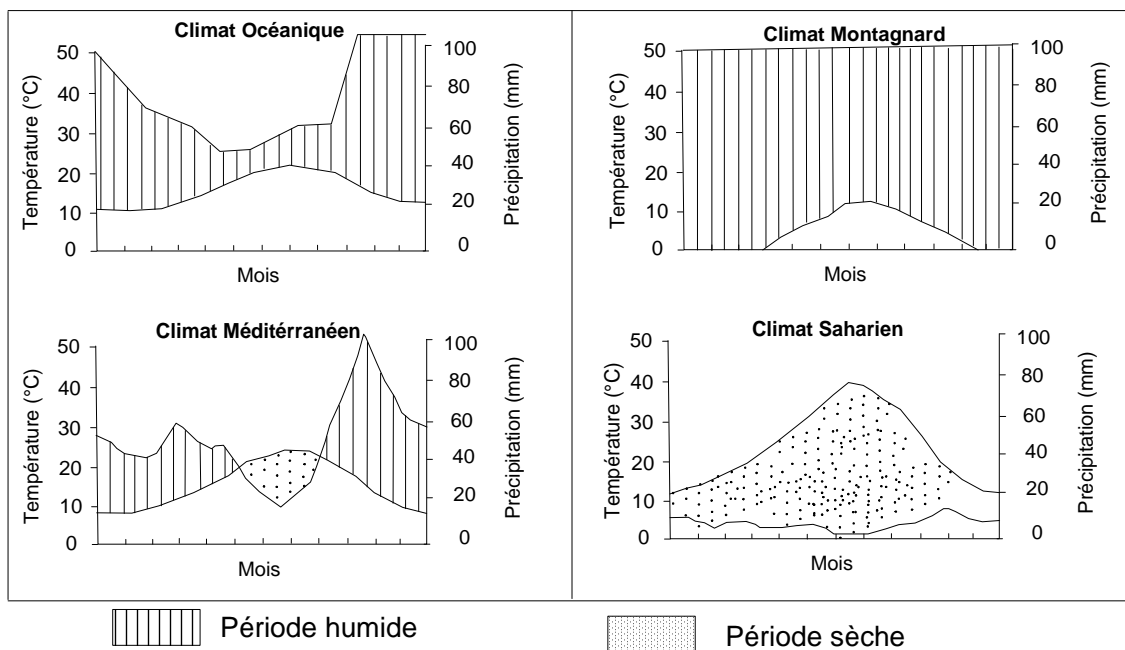


Figure 12. Exemple de diagrammes Ombrothermiques de Gaussen.

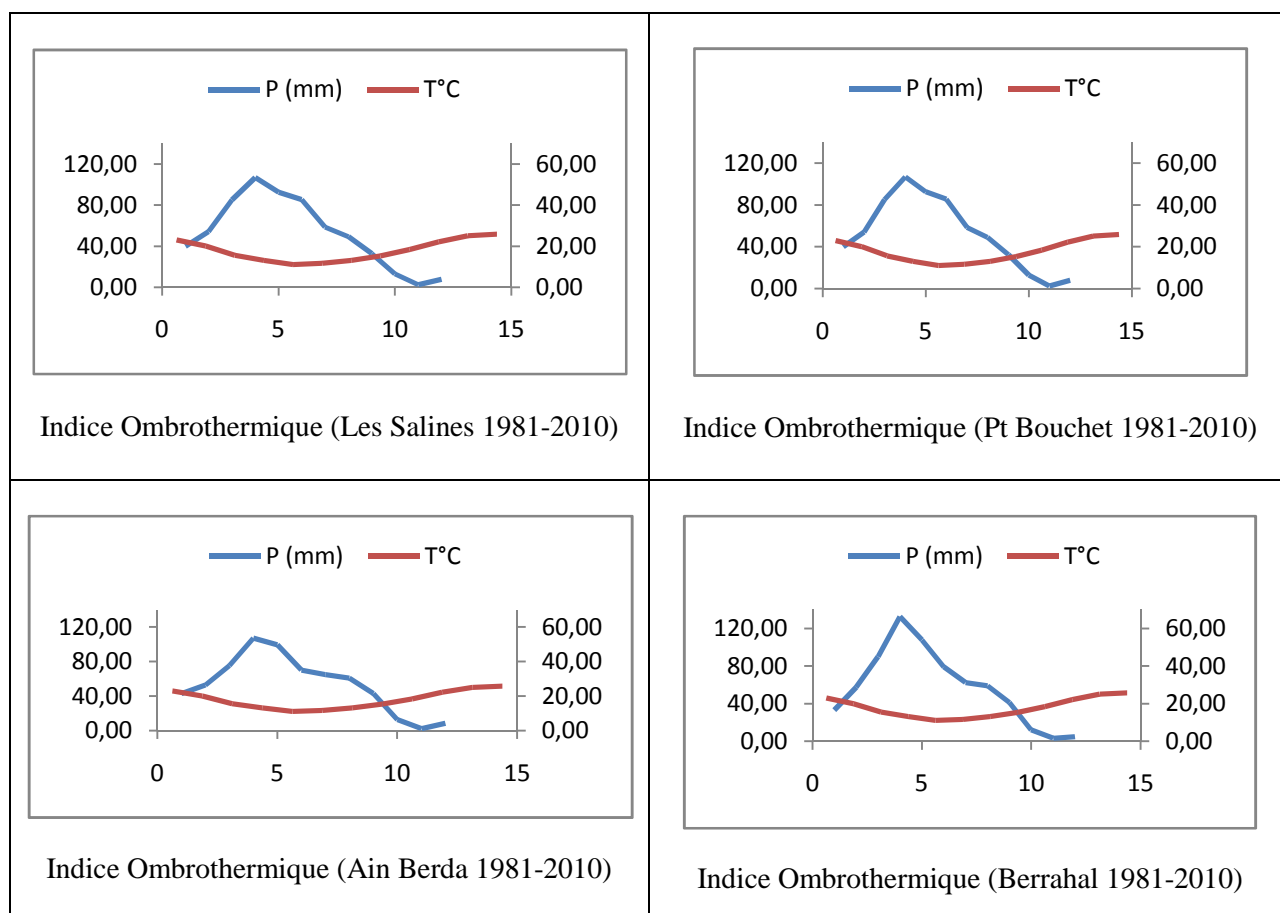


Figure 13. L'indice Ombrothermique de Gaussen, période (1981-2010)

Le diagramme Ombrothermique de Gaussen est réalisé à partir des moyennes des températures et des précipitations durant la période 1981– 2010, mais, les moyennes de cette période effacent le caractère exceptionnel de quelques années (notamment les années les plus sèches et les plus humides) et renseignent, uniquement, sur la tendance générale des stations avec un climat méditerranéen.

5. Le régime annuel :

Le coefficient pluviométrique annuel **H** est un paramètre très important pour la détermination des années excédentaires et des années déficitaires. Il est déterminé par la formule suivante :

$$H = Pi/P$$

Avec :

- P_i : pluviométrie annuelle d'une année donnée en mm.

- P : pluviométrie annuelle d'une période donnée en mm.

Si **H** > 1 : l'année correspondante est excédentaire.

Si **H** < 1 : l'année correspondante est déficitaire.

Les valeurs du coefficient pluviométrique sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau 9. Estimation des coefficient pluviométrique (1981-2010)

Année	Pi					H				
	Les Salines	Pt Bouchet	Berrahal	El kerma	Ain Berda	Salines	Pt Bouchet	Berrahal	El kerma	Ain Berda
1981-82	760,4	665,4	833,70	512,2	585,1	1,11	1,08	1,22	0,88	0,92
82-83	678,1	858,3	634,00	549,7	567,1	0,99	0,85	0,93	0,57	0,89
83-84	937,8	843,4	756,20	442,4	717,4	1,37	1,33	1,11	1,00	1,12
84-85	927	659,33	879,10	308,9	833,4	1,36	1,46	1,29	1,41	1,30
85-86	543	604,7	573,90	512,9	448,4	0,79	0,70	0,84	0,72	0,70
86-87	909,3	677,6	847,00	331,9	813,6	1,33	1,19	1,24	1,34	1,27
87-88	491	372,4	519,60	582,8	382,1	0,72	0,59	0,76	0,62	0,60
88-89	557	487,8	454,70	825,9	480,1	0,81	0,79	0,67	0,84	0,75
89-90	535	489,5	473,70	419,1	530,9	0,78	0,79	0,69	0,89	0,83
90-91	689,3	672,4	704,90	784,7	638,6	1,01	1,06	1,03	1,09	1,00
91-92	684,6	655,1	687,90	362,3	623,7	1,00	1,01	1,01	1,12	0,98
92-93	644,1	665,4	660,60	493,1	680,6	0,94	1,02	0,97	1,08	1,07
93-94	519,7	488,6	650,60	522,2	500,0	0,76	0,79	0,95	0,81	0,78
94-95	548,3	531,8	547,60	639,7	585,5	0,80	0,86	0,80	0,94	0,92
95-96	807	727,5	757,50	653	734,6	1,18	1,18	1,11	1,18	1,15
96-97	422,8	382,7	632,40	631,2	391,8	0,62	0,63	0,93	0,56	0,61
97-98	941	775,1	749,50	472,7	863,0	1,38	1,21	1,10	1,14	1,35
98-99	841	700,4	748,10	548,9	735,0	1,23	1,11	1,09	1,24	1,15
99-00	559,6	470,5	622,90	687,6	562,1	0,82	0,76	0,91	0,89	0,88
00-01	550,7	518,9	605,10	325,2	547,1	0,81	0,84	0,89	0,86	0,86
01-02	460,3	408,5	503,50	665,8	368,2	0,67	0,67	0,74	0,68	0,58
02-03	842,1	937,2	937,70	726,3	973,0	1,23	1,51	1,37	1,57	1,52
03-04	708	648,1	754,50	519,7	858,9	1,04	0,93	1,10	1,27	1,34
04-05	987,7	940,3	1068,90	503,3	842,9	1,44	1,24	1,56	1,49	1,32
05-06	612,5	536,5	590,70	469,3	574,2	0,90	0,85	0,86	0,80	0,90
06-07	647,9	651,8	697,5	601,7	594,0	0,95	1,05	1,02	1,03	0,93
07-08	543,8	587,0	555,4	596,1	528,4	0,79	0,95	0,81	1,02	0,83
08-09	862	870,1	879,8	1061,6	888,5	1,26	1,41	1,29	1,82	1,39
09-2010	626	707,6	808,1	755,1	681,0	0,92	1,14	1,18	1,29	1,07

6. Étude de la pluviométrie annuelle :

La carte des précipitations médianes du Nord Algérien pour la période (1965-95) établit par l'A.N.R.H montre que les précipitations sur notre région d'étude oscillent entre 600 et 700 mm dans la plaine d'Annaba. Par ailleurs, elles atteignent 800 mm au secteur Nord- Ouest, lame d'eau accueillie au niveau des reliefs.

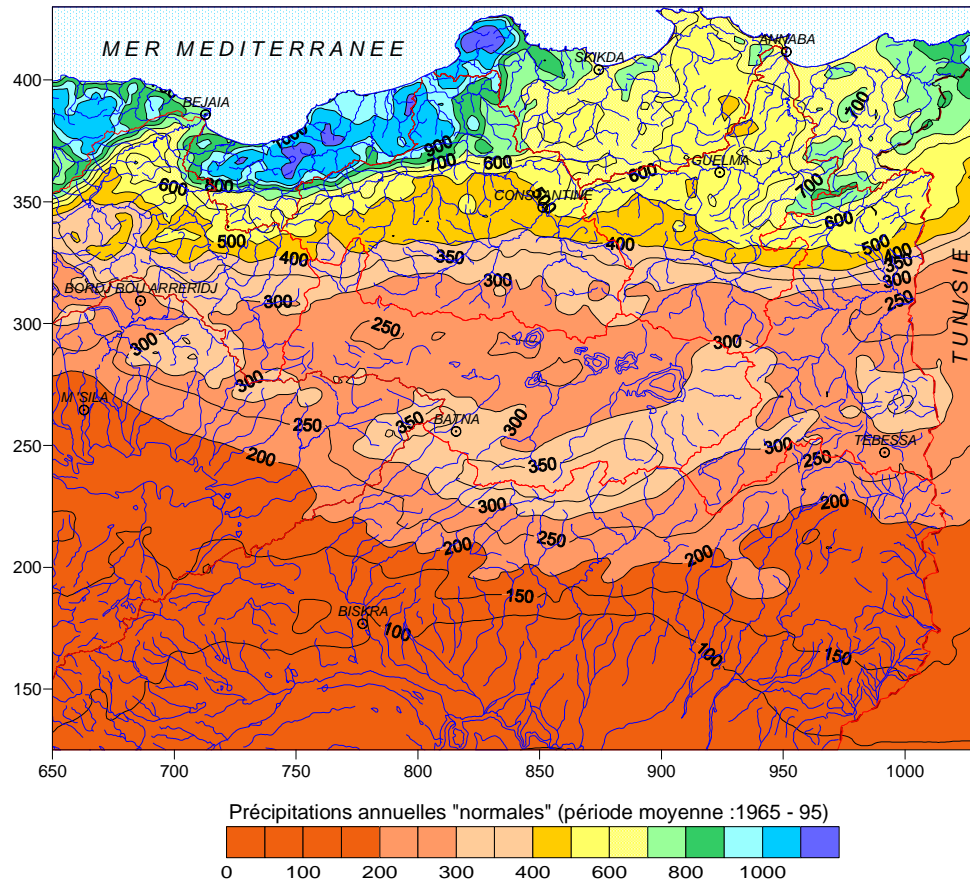


Figure 14. Précipitations annuelles médianes « normales » (1965-95) (d'après étude ANRH-GTZ ,2003).

in Azzedine MEBARKI et Jean-Pierre LABORDE
RESSOURCES HYDROLOGIQUES ET STRATEGIE
D'AMENAGEMENT ET DE PROTECTION DES EAUX :
CAS DE L'ALGERIE ORIENTALE

6.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP) :

On appelle évapotranspiration potentielle (ETP), exprimée en hauteur de lame ou tranche d'eau évaporée, la somme des quantité d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée et pendant une période bien définie, en considérant des apports d'eau suffisants.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle, on utilise la formule de Thornthwaite.

6.1.1. Formule de Thornthwaite :

C.W Thornthwaite a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle, il définit d'abord un indice thermique mensuel (i), où :

$$ETP(mm) = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \times K$$

où :

$$I = \sum_1^{12} i \quad \Rightarrow \quad i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.5}$$
$$a = \left(\frac{1.6}{100} \right) I + 0.5$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle en mm.

T : Température moyenne mensuelle (1981-2010) en °C.

i : Indice thermique mensuel.

I : Indice thermique annuel.

K : Coefficient d'ajustement mensuel dont les valeurs sous nos climats tempérés.

La carte des valeurs de l'ETP moyennes annuelles de l'Est Algérien (Fig.15) montre que dans le secteur d'étude l'ETP varie autour de 1200 et 1300 mm.

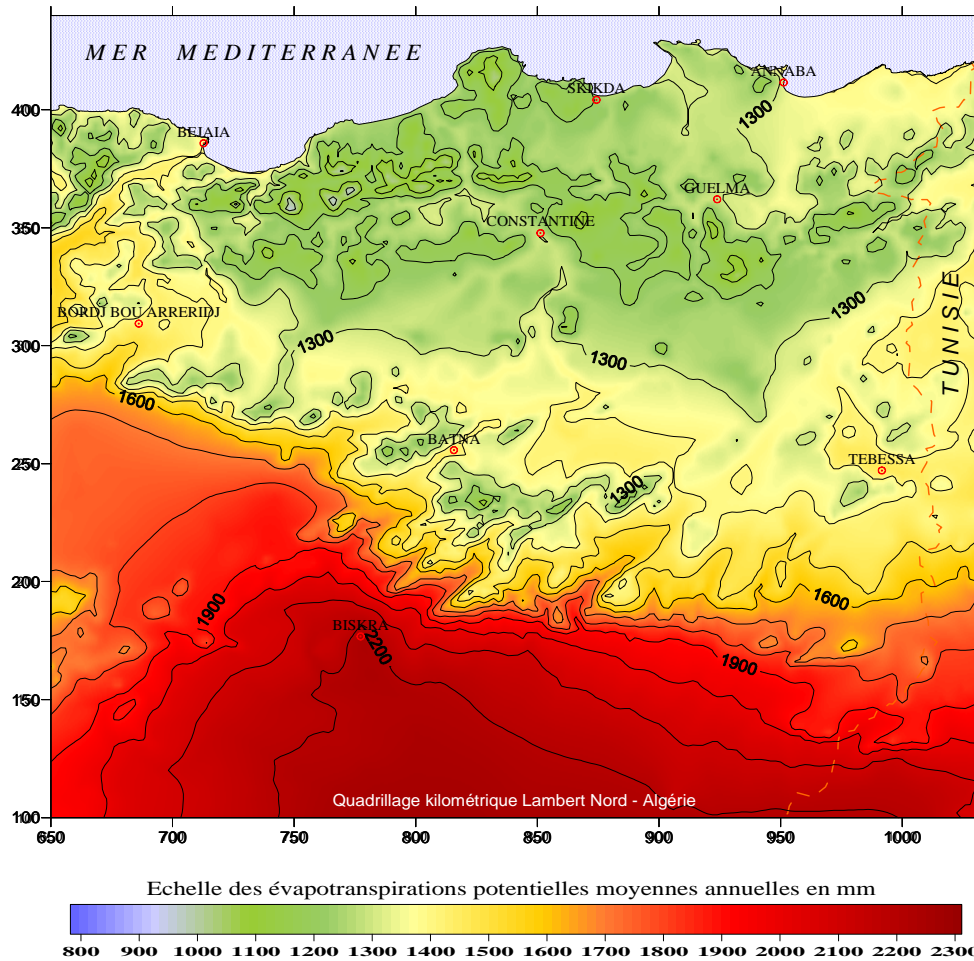


Figure 15. Carte de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne de l'Est Algérien
(D'après MEBARKI. A ; 2005 ; source : étude A.N.R.H., 2002)

6.2. L'évapotranspiration réelle (ETR) :

Par définition, on appelle évapotranspiration réelle effective actuelle ou encore déficit d'écoulement (ETR) la somme de l'évapotranspiration et de la transpiration réelle pour une surface donnée et une période définie.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) par la méthode de Thornthwaite est liée au volume de précipitation. Trois cas peuvent se présenter :

- 1^{er} cas : $P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$.

Il y a reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation, le surplus, représentera l'écoulement superficiel.

- 2^{ème} cas : $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

Dans ce cas, on puisera dans les réserves du sol jusqu'à satisfaction de l'ETP.

- 3^{ème} cas : $P < ETP$ et $RFU = 0 \Rightarrow ETR = P$.

Ici on aura un déficit qui représente la quantité d'eau à apporter pour l'irrigation (déficit agricole).

Le bilan hydrique vise à déterminer la répartition des précipitations reçues par une surface, il tient compte de :

P : précipitation brute moyenne mensuelle en (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm).

ETP : Evapotranspiration potentielle en (mm).

I : L'infiltration efficace atteignant les eaux souterraines en (mm).

R : Ruissellement qui rejoint l'oued en (mm).

RFU : Réserve facilement utilisable (le RFU = 100 mm pour les trois station).

Tableau 10. Estimation des valeurs de la RFU selon la formule de Hallaire (Brochet et al., in Habes, 2013)

Secteur	Caractéristiques du sol et profondeur d'enracinement	RFU (mm)
La plaine de Annaba	<ul style="list-style-type: none"> • Sols Argilo-limoneux : C-f = 15% • Profondeur moyenne d'enracinement : 450 mm 	100

6.3. Le bilan hydrique

Le but de l'étude du bilan hydrique est d'évaluer la répartition des quantités d'eau reçues par un bassin versant entre ses différents composants (écoulement, infiltration et évaporation).

Il est calculé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I$$

Avec : P : Précipitation moyenne annuelle en (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle en (mm).

R : Ruissellement moyen annuel en (mm).

I : Infiltration moyenne annuelle en (mm).

6.3.1. La méthode du bilan d'eau selon C.W. Thornthwaite

Elle est basée sur la notion de la réserve en eau facilement utilisable (RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (RFU), cette eau peut être reprise par l'évaporation par l'intermédiaire des plantes. Pour notre cas on prend $RFU = 100 \text{ mm}$.

La satisfaction de l'ETP est prioritaire sur l'écoulement, c'est-à-dire avant qu'il y ait écoulement il faut avoir satisfait ce qu'on appelle le pouvoir évaporant ($ETP = ETR$), par ailleurs le remplissage de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement. On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle à partir de la pluie du mois, de l'ETP et de RFU. Les résultats sont montrés dans les tableaux suivants.

Donc le bilan hydrique exprime le processus que peut suivre une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation, neige,...etc. avant de retourner à l'atmosphère on a aussi d'autres paramètres très importants pour le calcul du bilan hydrique :

CL : coefficient de latitude. Ch. : coefficient hydrique

D'après le calcul du bilan hydrique connaître :

BH : bilan hydrique (des valeurs positives ou négatives) ($BH = P - ETP$)

VR : variation de la réserve qui détermine les quantités d'eau et leur variation au niveau de la réserve souterraine.

RU : réserve utile: VR cumulée mais lorsque elle devient égale à la $RFU = 100 \text{ mm}$, la quantité restante c'est l'excédent.

DA : déficit agricole, $DA = ETP - ETR$

Tableau 11.Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite (Station des Salines 1981-1982/2009-2010)

	TP	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	23,05	10,1	1,03	105,3	39,32	-66,0	-0,6	0,0	0,0	39,3	66,0	0,0
O	20,05	8,2	0,97	76,5	70,37	-6,1	-0,1	0,0	0,0	70,4	6,1	0,0
N	15,6	5,6	0,86	42,5	84,9	42,4	1,0	42,4	42,4	42,5	0,0	0,0
D	13,1	4,3	0,81	28,9	122,58	93,7	3,2	57,6	100,0	28,9	0,0	36,1
J	11,1	3,3	0,87	22,8	103,11	80,3	3,5	0,0	100,0	22,8	0,0	80,3
F	11,67	3,6	0,85	24,5	75,36	50,9	2,1	0,0	100,0	24,5	0,0	50,9
M	13,12	4,3	1,03	36,9	68,17	31,3	0,8	0,0	100,0	36,9	0,0	31,3
A	15,3	5,4	1,10	52,4	56,51	4,1	0,1	0,0	100,0	52,4	0,0	4,1
M	18,38	7,2	1,21	81,2	38,5	-42,7	-0,5	-42,7	57,3	81,2	0,0	0,0
J	22,19	9,5	1,22	116,2	13,3	-102,9	-0,9	-57,3	0,0	70,6	45,6	0,0
J	25,08	11,5	1,24	148,4	2,46	-145,9	-1,0	0,0	0,0	2,5	145,9	0,0
A	25,84	12,0	1,16	146,7	9,46	-137,3	-0,9	0,0	0,0	9,5	137,3	0,0
Annuel	17,9	85,1		882,3	684,0	-198,2				481,4	400,8	202,6

Tableau 12.Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite Pour la station de Pont Bouchet (1981-82/2009-2010)

	TP	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	23,05	10,1	1,03	105,3	40	-65,3	-0,6	0,0	0,0	40,0	65,3	0,0
O	20,05	8,2	0,97	76,5	54,1	-22,4	-0,3	0,0	0,0	54,1	22,4	0,0
N	15,60	5,6	0,86	42,5	85,1	42,6	1,0	42,6	42,6	42,5	0,0	0,0
D	13,10	4,3	0,81	28,9	107,1	78,2	2,7	57,4	100,0	28,9	0,0	20,8
J	11,10	3,3	0,87	22,8	92,7	69,9	3,1	0,0	100,0	22,8	0,0	69,9
F	11,67	3,6	0,85	24,5	85,1	60,6	2,5	0,0	100,0	24,5	0,0	60,6
M	13,12	4,3	1,03	36,9	58,6	21,7	0,6	0,0	100,0	36,9	0,0	21,7
A	15,30	5,4	1,10	52,4	49,1	-3,3	-0,1	-3,3	96,7	52,4	0,0	0,0
M	18,38	7,2	1,21	81,1	32,6	-48,5	-0,6	-48,5	48,1	81,1	0,0	0,0
J	22,19	9,5	1,22	116,2	12,9	-103,3	-0,9	-48,1	0,0	61,0	55,2	0,0
J	25,08	11,5	1,24	148,4	2,5	-145,9	-1,0	0,0	0,0	2,5	145,9	0,0
A	25,84	12,0	1,16	146,7	7,9	-138,8	-0,9	0,0	0,0	7,9	138,8	0,0
Annuel	17,9	85,1		882,3	627,7	-254,6				454,6	427,6	173,1

Tableau 13.Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwait Pour la station de Ain Berda (1981-82/2009-2010)

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	23,05	10,1	1,03	105,3	42,54	-62,8	-0,6	0,0	0,0	42,5	62,8	0,0
O	20,05	8,2	0,97	76,5	52,55	-23,9	-0,3	0,0	0,0	52,6	23,9	0,0
N	15,60	5,6	0,86	42,5	75,11	32,6	0,8	32,6	32,6	42,5	0,0	0,0
D	13,10	4,3	0,81	28,9	107,20	78,3	2,7	67,4	100,0	28,9	0,0	10,9
J	11,10	3,3	0,87	22,8	99,17	76,4	3,3	0,0	100,0	22,8	0,0	76,4
F	11,67	3,6	0,85	24,5	70,19	45,7	1,9	0,0	100,0	24,5	0,0	45,7
M	13,12	4,3	1,03	36,9	65,00	28,1	0,8	0,0	100,0	36,9	0,0	28,1
A	15,30	5,4	1,10	52,4	60,64	8,2	0,2	0,0	100,0	52,4	0,0	8,2
M	18,38	7,2	1,21	81,1	43,06	-38,1	-0,5	-38,1	61,9	81,1	0,0	0,0
J	22,19	9,5	1,22	116,2	12,77	-103,4	-0,9	-61,9	0,0	74,7	41,5	0,0
J	25,08	11,5	1,24	148,4	2,08	-146,3	-1,0	0,0	0,0	2,1	146,3	0,0
A	25,84	12,0	1,16	146,7	8,63	-138,1	-0,9	0,0	0,0	8,6	138,1	0,0
Annuel	17,9	85,1		882,3	638,9	-243,3				469,6	412,7	169,3

Tableau 14.Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwait Pour la station de Berrahal (1981-82/2009-2010)

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	23,05	10,1	1,03	105,3	33,12	-72,2	-0,7	0,0	0,0	33,1	72,2	0,0
O	20,05	8,2	0,97	76,5	57,61	-18,9	-0,2	0,0	0,0	57,6	18,9	0,0
N	15,60	5,6	0,86	42,5	90,13	47,6	1,1	47,6	47,6	42,5	0,0	0,0
D	13,10	4,3	0,81	28,9	132,49	103,6	3,6	52,4	100,0	28,9	0,0	51,2
J	11,10	3,3	0,87	22,8	107,82	85,0	3,7	0,0	100,0	22,8	0,0	85,0
F	11,67	3,6	0,85	24,5	79,12	54,6	2,2	0,0	100,0	24,5	0,0	54,6
M	13,12	4,3	1,03	36,9	62,59	25,7	0,7	0,0	100,0	36,9	0,0	25,7
A	15,30	5,4	1,10	52,4	58,89	6,4	0,1	0,0	100,0	52,4	0,0	6,4
M	18,38	7,2	1,21	81,1	41,39	-39,7	-0,5	-39,7	60,3	81,1	0,0	0,0
J	22,19	9,5	1,22	116,2	12,08	-104,1	-0,9	-60,3	0,0	72,3	43,9	0,0
J	25,08	11,5	1,24	148,4	3,24	-145,2	-1,0	0,0	0,0	3,2	145,2	0,0
A	25,84	12,0	1,16	146,7	4,93	-141,8	-1,0	0,0	0,0	4,9	141,8	0,0
Annuel	17,9	85,1		882,3	683,4	-198,9				460,3	421,9	223,1

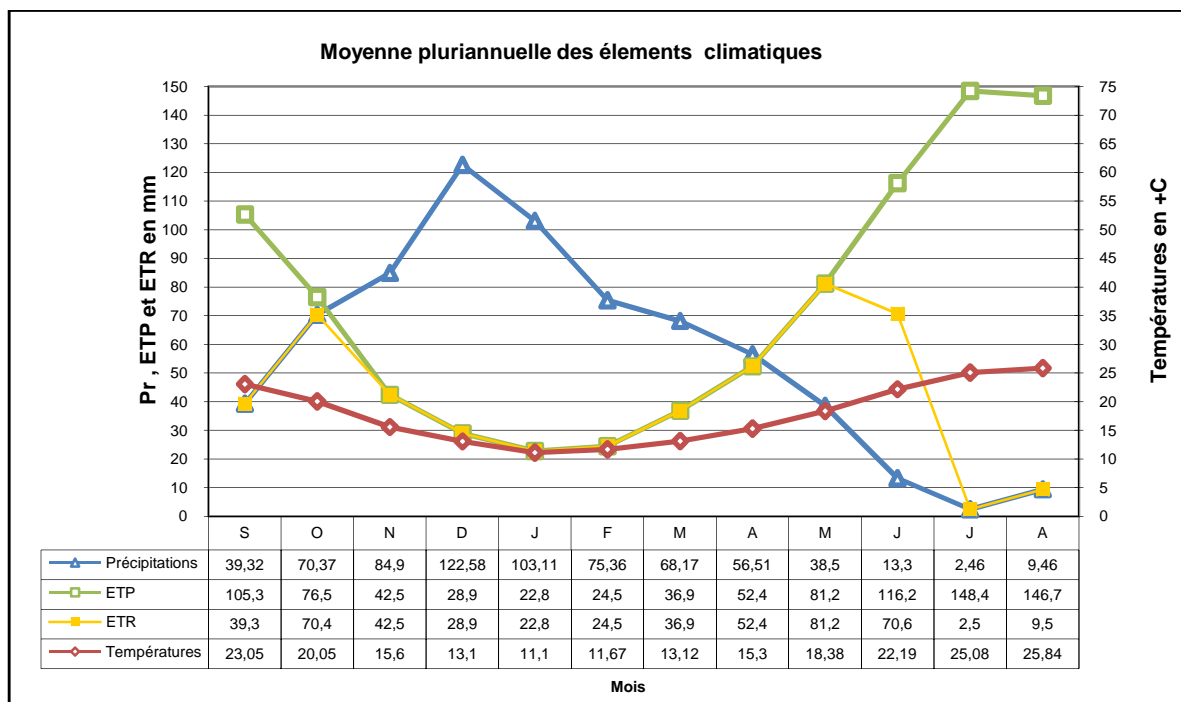


Figure 16. Graphique du bilan d'eau de la station des Salines (1981-82-2009-2010).

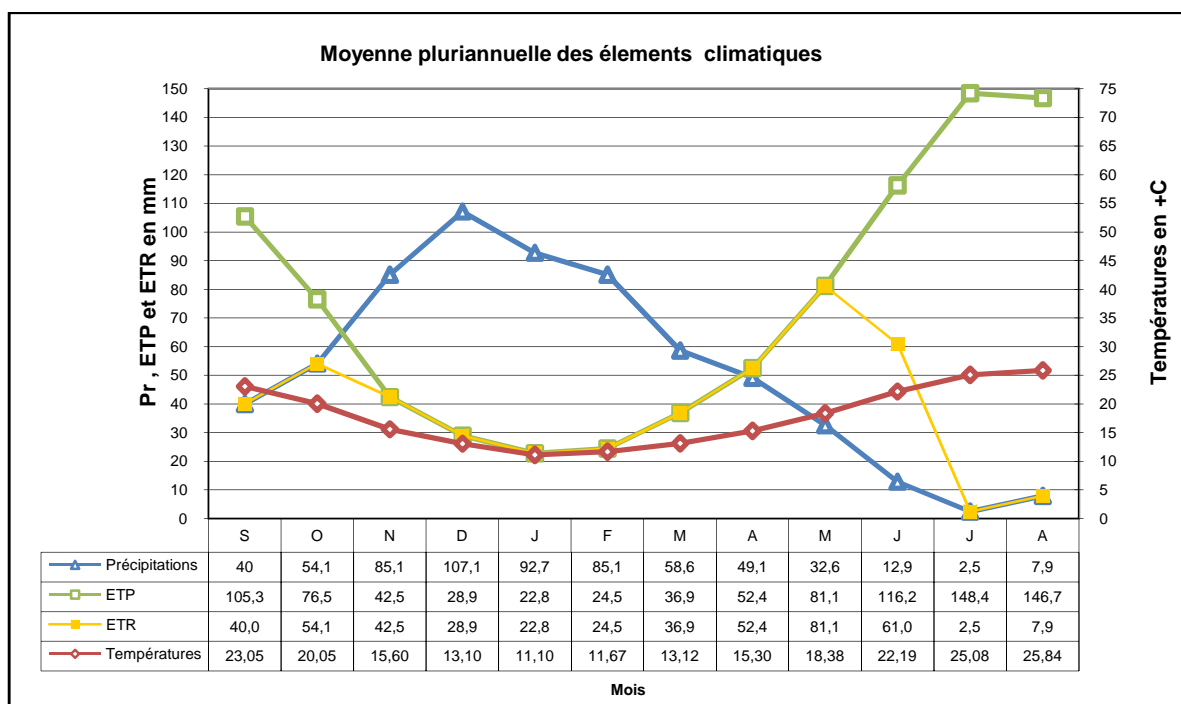


Figure 17. Graphique du bilan d'eau de la station de Pont Bouchet (1981-82-2009-2010)

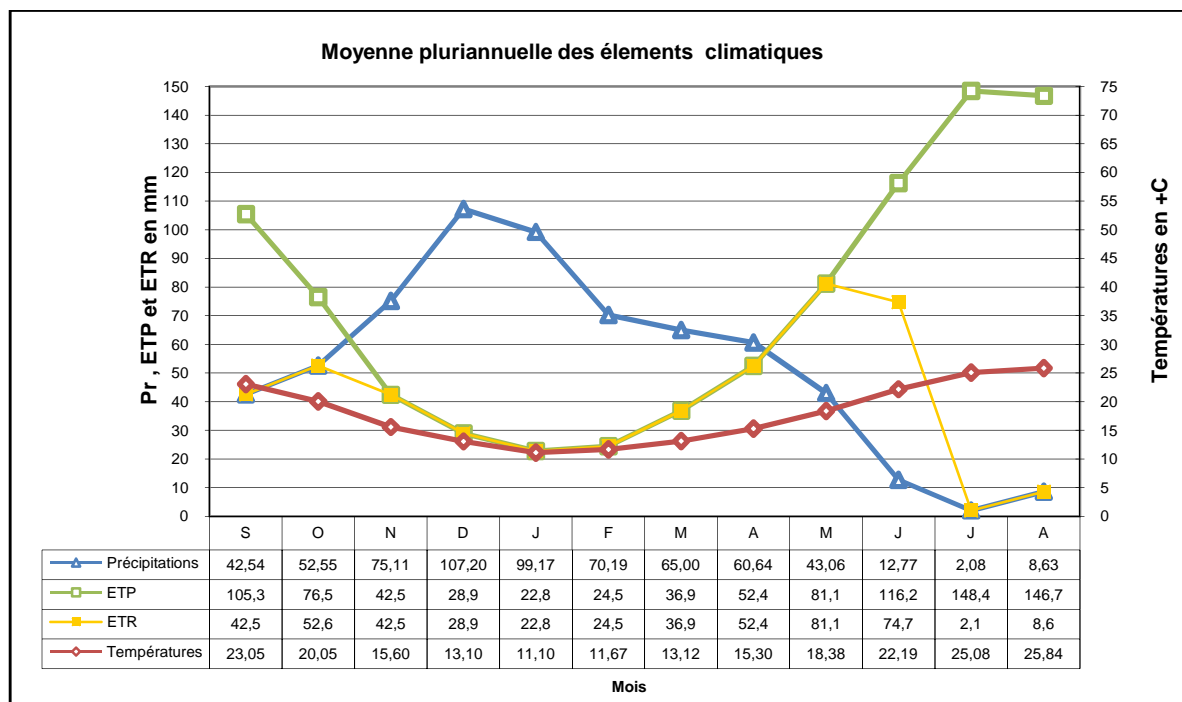


Figure 18. Graphique du bilan d'eau de la station de Aïn Berda (1981-82-2009-2010)

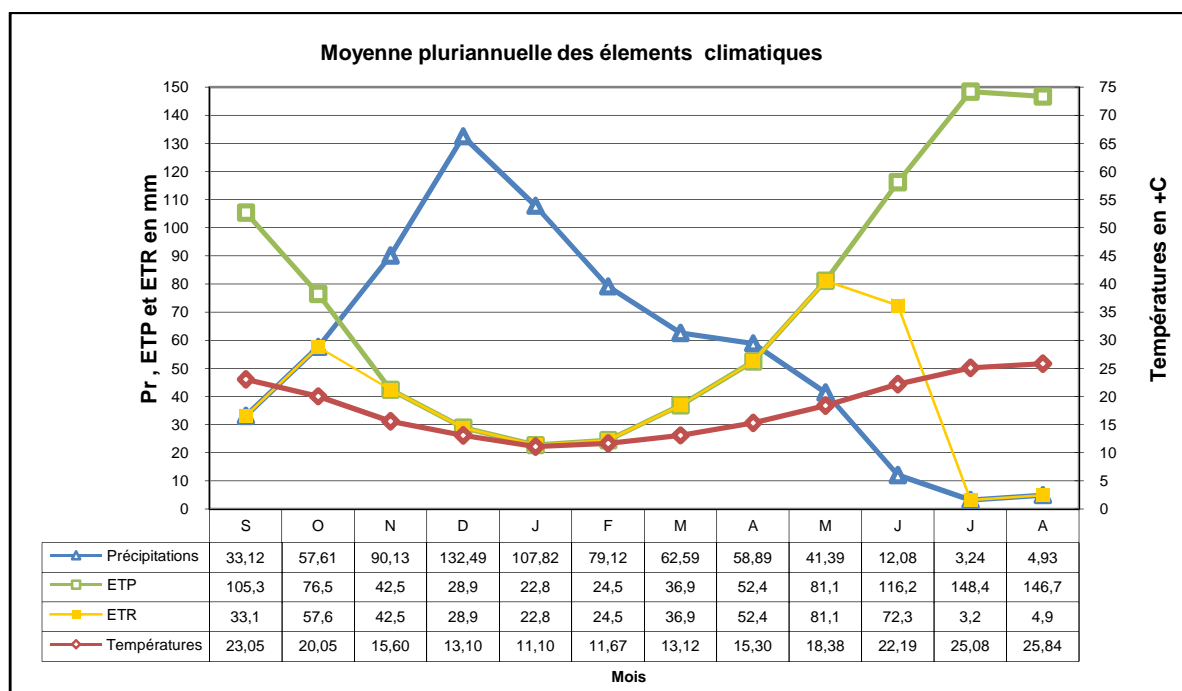


Figure 19. Graphique du bilan d'eau de la station de Berahal (1981-82-2009-2010)

6.3.2. Interprétation du bilan hydrique

Les résultats obtenus du bilan hydrique des trois stations (les Salines, Pont Bouchet, Ain berda) respectivement illustrés dans les tableaux et les graphismes précédents, nous permettent de tirer les observations suivantes :

→ La région d'étude reçoit des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 684.03 mm (Les Salines), 627.95 mm (Pont Bouchet) et une température moyenne annuelle de 17.87°C, qui se rapporte à la station des Salines.

→ L'évapotranspiration potentielle (ETP) dans les deux stations atteint son maximum au mois de Juillet (148.4 mm) et son minimum au mois de Janvier (22.8 mm). L'ETP total est de l'ordre de 882.3mm.

→ L'Evapotranspiration réelle (ETR) totale est de 481.4 mm pour la station de les Salines; 454.6 mm pour la station de Pont Bouchet.

→ La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de Novembre 42.4 mm à la station des Salines, 42.6 mm à la station de Pont Bouchet. Elle atteint son maximum (saturation : 100mm) au mois de Décembre et reste ainsi jusqu'au mois d'Avril à la station des salines, et du mois de Décembre et reste ainsi ; jusqu'au mois de Mars à la station de Pont Bouchet puis elle commence à s'épuiser pour se vider complètement au mois de Juin.

→ L'écoulement débute après le remplissage de la RFU (100mm), c'est-à-dire au mois de Décembre et se termine à la fin du mois d'Avril avec un maximum au mois de Janvier 80.3mm (les Salines), 69.9 mm (Pont Bouchet), 76.4 mm (Ain Berda), et 85.0 mm (Berrahal).

→ L'excédent annuel est égal à 202.6 mm à la station des Salines, 173.1mm à la station de Pont Bouchet.

7. Hydrologie de la zone d'étude :

Les caractéristiques géographiques, orographiques, hydrographiques, climatiques et géologiques, ainsi montrées sur la figure 20, font ressortir que les plaines de la région d'Annaba, constituées par des sols lourds et compacts, souffrent au cours de la saison pluvieuse d'un excès d'eau résultant :

- d'une part, de la pluviométrie abondante reçue sur leur impluvium
- d'autre part, des débordements et divagations des oueds dont les débits importants sont la conséquence de l'imperméabilité de leurs bassins versants montagneux;
- enfin, de la stagnation prolongée des eaux d'inondation dans toutes leurs dépressions.

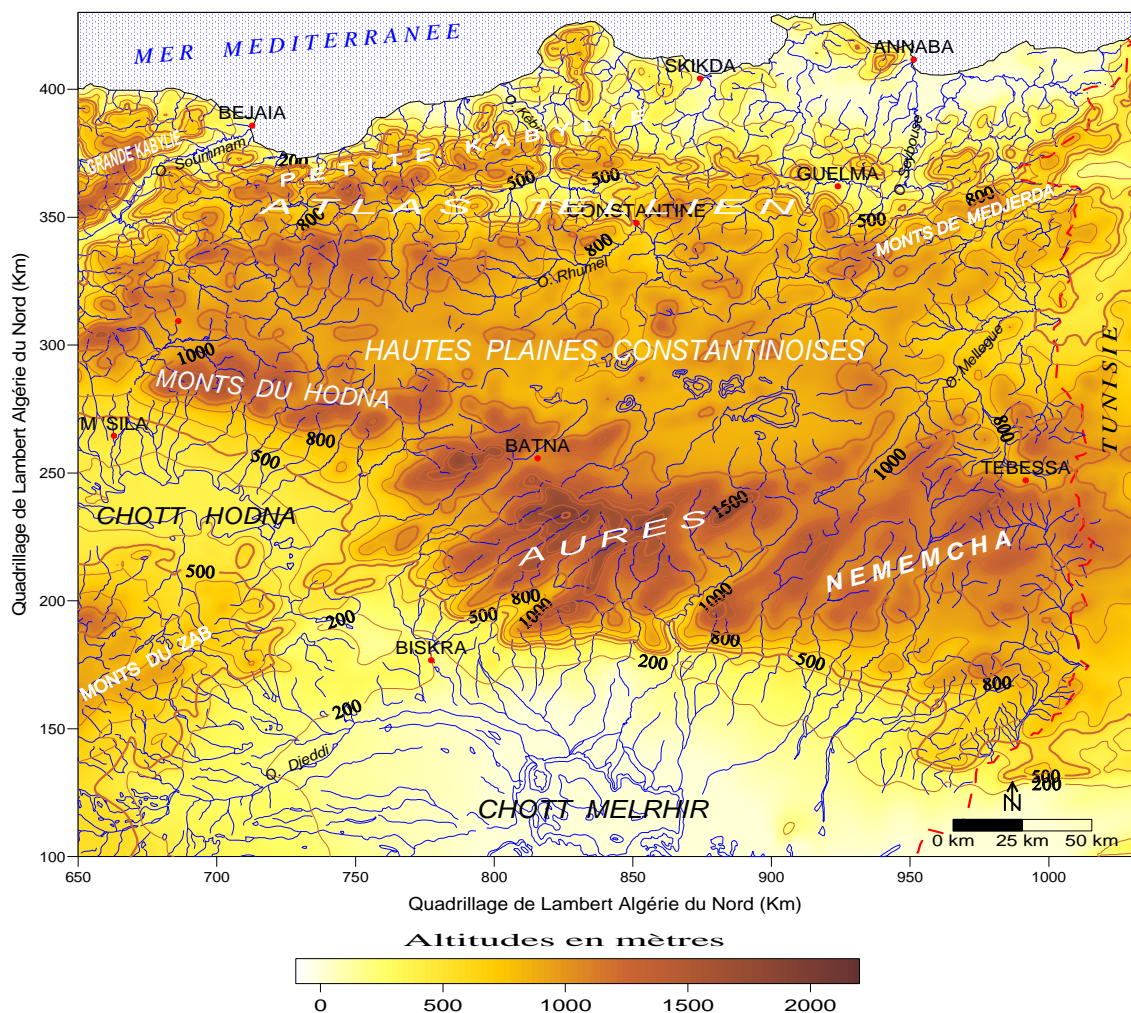


Figure 20. Oro-hydrographie de l'Algérie du Nord (Mebarki, 2005)

La région des plaines d'Annaba est traversée essentiellement par les oueds Kébir, Bounamoussa, Seybouse et son affluent à l'Ouest le Ressoul. Ces oueds contribuent pour une grande part à l'alimentation des nappes (Hani, 2003).

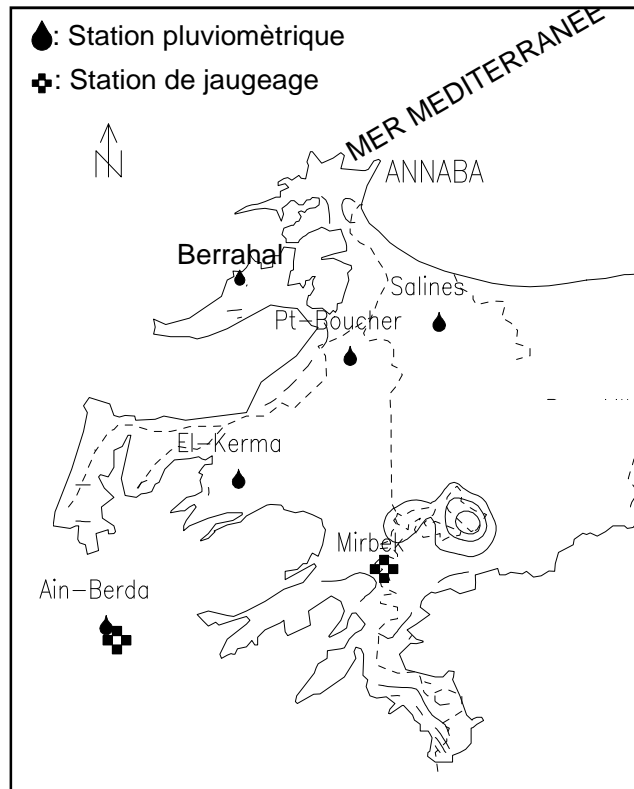


Figure 21. Localisation des stations pluviométriques de sous-bassin de la Seybouse (*in* Hani.2003) modifiée

La zone d'étude située au N d'El Hadjar entre la Meboudja et la **R.N. N° 16**, ainsi qu'une partie du terrain en amont entre la berge gauche de l'Oued Méboudja et le pied du massif du Béleleita, et du **C.W. 129**, a été assainie par un autre réseau distinct : celui d'El Hadjar, dont le collecteur débouche dans l'Oued Méboudja immédiatement en amont de son confluent avec la Seybouse.

Le collecteur général de l'ensemble des réseaux, c'est-à-dire l'Oued Méboudja dans ses cours moyen et aval, a été aménagé de manière à lui permettre d'écouler simultanément les débits des réseaux d'assainissement et un volume supplémentaire de $50 \text{ m}^3/\text{seconde}$ pour la vidange continue du Lac Fetzara.

Les ressources en eau superficielle :

Les deux grands bassins versants de la région sont drainés par les deux principaux cours d'eau, la Seybouse et la Mafragh qui sont alimentés par un grand nombre d'affluents (Derradji, 2004)

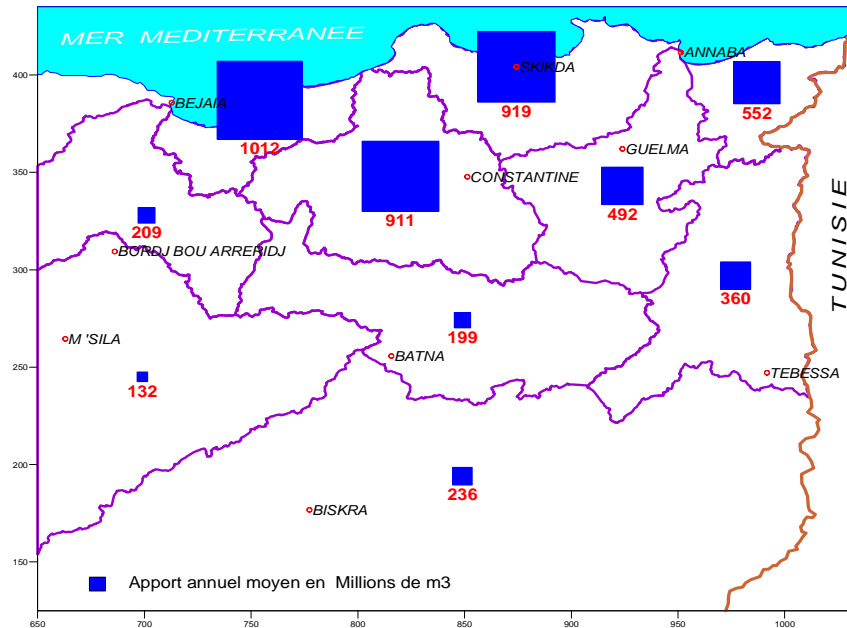


Figure 22. Ressources en eau des bassins versant de L'est d'Algérie (Mebarki, 2009)

On a ainsi (voir figure ci-dessous) le découpage des sous bassins de l'Algérie du Nord, et la plaine ; en cinq zones distinctes, desservies chacune, par un réseau particulier, constitué par un ensemble de canaux de drainage et de colature correspondant à l'assainissement de leur impluvium propre.

- On distingue donc :

- le réseau de l'oued Meboudja superieur,
- celui de l'oued Ressoul ;
- celui de l'oued Mellah ;
- celui de l'oued al Hout ;
- celui de l'oued Monaim.

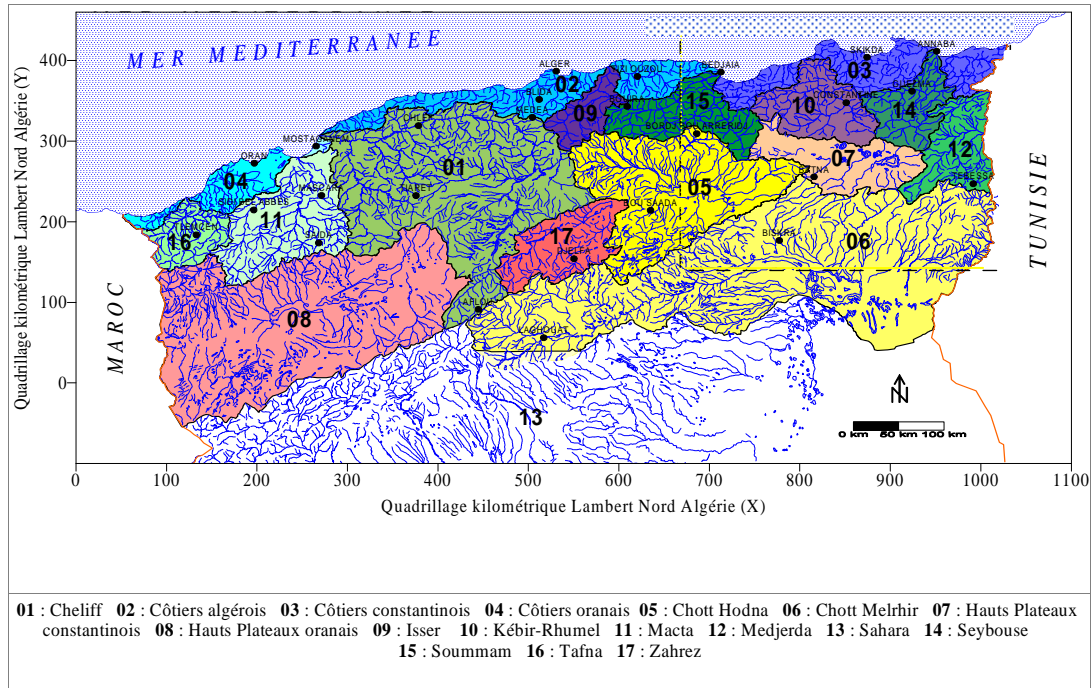


Figure 23. Carte des sous bassins Hydrographiques du Nord Est de l'Algérie (Mebarki, 2009)

Le périmètre était arrosé, ou plutôt inondé, par de nombreux oueds dont les cours sont sensiblement parallèles et orientés SW-NE. Ce sont :

- **L'Oued Méboudja supérieur**, en bordure du bourrelet oriental du Lac Fetzara et dont le bassin versant est de l'ordre de 3.400 ha ;
- **L'Oued Ressoul**, le plus important de tous dont la partie aval longe le versant W du Koudiat el Ladet ; il a son origine dans la région de Guelaat Bou-Sbaa, se développe sur 37 km et collecte les eaux d'un bassin versant de 13.150 ha environ ;
- **L'Oued Mellah**, qui longe le versant E du Koudiat el Ladet, à 9 km environ et a un bassin versant de 2.250 ha ;
- **L'Oued bou Athout**, qui draine la face N des coteaux compris entre Dréan et Aïn berda et dont le bassin versant est de l'ordre de 5.100 hectares.

La Seybouse est la plus importante de la région. Longue de 239 km, elle draine un bassin versant de plus de 6000 km².

Tableau 15. Caractéristiques morpho métriques des bassins du Nord-est algérien (Carte au 50 millièmes)

Paramètres morphométriques	Seybouse ¹	Ressoul ²
Surface (en km ²)	5960	103
Périmètre (km)	433	46
Compacité (s.d)	1.57	1.25
Longueur du rectangle équivalent (km)	182	16.9
Larguer moyenne (km)	33	6.0
Altitude minimale (m)	10	58
Altitude maximale (m)	1543	939
Altitude moyenne (m)	716	314
Indice de pente global (m/km)	5.4	27.5
Dénivelée spécifique (m)	416	284.5
Densité de drainage (km/km ²)	2.39	3.28
Pente moyenne du bassin (m/km)	20	16
Longueur du thalweg principal (km)	341	25
Coefficient de torrentialité (s.d)	10	21.6
Temps de concentration (heures)	38.6	5.5

1 : à Mirbeck , 2 : à Ain Berda,

La figure 24 suivante révèle que les plus grandes fréquences correspondent aux débits compris entre 25 et 30 m³.s⁻¹ à Mirbek, pendant les années de plus grande quantités d'eau précipitées (1972-1973/ 1984-1985/86-87). Les plus faibles fréquences correspondent, par contre, aux débits compris entre 0 et 5 m³.s⁻¹.

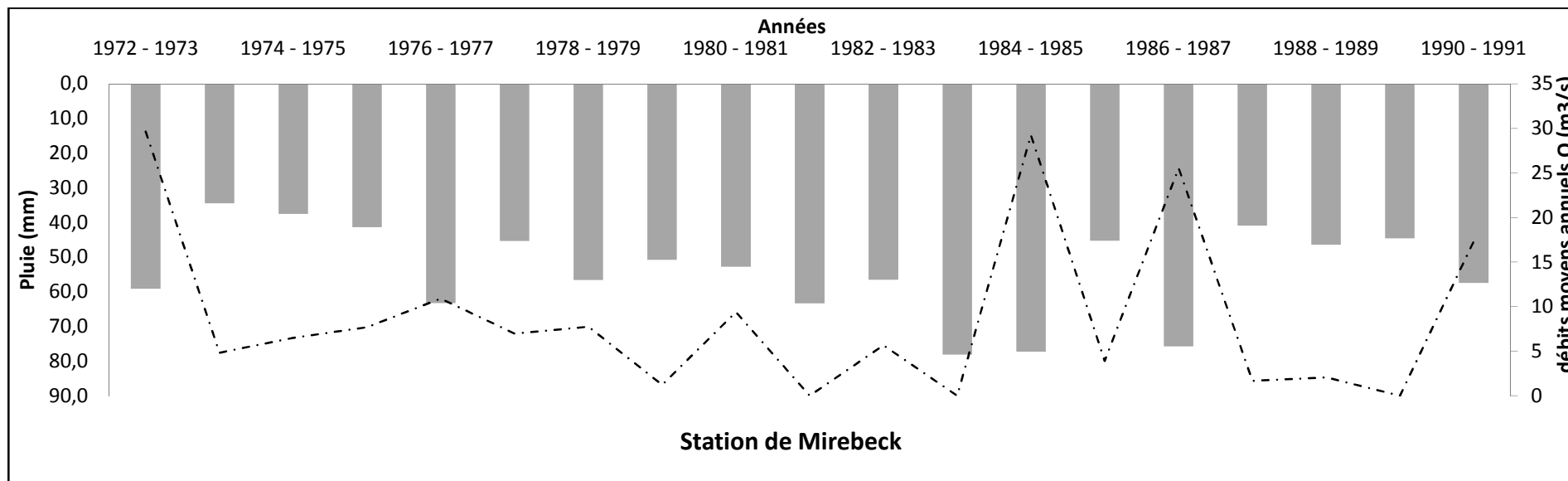


Figure 24. Variations des débits au niveau de la station de Mirebeck 1972 - 73à 1990 - 91 (sources A.N.R.H)



Figure 25. Carte des retenues collinaires dans la région d'Annaba (in Derradji F., 2004)

Les ressources en eau souterraines :

La région de Annaba recèle quant à elle plus de 60.10^6 m^3 et qui est composé des alluvions récentes et actuelles, terrasses, gneiss altérés, cordon dunaire, nappe des graviers et cipolins (Derradji, F 2004).

Tableau 16. Tableau récapitulatif des aquifères existants et leurs réserves renouvelables dans l'extrême Nord-Est algérien (Derradji, 2004)

ZONES	Les systèmes aquifères	Superficie Km ²	H _{moy} (m)	S ou m _e	Réserves renouvelables (10 ⁶ m ³)
Annaba	Alluvions récentes et actuelles	320	1.0	0.13	40
	Les terrasses	Faible potentialité hydrique			
	Gneiss altérés	67	1.2	0.02	1.5
	Cordon dunaire	10	3	0.1	3
	Les graviers	300	20	0.002	13
	Les cipolins	80	5	0.005	2
Total Annaba	SYSTEME ANNABA LA MAFRAGH				60
T. ZONES	ANNABA + EL-TARF				135

H_{moy} : hauteur moyenne ; s : coefficient d'emmagasinement ; m_e : porosité efficace

IV. – BESOINS EN EAU :

IV.1.1. – Besoins en eau potable de la zone d'Annaba – El Hadjar :

Cette zone regroupe la ville d'Annaba considérée comme le centre le plus important de l'extrême Nord-Est algérien, et l'une des plus grandes zones industrielles de la région grosse consommatrice d'eau.

IV.2. – Besoins en eau industrielle :

La région de l'extrême Nord-Est algérien dispose de plusieurs unités industrielles grosses consommatrices d'eau ainsi que de quelques unités relevant de la petite et moyenne industrie.

Après enquête auprès des services de l'hydraulique (D.H.W. DE Annaba et El Tarf), les besoins en eau exprimés par ces unités industrielles s'élèvent à 52070 m³/j soit 19 Hm³/an répartis comme suit (tableau 17) :

Tableau 17. Besoins en eau industrielle

Unités industrielles	Besoins en eau	
	m ³ /j	Hm ³ /an
Sider	38880	14
Asmidal	8640	03
Orlait	3154	1,15
Aéroport	200	0,073
Tomate (Ben M'hidi)	548	0,2
Tomate (Bouteldja)	548	0,2
Eban(el Tarf)	100	0,04
Total	52070	18,66

IV.3.3. – Besoins en eau agricole de la région d'Annaba :

En se basant sur le tableau 18, on constate que la demande la plus élevée est représentée par le périmètre d'El Hadjar (plus de 5 millions de m³/ an).

Tableau 18. Besoins en eau agricole de la région d'Annaba

Périmètre	Superficie (Ha)	Volume alloué (Hm ³ /an)	m ³ /an
Annaba	82,5	0,30	3000000
El Hadjar	1424	5,12	5120000

Conclusion :

On peut dire que la région d'étude est parmi les régions les plus pluvieuses en Algérie. La plaine de Annaba est soumise à un climat méditerranéen caractérisé par deux saisons d'inégale durée:

Une froide à précipitations dominantes (122.58 mm en Décembre) et à basse température (13.1°C en Janvier).

Une autre chaude à précipitations ne dépassant pas 2.5 mm en Juillet, à haute température (25,84 °c en Août) (station les Salines) .

Basée sur le recueil de données de l'Atlas Climatique National publié par l'ONM pour la période 1975-1984, la région d'Annaba est une région à la fois humide et ensoleillée. Le nombre moyen d'heures d'ensoleillement varie de 5 h/j en Janvier à 11.5 h/j au mois de Juillet. Pendant la période estivale (Juin - Août), cette région du pays reçoit plus de 10 heures de soleil par jour. Au cours de cette période de l'année, l'action de l'ensoleillement et de l'humidité relative de l'air (proche de 75 %) entraîne un taux d'évaporation relativement élevé.

Le bilan hydrique de Thornthwaite a montré pour une ETR (481.4 mm) (Station Les Salines) il relève également que le déficit agricole commence au mois de Juin et se poursuit jusqu'au mois de Octobre. Par ailleurs, la reconstitution de la RFU débute en Novembre, et demeure jusqu'à la fin du mois de Mai où nous assistons à un épuisement du stock.

La zone d'étude située au N d'El Hadjar entre la Meboudja et la R.N. N° 16, ainsi qu'une partie du terrain en amont entre la berge gauche de l'Oued Méboudja et le pied du massif du Béleleita, et du C.W. 129, a été assainie par un autre réseau distinct : celui d'El Hadjar, dont le collecteur débouche dans l'Oued Méboudja immédiatement en amont de son confluent avec la Seybouse. Cette zone regroupe la ville d'Annaba considérée comme le centre le plus important de l'extrême Nord-Est algérien, et l'une des plus grandes zones industrielles de la région grosse consommatrice d'eau (14 Hm³/an uniquement pour Arcelor Mittal Steel).

Partie I : Cadre général et Etude Hydro climatologique et de la région d'étude

Références bibliographiques

- A. Godard & M. Tabeaud, (1993). Les climats ; Mécanismes et Répartition, Ed : Armand Colin.
- A. Person, (1998). How Do We Understand the Coriolis Force? Bulletin of the American Meteorological Society, Vol 79, No 7.
- Anonyme, (2013). L'application des indices climatiques en Algérie orientale.
- C. P. Peguy, (1961). Précis de climatologie, Ed. Masson, p. 347.
- C. W. Thornthwaite, An Approach toward a Rational Classification of Climate Geographical Review, Vol. 38, No. 1. (Jan., 1948), pp. 55-94.
- C. W. Thornthwaite, Benjamin Holzman Measurement of evaporation from land and water surfaces Washington : U.S. Dept. of Agriculture, 1942.
- D. Laing, (1991). The Earth System: Introduction to Earth Science Wm, Ed : C. Brown.
- Degens, (1989). Perspectives in biogeochemistry. Ed. Springer.
- Derradji, F, 2004, Identification quantitative et qualitative des ressources en eau de la région d'Annaba-El Tarf (Nord Est de l'Algérie), Thèses de doctorat, Université d'Annaba
- Djamel Fadel, Aziz Laifa & Rachid Djamaï (2009) : Quantification des groupements paysagers périphériques au tronçon autoroutier Annaba – El Hadjar –Annaba, Colloque international Environnement et transports dans des contextes différents, Ghardaïa, Algérie, 16-18 fév. 2009. Actes, ENP ed., Alger, p. 41-50.
- Encyclopédie Encarta, Edition 2007.
- G. Eecourou, (1981). Climat et Environnement (les facteurs du climat), Ed : MASSON.
- G. Guyot (Octobre 1999). Climatologie de l'environnement, cours et exercices. Ed: DUNOD.
- G. Viers, J.P. Vigneau, (1990). Eléments de climatologie. Ed : Nathan. p. 77-94-224.
- Gausse Henri. Climatologie. In: Annales de Géographie. 1957,t. 66, n°353. pp. 9-14. doi: 10.3406/geo.1957.18482. Univ- st- Etienne.fr.
- Georges Amante (Ingénieur des Ponts et Chaussées Service de la Colonisation et d'Hydraulique à Bône). Les travaux d'assainissement des plaines de Bône 15 pages - n°114 - 30 janvier 1955.
- Godard. A. & Tabeaud M., (1993). Les climats ; Mécanismes et Répartition, Ed : Armand COLIN.
- Guyot G. (Octobre 1999). Climatologie de l'environnement, cours et exercices. Ed: DUNOD.
- H. Thebault, (1973). Climatologie, Editions ENAC, p. 18-19.
- Habes. S. 2013. Caractéristiques chimiques d'un lac appartenant aux écosystèmes humides du Nord de l'Algérie; Cas : Lac Fetzara Nord - Est Algérien. Thèse de doctorat, Université de Annaba. 218p.
- Hadj Said. S (2007). Contribution à l'étude hydrogéologique d'un aquifère en zone cotière : Cas de la plaine de Guerbes. Thèse de doctorat, Université de Annaba. 188p.
- <http://www.ace.mmu.ac.uk.htm>.
- <http://www.crenam>. <http://www.la.climatologie.free.htm>
- <http://www.matamiga.free.fr>.
- <http://www.meteofrance.fr>
- <http://www.wikipedia.org>.
- www.cifen.ulg.ac.be.
- J. Roulleau, (1954). La météorologie ; formation de la pluie, p. 221-230.
- J. P. Laborde, (1982). Introduction à l'étude scientifique du climat. Ed: SEDES.
- Jean Dubief. Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe de l'Algérie, 1953, 458 p., 27X22.
- L. Emberger ; Michel Godron ; Philippe Daguet ; Gilbert Long Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu : principes et transcription sur cartes perforées. 1968. 292 p.
- L. Emberger ; Michel Godron ; Philippe Daguet ; Gilbert Long. Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu : principes et transcription sur cartes perforées. 1968. 292 p.
- L. Emberger ; René Maire (1941) Catalogue des Plantes du Maroc (Spermatophytes et Ptéridophytes) : tome IV - supplément aux volumes I, II et III p. 915-1181
- M. Sorre, (1943). Les fondements biologiques de la géographie humaine. Paris, p.13-14.

- M.E.H. Benderradji, (2000). Les milieux humides de l'extrême nord-est algérien, thèse de doctorat d'état en écologie. Faculté des sciences de la vie, Université Mentouri, Constantine.
- M.K. Yau & R. Rogers, (1989). Short Course in Cloud Physics, 3th Ed of Butterworth- Heinemann, p. 304.
- Mebarki A, 1984, Ressources en Eau et Aménagement en Algérie, Le Bassin du Kebir Rhumel Algérie, Ed Office Des Publications Universitaires
- Mebarki A, 2005, Hydrologie des bassins de l'Est Algérien : Ressource en eau, Aménagement et environnement, Thèses de doctorat, Université de Constantine.
- Mebirouk Hayet 2007. Principaux acteurs de la pollution dans l'agglomération de Annaba. Effets et Développements. 2ème Colloque International sur l'Eau et l'Environnement : Sidi Fredj les 30 et 31 Janvier 2007
- P. Etienne et A. Godard, (1970). Climatologie, Ed : Armand COLIN.
- R. Emsalem, (1970). Climatologie générale. Ed : SNED, Tome 1. Alger, p. 24-31.
- S. Dekhinat, (2005). Etude des potentialités morpho-pédogénétiques des sols Aurassiens, Rapport du laboratoire de recherche APAPEZA, Faculté des sciences, Université de Batna.
- SELTZER P, 1946, Climat de l'Algérie, Institut de Météorologie et de Physique du Globe de l'Algérie, Ed Imp. La Typo- et Jules Carbonnel Réunion.
- T.L. Mcknight & H. Darrel, (2000), Winds. In Physical Geography, Ed. Prentice Hall p. 132.

**Partie 2 : « Etude géologique,
Hydrogéologique, relation nappe oued et
Hydrochimie »**

Chapitre 03 : Description de l'histoire de la Méditerranée, du cadre géologique et structural.

Chapitre 04 : Etude Hydrogéologique, relation nappe oued.

Chapitre05 : Etude des concentrations de la mobilité et de la spéciation des métaux lourds.

Chapitre 06: Etude des concentrations des métaux lourds dans les sédiments.

Chapitre III:

Description de l'histoire de la Méditerranée, du cadre géologique et structural

Introduction

L'ère quaternaire, dans laquelle nous vivons depuis un million d'année, a été surtout marquée par des variations climatiques importantes. C'est lors des périodes humides que se sont constitué les nappes phréatiques sahariennes, alors que les grands ensembles dunaires du Sahara et du Kalahari se sont modelés pendant les périodes sèches. L'évolution géologique de l'Afrique est loin d'être achevée avec un volcanisme actif en Afrique centrale, en Éthiopie et des tremblements de terre fréquents dans la région des grands lacs et surtout au Maghreb.

Il ya plus de 130 millions d'années, l'Afrique appartenait au Gondwana. Les roches cristallines précambriennes très rigides constituent l'actuel socle du continent africain. Sur ce socle précambrien, ainsi arasé, sont venus se déposer des roches sédimentaires : grés, marnes, calcaires et autres. Bordé par une mer qui occupe le Maghreb et où s'accumulent d'épaisses couches de sédiments ; il s'en dépose aussi dans plusieurs golfes marins à l'ouest comme à l'est du continent.

Histoire géologique de la Méditerranée :

La Méditerranée, telle que nous la connaissons, est une mer récente, plio-quaternaire, mais qui s'esquisse dès le Miocène. Dans sa structure actuelle, elle est constituée de la juxtaposition de bassins profonds, bien séparés les uns des autres, et de marges continentales faiblement immergées (Fig. 26).

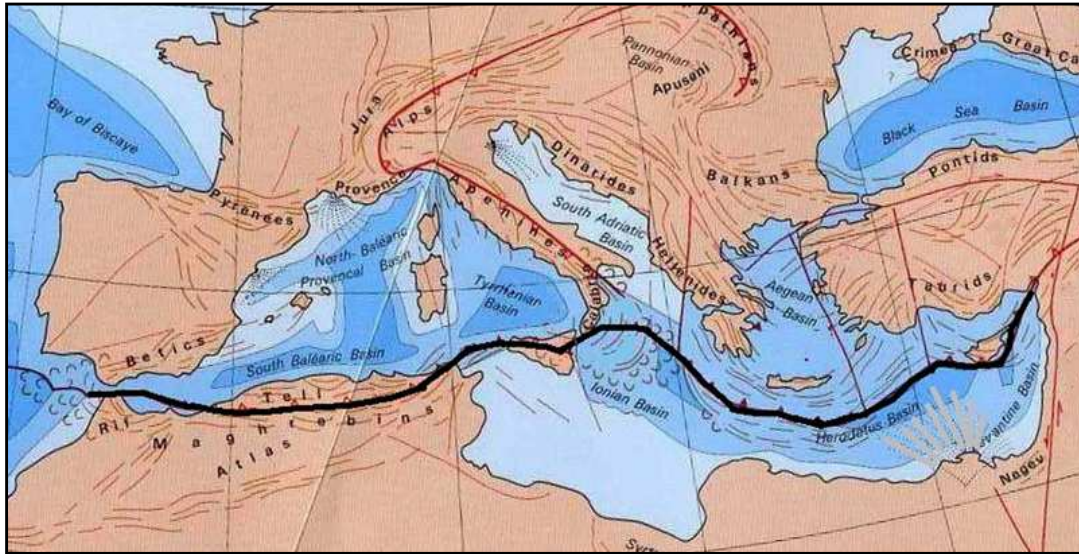


Figure 26. Carte structurale de la Méditerranée

Les premiers sont remplis de sédiments tertiaires épais qui en masquent le fond. Ce dernier n'a pas été atteint par les forages sous-marins. Néanmoins les données géophysiques indiquent la présence d'une croûte amincie et des vitesses sismiques élevées, ce qui suggère que le fond serait de nature océanique. Ils représenteraient alors le résultat d'une océanisation récente liée à des phénomènes de distension extrême.

Les bassins profonds se divisent en deux groupes. Les uns sont intérieurs aux chaînes tertiaires (bassins *algéro-provençal* et *tyrrhénien*), donc postérieurs à l'Eocène-Oligocène inférieur qui est la grande époque de plissement des chaînes méditerranéennes. Puisque leur fond est de nature océanique, ils représenteraient le résultat d'une océanisation récente liée à des phénomènes de distension extrême.

On pourrait s'étonner de la naissance de ces bassins par *distension* au cœur d'une chaîne résultant de l'écrasement de la Téthys entre les deux plaques majeures que sont l'Afrique et l'Eurasie, mais :

1. on sait que cette collision s'est d'abord faite suivant une direction NE, qui a ensuite tourné au NNW au fur et à mesure que la soudure progressait, ce qui a provoqué des tensions internes aboutissant à des déchirures de la chaîne à peine édifiée, c'est-à-dire des fissures crustales à fond de croûte océanique.

2. Les convergences inter plaques s'accompagnent généralement de phénomènes de subduction générateurs, en surface, de zones de distension (bassins arrière-arc et mers marginales)

Le bassin algéro-sud baléaire (Fig. 27) dont il a les caractères morphologiques (fond plat) et sédimentaires (âge et nature du remplissage). Il en est séparé par un faisceau de failles transformantes dont l'une interrompt l'axe des Baléares à son extrémité NE. Il est également interprété comme un bassin d'extension de type arrière-arc, devenu une mer marginale logée au cœur de l'arc orogénique éocène Calabre-Kabylie. Il montre lui aussi un volcanisme oligo-miocène calco-alcalin (sous-marin entre Sardaigne et Algérie, aérien au Maghreb).

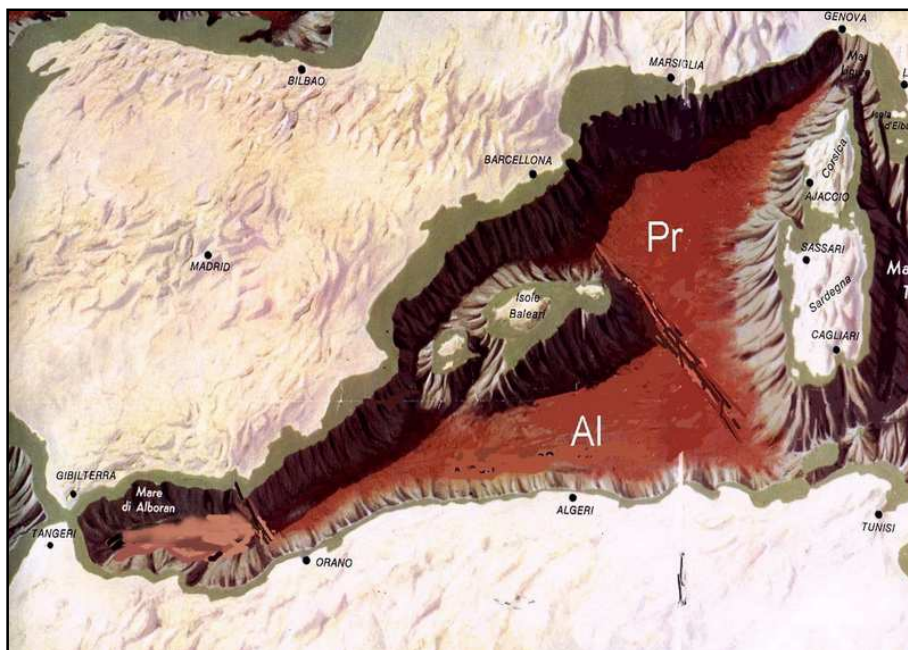
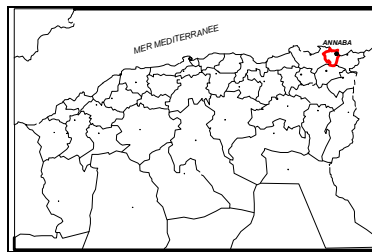


Figure 27. Le bassin algéro-sud baléaire.

Pour l'étude géologique, nous nous sommes appuyée sur des études antérieures, réalisées dans la région (Joleaud, 1936 ; Hilly, 1962 ; Vila, 1980 ; Lahondère, 1987 ; Gleizes, 1988 ; Hammor, 1992) montrent l'existence de deux types de terrains ; métamorphique et sédimentaire de la manière qui suit :

Des formations antérieures à la mise en place des nappes (le Numidien, Le Tellien) et des formations post-nappes (les formations récentes) (Marre. A, 1987).

Toutes ces unités constituent des alternances de terrains d'origine diverses du fait du charriage de ces masses de terrain, parfois sur de très grandes distances. Les formations qui les constituent sont complètement disloquées, d'où la complexité des traits tectoniques. Ces formations sont principalement d'âge tertiaire et quaternaire (Affoun S., 2006).

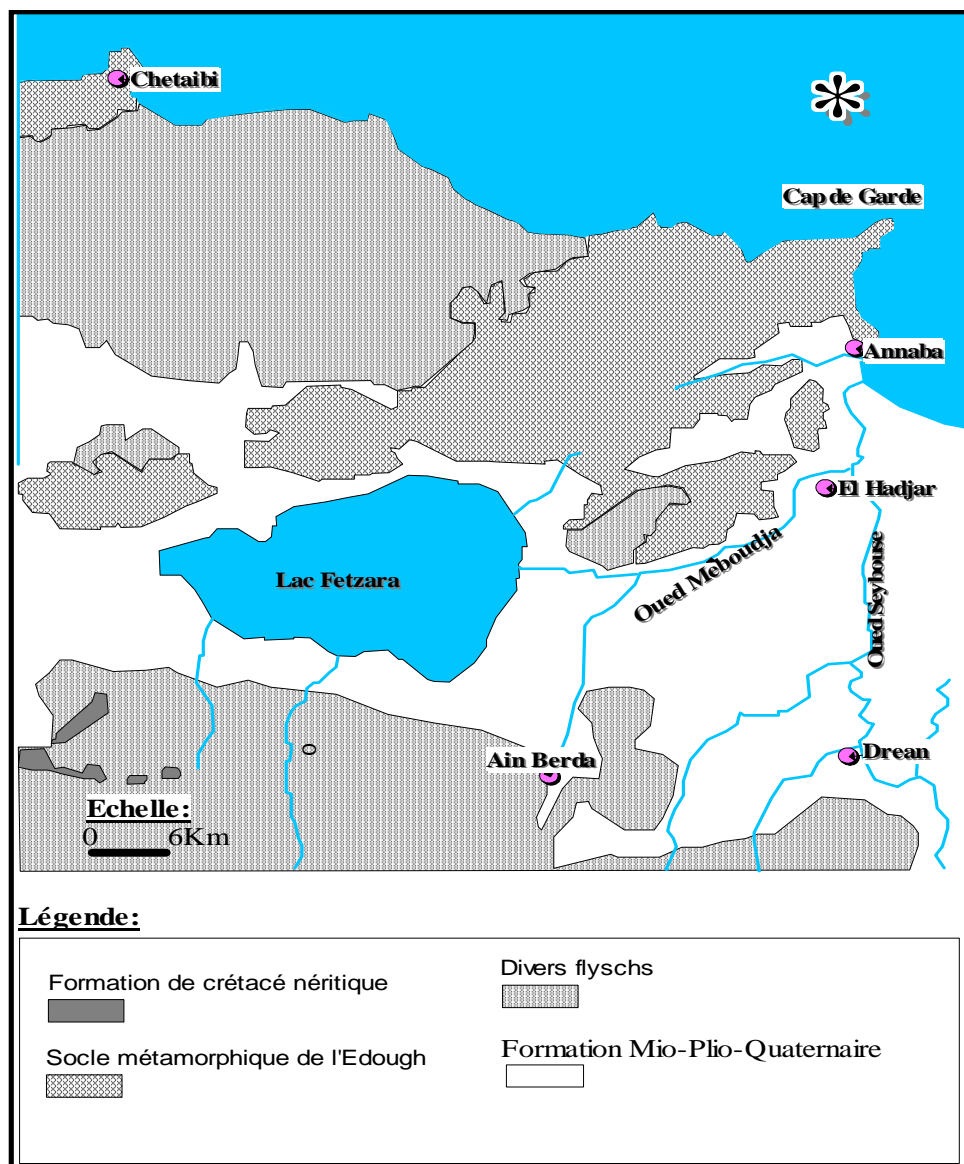


Figure 28. Esquisse géologique de la région d'étude (in Djabri *et al.* 2003, modifiée)

La Plaine de Annaba :

Depuis la fin du Tertiaire, la plaine d'Annaba correspond à un bassin d'effondrement (Graben) dans lequel subsistent quelques petits Horsts qui forment aujourd'hui les massifs gréseux du centre de la plaine (Denden et Daroussa).

La plaine d'Annaba est constituée essentiellement par des formations d'âge Mio-Pliocène et quaternaire, représentées par les faciès suivant :

- a- Faciès marin : plus ancien, caractérisé par des marnes bleues avec des intercalations calcaires.
- b- Faciès fluvial : bien développé, formé de galets, de sable, d'argile le long des oueds.
- c- Faciès continental : il est lié aux dépôts des fosses d'effondrement. Ces derniers sont déterminés par la prospection sismique, et sont au nombre de deux (Sonatrach BEICIP, 1969 ; Sâaidia, 1992 ; Hani, 2003).
 - L'une, orientée S-N, ou Fosse de Ben Ahmed,
 - l'autre, orientée SW-NE, ou Fosse de Ben M'hidi.

Ces deux fosses sont séparées par l'élévation de Daroussa. Cet effondrement s'est produit au cours du Mio-Pliocène.

L'histoire de la Plaine d'Annaba remonte probablement au début du Miocène Supérieur qui coïncide avec la régression de la Mer Miocène vers le Nord. Ce changement de niveau de base local a accentué la torrencialité, favorisant un charriage important des matériaux vers le paléo-rivage et le remplissage des fosses de la plaine.

La géométrie des fosses a largement conditionné le remplissage par les apports de conglomérats. A mesure que le remplissage s'accroît, la vitesse de la subsidence augmente, donc épaissement de la partie médiane, et amincissement sur les bords.

En effet, cette subsidence est confirmée à la surface par l'absence totale de niveau de terrasse dans la plaine. Cependant, des terrasses témoins sont restées perchées aux pieds des massifs gréseux dominant la plaine.

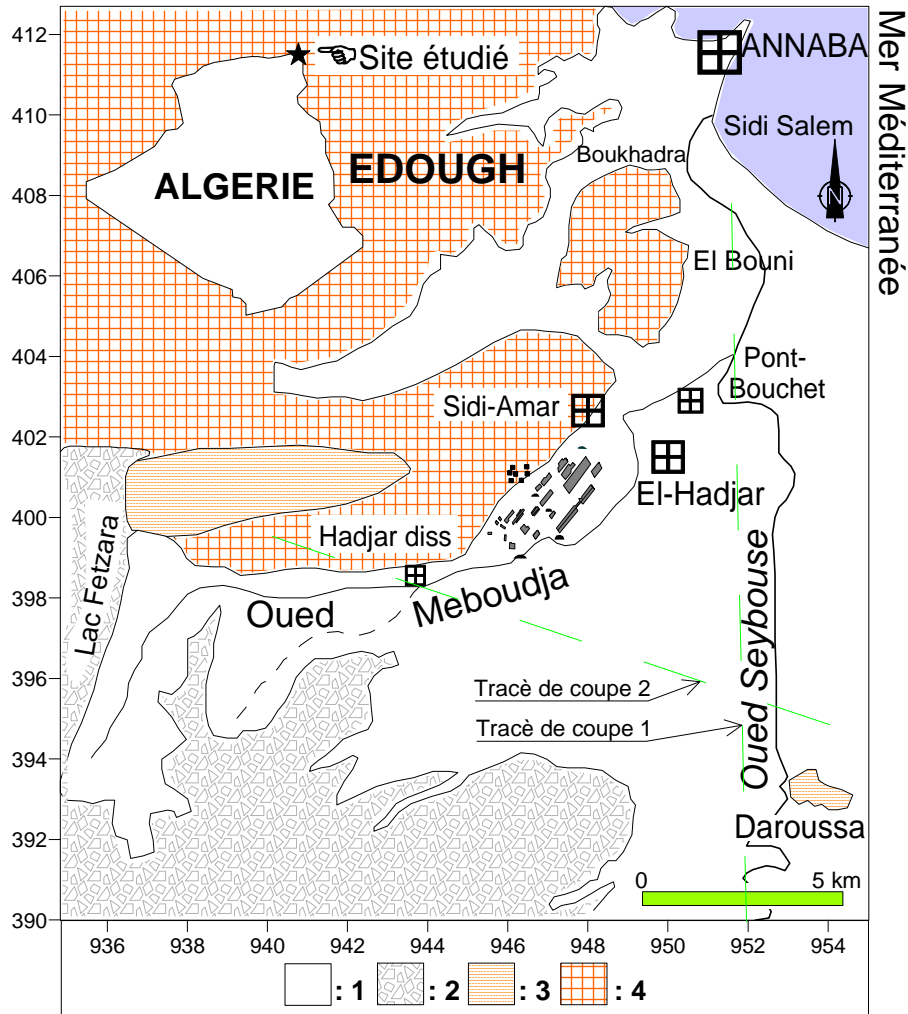


Figure 29. Carte géologique de la région d'étude (Hani, 2007)

Légende : 1 : Quaternaire indifférencié (argile, sable, limons ...) ; 2 : Alluvions de hautes terrasses ; 3 : Grès et argiles du Numidien ; 4 : Formations métamorphiques (micaschistes, cipolins et gneiss).

L'échelle stratigraphique de ces terrains se répartit du Paléozoïque au Quaternaire :

I.2.1- Le Paléozoïque :

Il affleure à l'ouest dans les massifs de l'Edough, de Belilieta et de Boukhadra. Il est constitué essentiellement par des gneiss ceinturés par des micaschistes (Hilly, 1962 ; Caby, 1992 ; Ahmed-Said, 1993). On peut distinguer les trois séries superposées suivantes :

- La série inférieure, représentée par des gneiss riches en biotite et sillimanite d'une épaisseur moyenne de 70m, cette formation constitue le cœur de l'anticlinal du massif de l'Edough ;
- La série intermédiaire, caractérisée par des schistes et des micaschistes riches en biotite, muscovite et du grenat et parfois avec des feldspaths souvent visibles à l'œil nu. Cette

série contient des marbres qui s'intercalent dans les formations des micaschistes sous forme de skarns ;

- Série supérieure, constituée par un ensemble de gneiss ocellés, schistes satinés, micaschistes, grenats et amphibolites.

Les accidents tectoniques connus jusqu'à ce jour dans le massif de l'Edough permettent de déceler deux familles d'accidents :

- une première famille, dont l'orientation est NW-SE. La direction la plus fréquente de ces accidents varie de N 120° E à N 150°E.
- la seconde famille, qui semble être conjuguée à la première, est dirigée NE-SW.

I.2.2- Le Mésozoïque :

Le Mésozoïque affleure également en dehors de la région d'étude, dans la partie sud, au niveau de la région de Guelma et de Bouchegouf, située à une quarantaine de km au sud du secteur étudié. Il est constitué par :

- Le Trias, formé par une association de dolomies, calcaires dolomitiques et de gypse ;
- Le Jurassique, représenté par des dolomies noires et des schistes calcaireux ;
- Le Crétacé qui comporte des calcaires dolomitiques riches en foraminifères et des débris de rudistes.

Seul le Crétacé supérieur (Sénonien) est représenté dans la région, il occupe presque la totalité des monts de la Cheffia. Il est caractérisé par un faciès schisteux plus au moins argileux. Parfois il s'agit aussi d'un passage de calcaire avec alternance de marnes ou de microbrèches épais de 5 à 10cm. Quelques forages de reconnaissance répartis dans la cuvette de la Cheffia et réalisés dans le cadre d'une étude géologique au droit de l'emplacement du barrage et de la galerie d'amenée ont recoupé ces faciès.

I.2.3- Le Cénozoïque :

Il est représenté par :

- l'**Eocène inférieur** représenté par une série transgressive formée par des calcaires massifs à faciès épi néritique ;
- l'**Oligocène** qui comporte des niveaux d'argiles numidiennes rencontrées dans toute la partie Sud de la région d'étude (monts de la Cheffia), au Sud-Est de Bouteldja et dans les djebels Koursi, Bourdim et Oum El-Agareb. Ce faciès argileux, de couleur verdâtre, brunâtre ou bleu sombre, comprend parfois des intercalations de lentilles gréseuses pouvant aller d'un cm à 30 cm d'épaisseur. Localement, quartziteux et renfermant parfois de petits nodules de

pyrite, l'ensemble des formations peut atteindre plus de 100m d'épaisseur. Ces argiles, formant la base de la série numidienne, ont été datées de l'Oligocène moyen à supérieur (Lahondère, 1987). Au-dessus de ces formations argileuses viennent se superposer les grès numidiens en position allochtone d'âge aquitanien (Rouvier in Ramdani, 1996), à grains hétérométriques allant du grain grossier au grain fin. Ces grès, épais de près de 150m, sont bien représentés au sud de la région d'étude, à l'Est dans le djebel Bourdim et au nord-est dans le djebel Koursi. Ils ceinturent les formations alluvionnaires et surtout dunaires.

- **le Mio-Pliocène** représenté par les faciès suivants :

✓ Faciès fluviatil ; bien développé dans la plaine d'Annaba, il est formé essentiellement de galet, de sable et d'argile le long des Oueds ;

✓ Faciès marin (Plaisancien) ; caractérisé par des marnes bleues avec des intercalations calcaires ;

✓ Faciès continental : est lié aux dépôts des fosses d'effondrement. En effet, la prospection par sismique réflexion a mis en évidence l'existence de deux fosses (SONATRACH, 1969 ; Strojexport, 1975) :

- La fosse de Ben-Ahmed, orientée S-N,

- La fosse de Ben-M'hidi, orientée SW-NE.

Ces deux fosses sont séparées par le haut fond de Daroussa (ou élévation de Daroussa), cet effondrement s'est produit au cours du Mio-Pliocène. Ces dépôts forment une série continentale argilo-sableuse avec des lits de conglomérats constituant le réservoir de la nappe captive des plaines de Annaba-Bouteldja.

I.2.4- le Quaternaire :

Les formations dunaires et alluvionnaires d'âge quaternaire constituent la roche réservoir du système aquifère de Annaba-Bouteldja. On y distingue :

- Quaternaire ancien (hautes terrasses) : correspond à la nappe superficielle dont le matériau est composé de sables, d'argiles, de graviers et de conglomérats de petite taille dominant cette formation.

- Quaternaire récent : correspond à la basse et à la moyenne terrasse.

✓ La moyenne terrasse est représentée par des terrasses alluvionnaires des oueds de 20m, correspond aussi à la terre cultivable (terre, argile, sable).

✓ Basse terrasse est formée par des alluvions du niveau des eaux actuelles des oueds. Ces terrasses sont plus limoneuses que sableuses et sont parsemées de marécages.

- Quaternaire actuel :

✓ Les alluvions sont représentées par des dépôts du lit actuel de l'Oued, généralement de matériaux variés, argiles, sables et des cailloux, résultant de l'érosion des formations traversées par l'Oued.

✓ Le cordon dunaire représenté par un massif constitué essentiellement de sable d'origine marine. Il affleure largement entre le village de Chatt et la ville d'El-Kala.

La Plaine de Annaba-Bouteldja, aux reliefs très peu marqués comporte des limites naturelles (Fig. 29) avec la Mer Méditerranéenne, au Nord, ii) les reliefs du Massif de l'Edough, à l'Ouest, aux formations cristallophylliennes paléozoïques, iii) des Monts de la Cheffia et d'El-Kala, au Sud, plus orientaux dont les unités numidiennes, allochtones, d'argile et de grès recouvrent le socle. Dans la Plaine, ces ensembles sont masqués par des dépôts récents, comblement de deux bassins sédimentaires principaux, identifiées par la géophysique (Sonatrach, 1966 ; Strojexport, 1975) avec un graben NS, la fosse Ben-Ahmed, sous la plaine de la Seybouse, et un graben SSW-NNE à WSW-ENE, la fosse Ben-M'hidi, sous celle de l'oued Kébir et le massif dunaire oriental (Fig. 31).

Ces deux fosses sont limitées par des failles à très forts pendages (60 à 80°) et séparées par un horst, subméridien, représenté par l'élévation de Daroussa à laquelle appartient, dans la partie méridionale, la Butte de Daroussa.

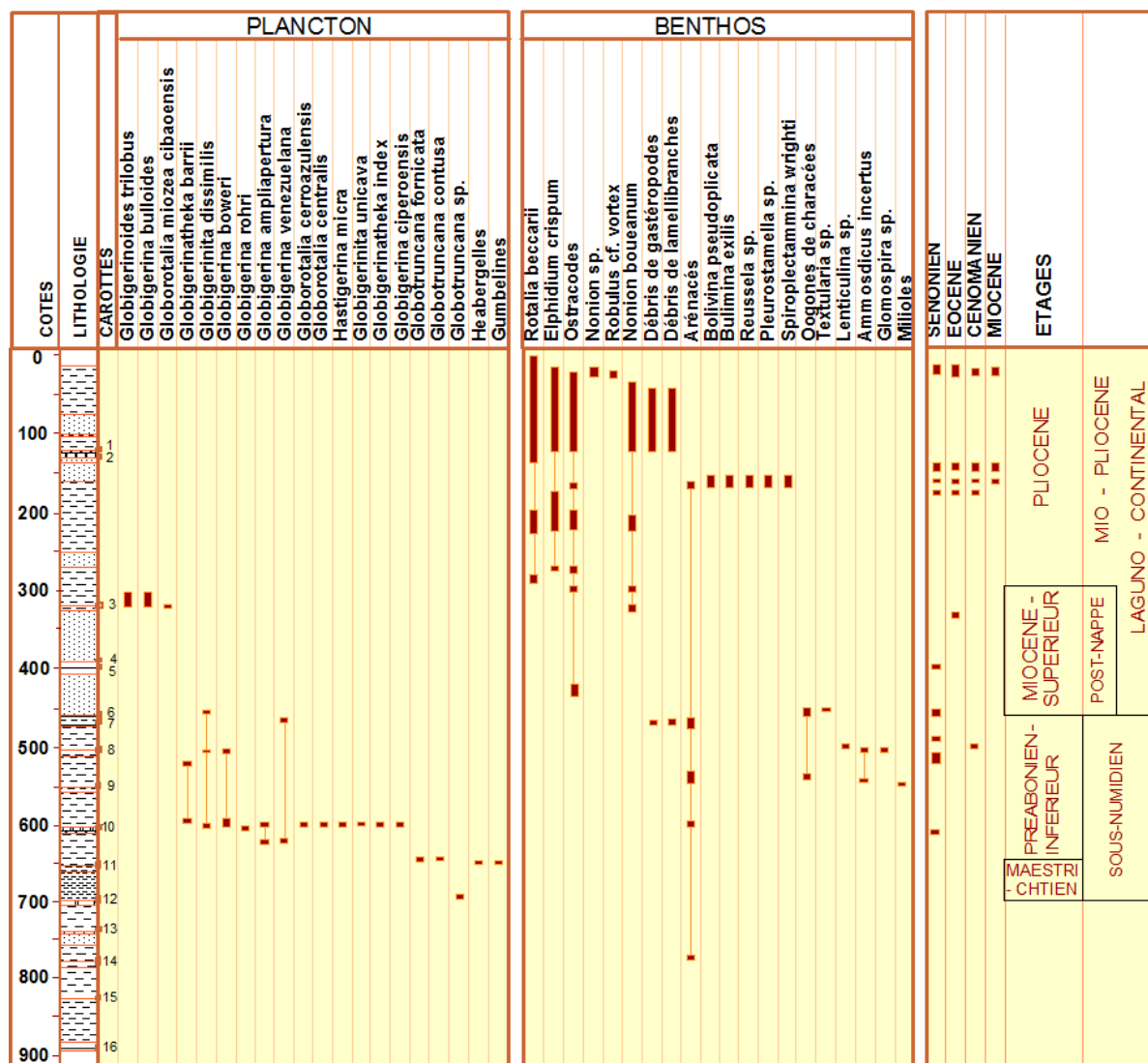


Figure 30. Log micropaléontologique du sondage BAD 3 (Sonatrach, 1969)

Le remplissage très hétérogène des deux fosses (Joleaud, 1936 ; Gaud, 1976 ; Vila, 1980), avec des alternances d'argile, de sable et de graviers, est marqué par de brutales variations de faciès dans l'espace et dans le temps.

Schématiquement (Fig.31), nous pouvons distinguer quatre faciès principaux avec, à la base, une couche de marnes miocènes de plus de 150 m d'épaisseur surmontée par 60 à plus de 100m d'argiles détritiques plio-quaternaires, puis par des lentilles de graviers et de galets séparées par de fines couches d'argiles. Ces dernières sont elles-mêmes recouvertes par des argiles sableuses (0 à 70m). Dans le secteur NE de la région, une épaisse couche de sable dunaire se superpose aux formations antérieures.

L'ensemble de ce dispositif est affecté par deux familles de failles à forts pendages, de directions respectives NE-SW et NW-SE qui apparaissent tardives vis-à-vis des sous-bassins constitués et de leurs remplissages.

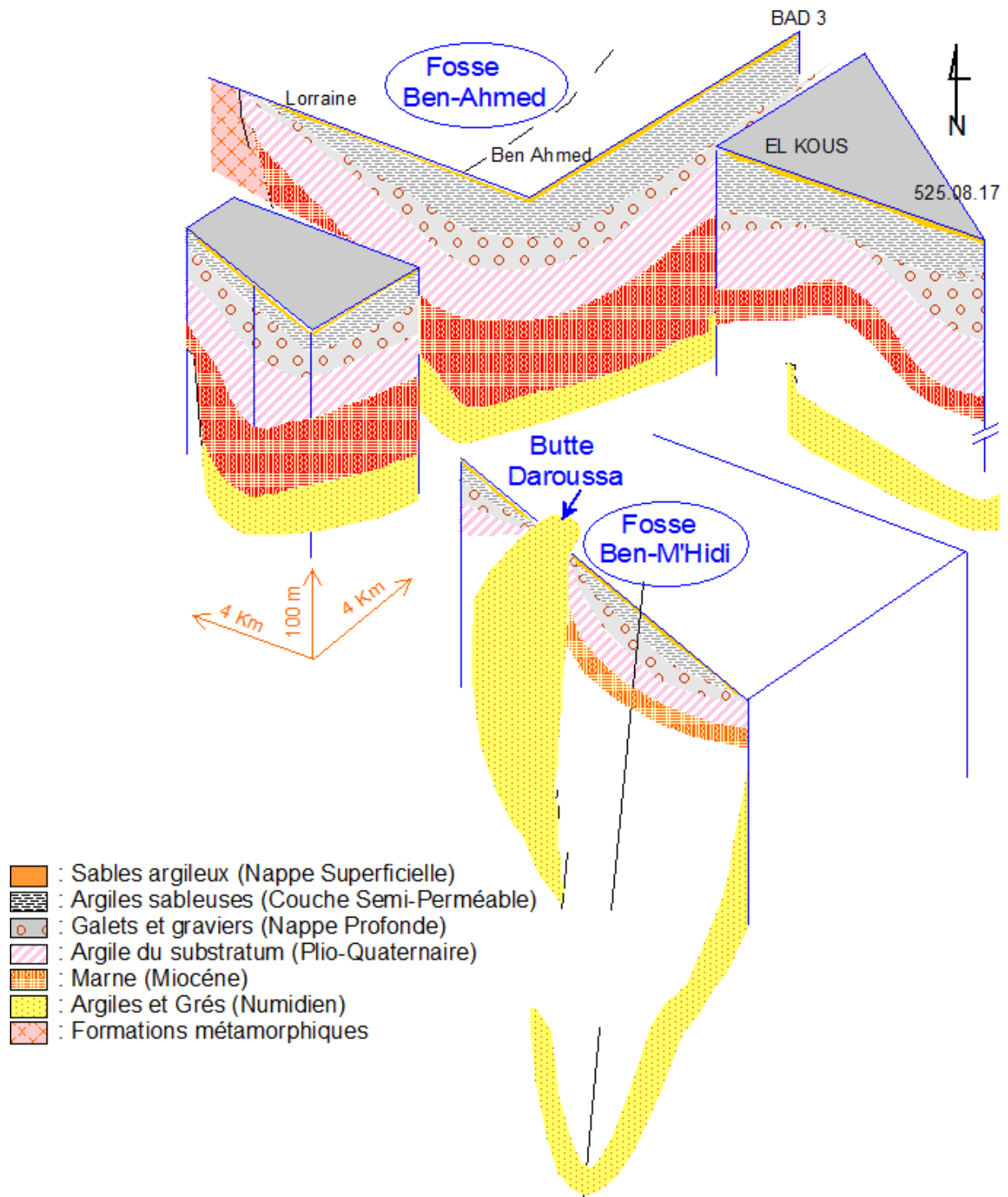


Figure 31. Bloc diagramme au travers de la plaine de Annaba (Hani, 2003, modifié)

Conclusion :

La Méditerranée est formée de bassins profonds de forme irrégulière, étroitement enserrés entre des marges continentales plus ou moins larges, la limite entre les deux étant souvent difficile à fixer pour ce qui est de la nature du fond. De plus, ces bassins sont différents les uns des autres : bassins arrière-arc, voire mer marginale, bassins d'effondrement post-orogéniques, résidus téthysiens. Les uns s'ouvrent pendant que d'autres se ferment. La Méditerranée ne connaît une certaine unité qu'au Messinien quand elle se transforme en lagune sursalée et s'assèche presque complètement.

Elle est le siège d'une *néotectonique intense*, c'est-à-dire des actions récentes à actuelles liées, d'une part, à des réajustements isostatiques et, d'autre part, aux contraintes imposées par le resserrement N-S Afrique-Europe souvent déviées par les chaînes édifiées et la présence de petites microplaques intermédiaires, avec sa rotation antihoraire néogène, ou bloc d'Alboran, à l'origine de l'arc miocène de Gibraltar.

Dans la fosse de Ben-Ahmed, le sondage BAD 3 foré par la Sonatrach a fourni les informations lithostratigraphiques suivantes :

- le Quaternaire d'une épaisseur de 32 m est composé d'une alternance de sables gris jaunâtre très fins à grossiers et d'argiles plastiques fines à jaunâtres, très sableuses.
- Le Pliocène d'une épaisseur de 278 m, est constitué d'alternances de sable fin à grossier, d'argile gris brun ou jaunâtre sableuse, de grès calcaire ou sableux fin à moyen et de calcaires blancs finement gréseux ou argileux. Le Pliocène est essentiellement laguno-continentale. Il faut cependant noter le passage à un faciès néritique entre les côtes 155 et 170 m.
- Le Miocène d'une épaisseur totale de 165 m est composé d'argiles brun jaunâtre, argiles calcaires grises, argiles plastiques brunes, sables grossiers à micrograviers, marnes bariolées rouges, brunes ou grises. Dans l'ensemble de la série, il existe plusieurs intercalations de calcaires blancs caverneux et de grès fins siliceux. Comme le Pliocène, le Miocène montre un faciès laguno-continentale avec un passage plus marin dans l'intervalle 305-329 m.

Chapitre III : Cadre Géologique et structural

Références bibliographiques

- Ardoin S., 2000. Prise en compte des spécificités de l'évaporation en zones semi arides dans la modélisation globale de la relation pluie-débit. Mémoire de DEA en sciences de l'eau, université Montpellier II, 114p.
- Ardoin S., Dezetter A., Servat E., Bocquillon C., 2001. Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de relation pluie-débit en milieu semi-aride africain, C.R Acad.Sci. Paris 333, série Iia, 611-616.
- Ardoin S., Lubes-Niel H., Servat E., Dezetter A., Boyer J.F., Mahé G., Paturel J.E., 2003. Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest : caractérisation de la décennie 1990. In Hydrology of the Mediterranean and semiarid Regions (ed. By Servat E., Najem W., Leduc C. & Shakeel A) (Proc. Int. Conf. of Montpellier 2003), 223-228, IAHS Publ.n°.278.
- Ardoin-Bardin ., 2004. Variabilité hydro climatique et impacts des ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zones soudano-sahélienne.Th. Doc. 447p.
- Affoune S., ressources en eaux, mobilisation et utilisation dans le bassin versant de la mafragh. Mémoire de magister, université UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 223p.
- Hammor, D., 1992.- Du Panafricain au Miocène : 600 millions d'années d'évolution polycyclique dans le massif de l'Edough (Algérie Nord Orientale). Retraces par la pétrologie, la tectonique et la géochronologie (U/Pb, Rb/Sr, Sm/Nd et ³⁹Ar/⁴⁰Ar). Thèse de l'USTLanguedoc, Univ. de Montpellier II, pp. 205.
- Hani A., 2003.- Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de Doct. d'Etat Univ. Badji Mokhtar Annaba. 214 p.
- Hilly, J., 1962.- Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer (Est constantinois). Bull. n°19 carte géologique Algérie, Alger, 339p.
- Jacques Debelmas histoire géologique de la méditerranée
- Joleaud L., 1936.- Etude géologique de la région de Bône et de la Calle. Bull . Serv. Carte Géol. de l'Algérie. 2e série, 12, 200p.
- Kherici, N., 1985.- Aquifère sableux de bords de mer. Hydrodynamique et hydrochimie. Exemple de la nappe de Bouteldja (Nord Est algérien). Thèse de Docteur 3ème cycle USTL, Montpellier. 202p.
- Kherici, N., 1993.- Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba la Mafragh-nord-est algérien). Th. Doct. Es-Sciences, Univ. Annaba. 170p.
- Lahondère, J.C., 1987.- Les séries ultra-telliennes d'Algérie Nord oriental et les formations environnantes dans le cadre structural. Th. Doct. Es-Sci. Univ. Paul Sabatier, Toulouse, France, 238 p.
- Nafâa, K., 1985.- Nappes superposées en région côtière, hydrodynamique et hydrochimie (aquifère de Annaba) Nord Est algérien. Thèse Docteur Ingénieur. USTL, Montpellier, 159p.
- Ramdani, A., 1996.- Hydrogéologie et modélisation de la nappe dunaire de Bouteldja. Mém. Magistère sous la direction de A. Hani. Univ. de Annaba (Algérie), 138p.
- Sonatrach, 1966.- Esquisse structurale de la plaine de Annaba. Rapport A.N.R.H., inédit. Annaba, Algérie.
- Strojexport, 1975.- Prospection géophysique de la plaine de Annaba. Réinterprétation. Rapport A.N.R.H., inédit, Annaba, Algérie, 30 p.
- Vila, J.M., 1980.- La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro – tunisiens. Thèse Docteur es sciences. Université de Pierre et Marie- Curie. Paris VI, France, pp.58-68.

Chapitre IV:

Etude Hydrogéologique, relation nappe-oued

I.4 – Hydrogéologie

Les formations du système aquifère sont constituées de sédiments Mio-pliocènes et Quaternaires des deux fosses de Ben Ahmed et de Ben M'hidi (voir partie géologie). Le remplissage de ces fosses s'est effectué de manière hétérogène, formant une alternance d'argile sableuse, de sable, de graviers et de travertins, où l'on distingue 6 réservoirs d'importance inégale (Khérici, 1993 ; Djabri, 1996 ; Debièche, 2002 ; Hani, 2003) (Fig.32).

■ **La nappe des formations superficielles.** Cette nappe est contenue dans des formations sablo-argileuses incluant des lentilles de sables. Des argiles grises compactes en constituent le substratum. Ces lentilles sont plus fréquentes à proximité de l'oued Seybouse, et à la périphérie des affleurements des grès numidiens. La nappe phréatique est globalement libre, sauf en quelques points où elle est captive sous des niveaux d'argiles. L'épaisseur de cette nappe varie de 0 à 18m.

■ **La nappe des graviers.** Elle couvre l'ensemble de la zone d'étude et présente de bonnes qualités hydrauliques.

■ **La nappe des alluvions de la haute terrasse.** Elle s'étend le long des massifs numidiens à l'Ouest et au Sud de la plaine de Annaba. Ces alluvions graveleuses et caillouteuses à matrice argileuse ont des possibilités aquifères très limitées.

■ **La nappe des cipolins.** Elle se situe dans les massifs de bordure du Belilieta et de Boukhadra (proche du massif de l'Edough). Elle est contenue dans des lentilles de cipolins, fissurés, existant au sein des gneiss et micaschistes du monoclinale métamorphique du Boukhadra. Ces calcaires sont en contact avec les alluvions de la plaine. Leur superficie est inférieure à 100ha.

■ **La nappe des travertins.** Elle est mal délimitée. Elle a été localisée dans le secteur compris entre Fardaous, la butte de Daroussa, Chbaïta et la ferme Hallalal Aissa.

■ **La nappe libre du cordon dunaire.** Elle est contenue dans les dunes le long de la Méditerranée, à l'Ouest de la Mafragh. Elle présente l'intérêt de protéger la nappe phréatique des venues d'eau salées.

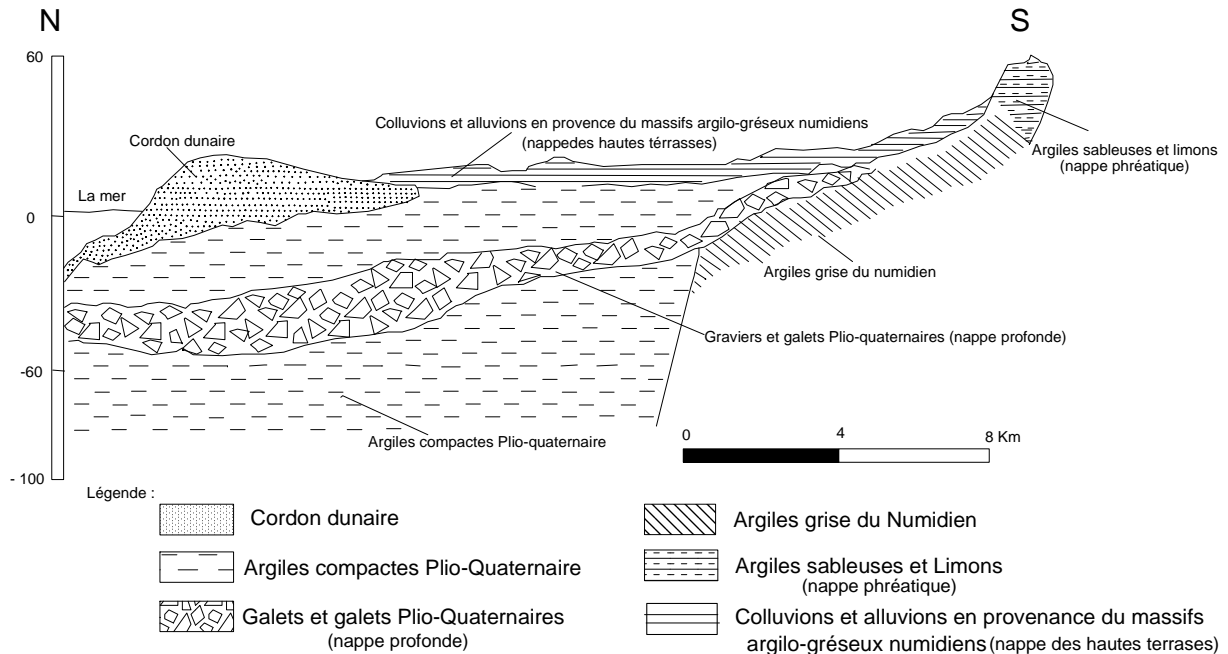


Figure. 32 Coupe géologique montrant les différentes nappes de la plaine d'Annaba (D.G.R.H.A 1967) modifiée.

L'hétérogénéité des dépôts a permis de définir un système aquifère constitué par une nappe superficielle qui s'étend sur l'ensemble de la zone d'étude, excepté sur sa bordure nord constituée par les sables du cordon dunaire, à l'Ouest de l'oued Mafragh. Sous cet ensemble les forages ont rencontré sous une couche argilo-sableuse semi-perméable des niveaux de graviers s'étendant sur toute la superficie du système. L'analyse de près de 500 coupes lithologiques de forage a permis d'identifier la structure profonde des principaux aquifères et de déterminer leur extension latérale et verticale. Nous décrivons à partir des coupes reportées sur la (Fig. 32) l'ensemble de ces horizons aquifères successivement de l'Ouest vers l'Est.

I.4.1- La nappe des sables fins superficiels (ou nappe superficielle) :

Cette nappe est contenue dans des formations sablo-argileuses incluant des lentilles de sables. Des argiles grises compactes en constituent le substratum. La répartition des lentilles sableuses est très irrégulière et discontinue (Fig.33). Ces lentilles sont néanmoins plus fréquentes à proximité de l'oued Seybouse, et à la périphérie des affleurements des grès numidiens. La nappe phréatique est globalement libre, sauf en quelques points où elle est captive sous des niveaux d'argiles. L'épaisseur de cette nappe peut atteindre 18m.

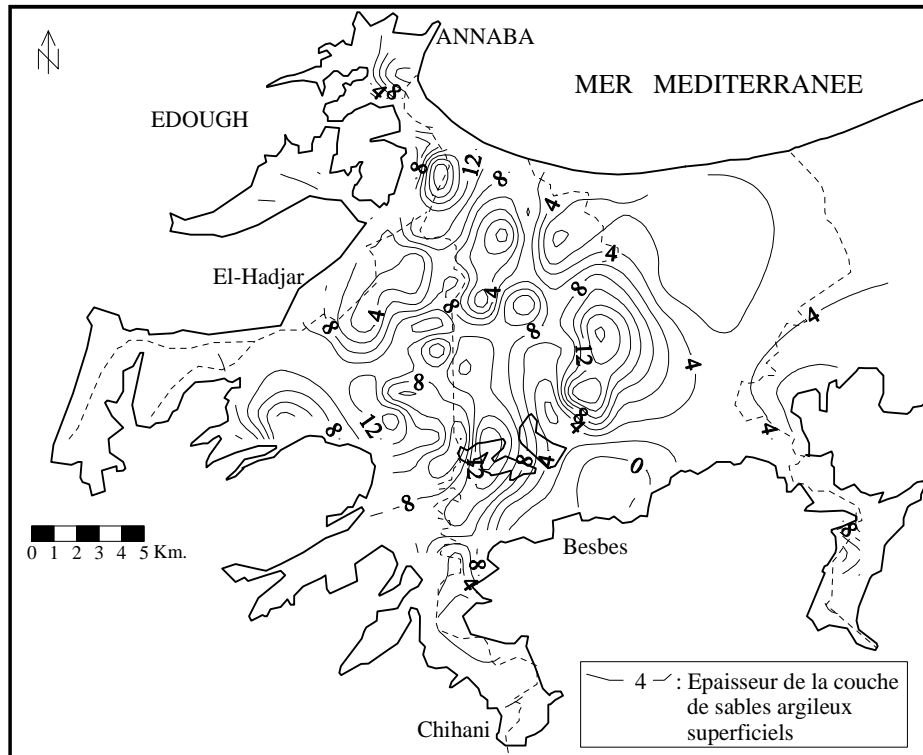


Figure. 33 Carte des isopaches de la nappe phréatique (Hani.2003)

I.4.2- La nappe des graviers (ou nappe profonde) :

Les coupes de forage et les diagraphies montrent l'existence de plusieurs phases sédimentaires marquées par une alternance de couches grossières de graviers et galets et de couches argilo-sableuses. Cet empilement plus au moins régulier est lié au remplissage hétérogène des fosses de Ben Ahmed et de Ben M'hidi (Fig.34).

L'épaisseur des graviers et galets est très variable, elle passe en effet de quelques mètres en bordure ouest du système, à près de 25m selon l'axe de la fosse de Ben-Ahmed, orientée Sud-Nord, puis elle diminue à moins de 10m sur l'élévation de Daroussa (Fig.35).

Elle croît de nouveau à 80 voir 90m selon l'axe de la fosse de Ben-M'Hidi d'orientation sud-ouest – nord-est. Entre la butte de Boukhadra et El-Khous, un autre niveau à éléments grossiers, de près de 8m d'épaisseur, a été localisé à une profondeur de 35 à 40m. En bordure des massifs numidiens de Bouteldja, l'épaisseur des graviers atteint près de 20m (Djabri *et al.*, 2000)

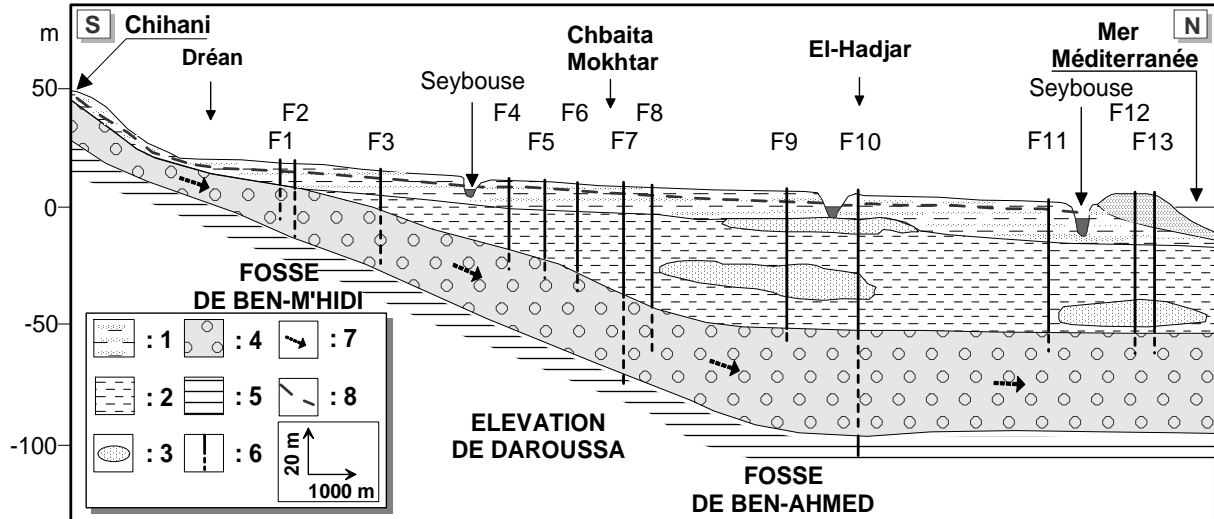


Figure. 34 Coupes au travers de la plaine d’Annaba (Hani.2003)modifiée.

Légende : 1 : Argile limoneuse avec passées sableuses (nappe superficielle) ; 2: Argile détritique Plio-quadernaire ; 3 : Lentilles de sables ; 4 : Galets et graviers (nappe profonde) ; 5 : Argile de Numidie ou du Paléocène; 6 : Forages ; 7: Direction de l’écoulement ; 8 : Surface piézométrique de la nappe des graviers.

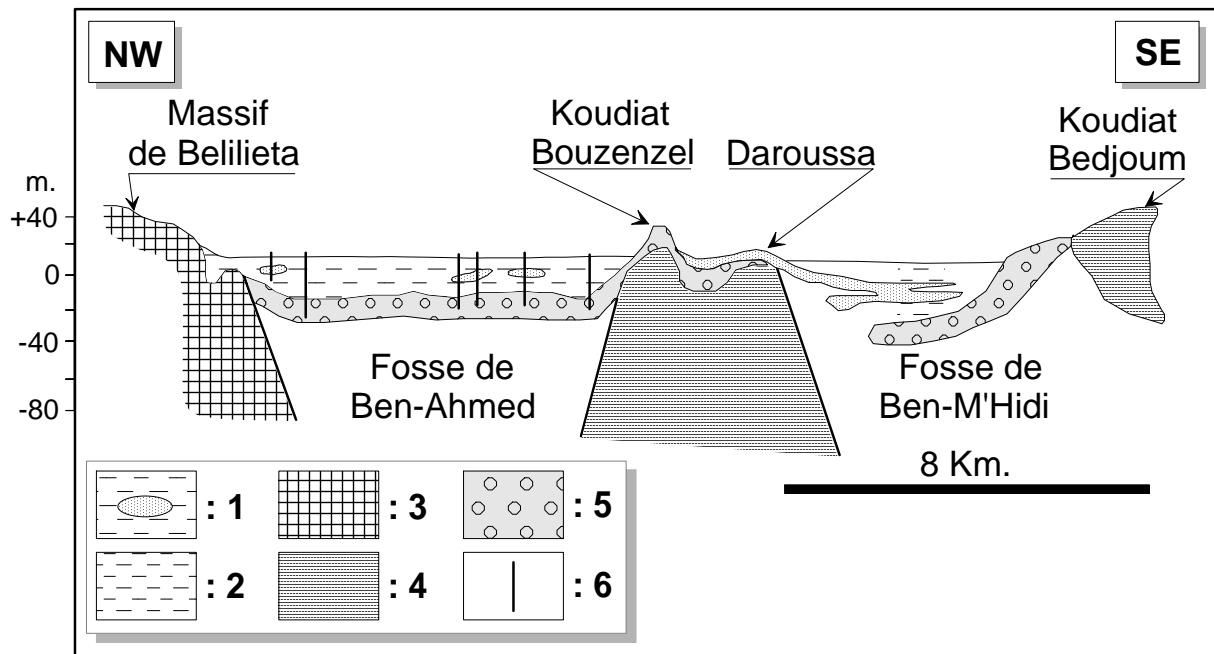


Figure. 35 Coupes au travers de la plaine d’Annaba (Hani.2003) modifiée.

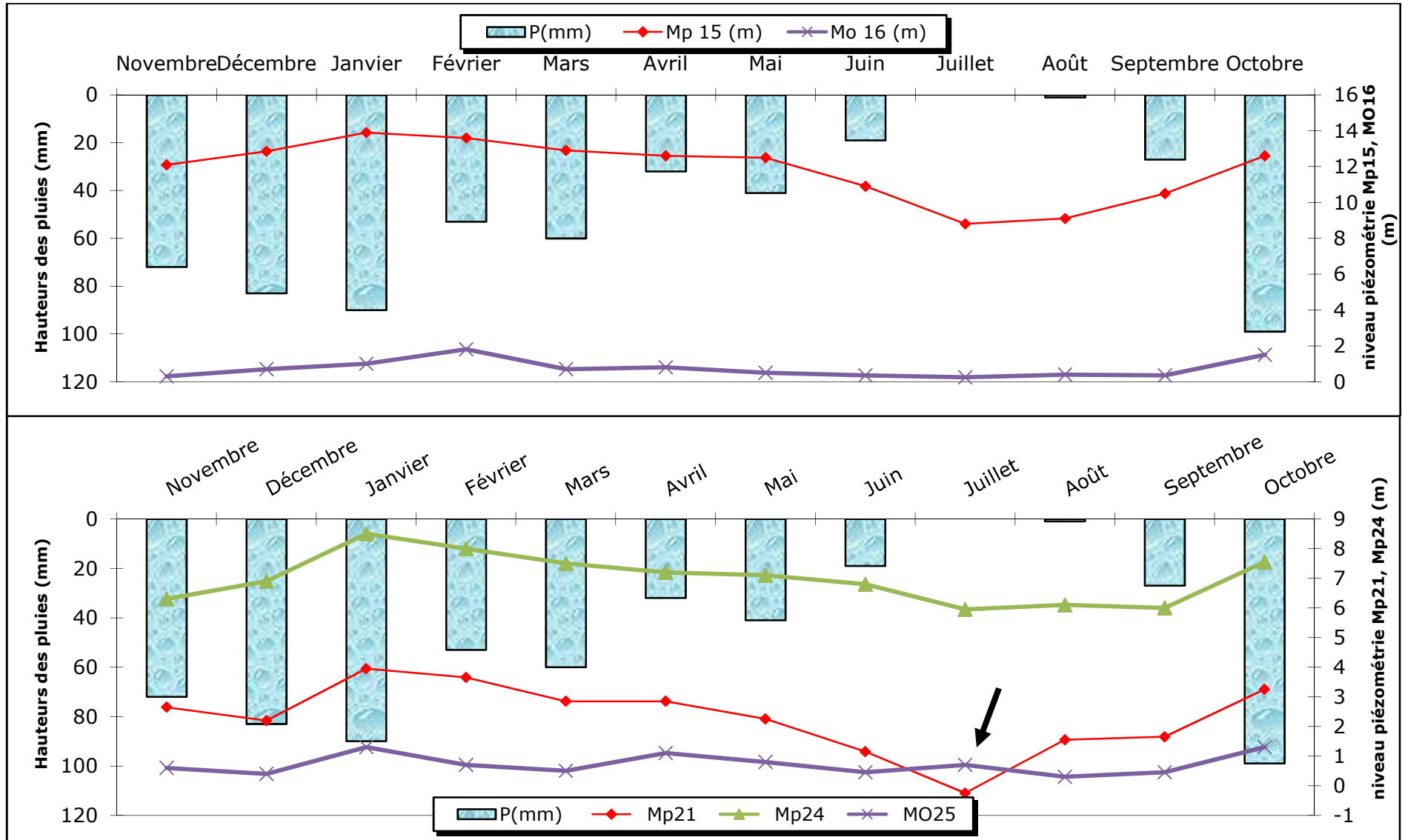
Légende : 1 : Argile limoneuse avec passées sableuses surmontées par une couche de sable (nappe superficielle) ; 2: Argile détritique Plio-quadernaire ; 3 : Formations métamorphiques ; 4 : Argile de Numidie ou du Paléocène ; 5 : Galets et graviers (nappe profonde) ; 6 : Forages.

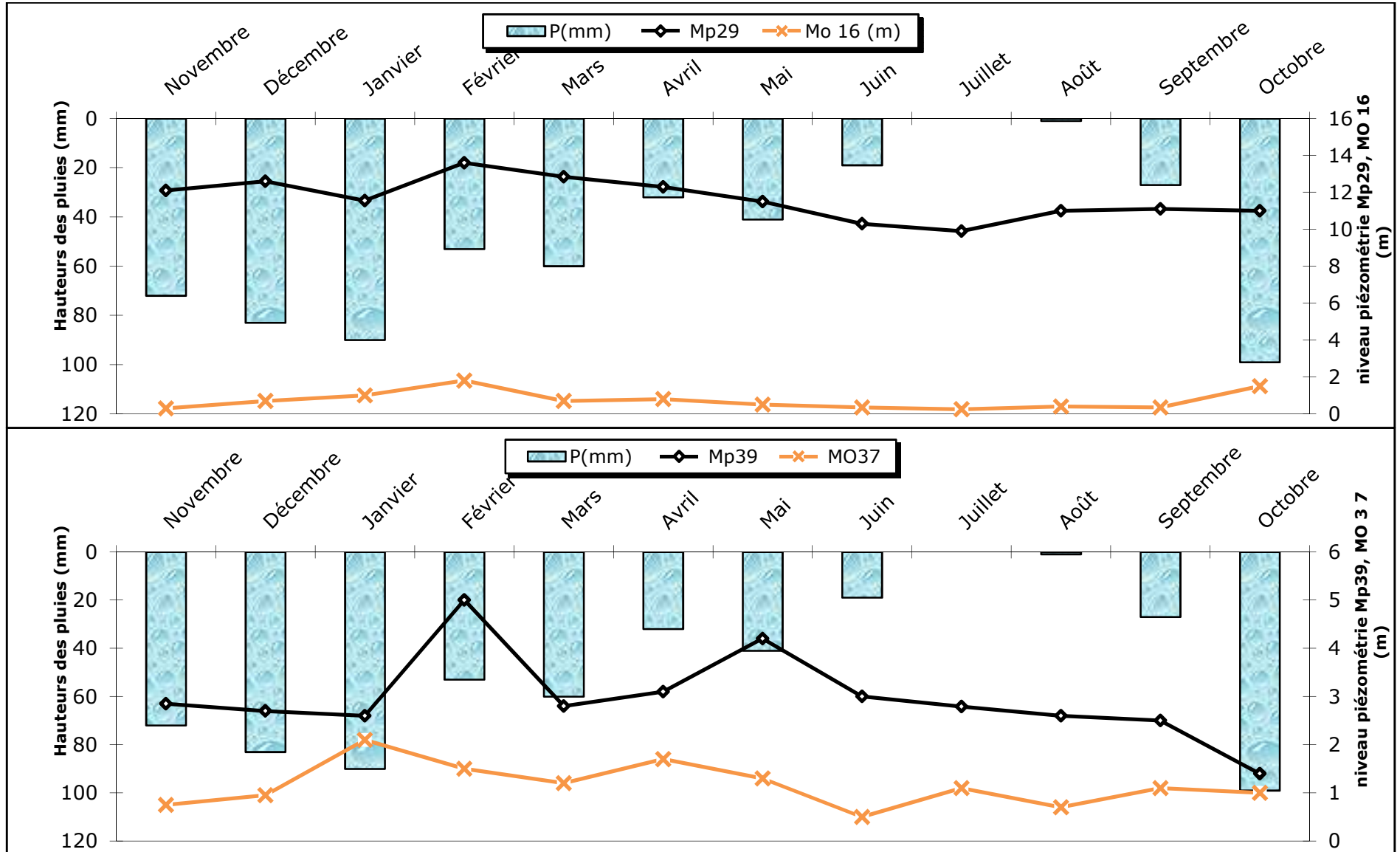
V. Variation du niveau piézométriques dans l’espace et dans le temps

Le niveau piézométrique de la nappe superficielle évolue dans l’espace et dans le temps en fonction de plusieurs paramètres : les précipitations, les conditions d’exploitations et la nature de toit de la nappe. Plusieurs cas d’évolutions réalisés du mois de Novembre 2009 au mois d’octobre 2010 ont permis d’élaborer les évolutions suivantes (Fig.36):

- L'évolution naturelle du niveau piézométrique tend dans l'ensemble vers une augmentation progressive à partir du mois d'octobre, à cause de l'alimentation des puits par les premières pluies, jusqu'au mois de février où ;
- L'évolution devient faible qui est observée au niveau des puits Mp2, Mp6, Mp10, 15, 21, 24 et 29, le niveau se stabilise par l'effet de la recharge à partir du mois de février.
- L'évolution très variables qui est observée au niveau des puits Mp39 à cause de pompage à débit variable.
- La variation du niveau piézométrique dans le puits Mp2, Mp6, Mp10 ne suit pas l'évolution saisonnière de la pluie à cause vraisemblablement à l'effet du pompage par les habitants du secteur.

Enfin l'augmentation remarquée dans l'oued MO25 par rapport au Mp21 au mois de Juillet traduit l'alimentation de la nappe à partir de l'oued.





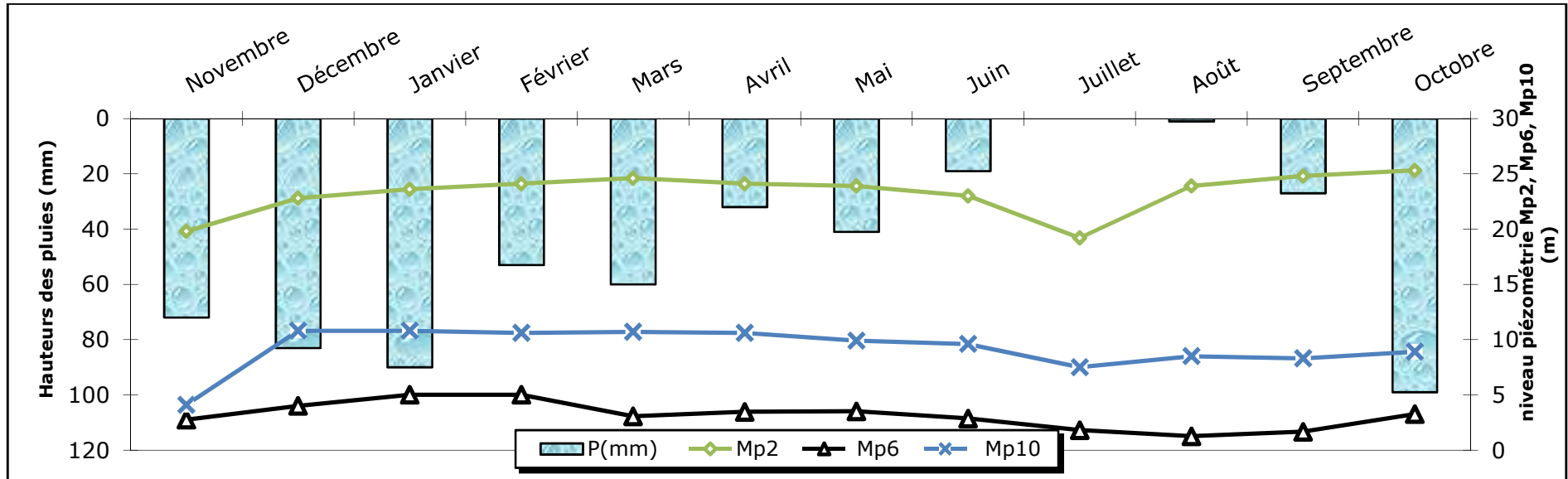


Figure. 36 Variation du niveau piézométrique.

Pour donner un ordre de grandeur des principales caractéristiques hydrodynamiques de cet aquifère, nous reprenons ici les résultats des pompages d'essai réalisés dans la région située au Sud-Est des Salines, l'un dans la zone à dominante argileuse, l'autre dans une zone à dominante sableuse. Les résultats sont consignés dans le Tableau 19.

Tableau 19. Résultats de deux pompages d'essai effectués dans la nappe phréatique.

Coordonnées		Transmissivité ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Coefficient d'emmagasinement	Epaisseur de la nappe (m)	Perméabilité ($m \cdot s^{-1}$)
X	Y				
957.150	401.550	$2 \cdot 10^{-6}$?	5	$4 \cdot 10^{-7}$
957.250	399.800	$8 \cdot 10^{-5}$	2 %	5	$1.6 \cdot 10^{-5}$

Tableau 20. Résultats du pompage effectué dans le secteur central de la plaine de Annaba (Aoun, 2010)

Paramètres	Méthode			Méthode automatique (6 ^{ème} itération)
	Descente (Jacob)	Remontée (Jacob)	Descente (Theis)	
Transmissivité ($m^2 \cdot s^{-1}$)	3.5×10^{-3}	4.0×10^{-3}	3.5×10^{-3}	3.5×10^{-3}
Coefficient d'emmagasinement	3.6×10^{-4}	-	4.3×10^{-4}	4.0×10^{-4}

IMPACT DE LA RELATION OUED-NAPPE SUR LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

1. INTRODUCTION

L'urbanisation, l'essor de l'industrie et de l'agriculture intensive ont accru, de manière chronique ou accidentelle, la pollution des cours d'eau. Dans plusieurs pays du sud et de l'est du bassin méditerranéen, de nombreux cours d'eau sont sujets à pollution chronique du fait des rejets domestiques et industriels (Benoit et Comeau, 2005). Cette pollution chimique provient entre autres des engrais de synthèse et des pesticides utilisés par l'agriculture, et des rejets toxiques de l'activité industrielle et minière. Le ruissellement des pluies et les infiltrations dans le sol entraînent la pollution vers les cours d'eau et l'océan. De plus en plus, les nappes phréatiques, théoriquement moins vulnérables que les eaux de surface, sont également contaminées, souvent pour une longue durée du fait du lent renouvellement des eaux souterraines. Par ailleurs, sur les quelques 10 000 espèces connues de poissons d'eau douce dans le monde, une espèce sur cinq (une sur trois en Europe) est en danger d'extinction pour ces raisons. Face au problème de la pollution, agriculteurs, entreprises et collectivités doivent se mobiliser pour trouver des solutions, à la fois correctives et préventives.

Plusieurs études dans le monde ont analysé les effets des rejets industriels et urbains sur l'évolution de la qualité des eaux de surface ; on peut citer entre autres le cas de la Chine (Chan et Bouguerra 2005 ; Yahua 2005), de l'Inde (Gurunadha Rao *et al.* 2001) de la France (Meybeck 1998), du Maroc (Azzaoui *et al.* 2002). Le transit de ces polluants vers les eaux souterraines nécessite une bonne définition des relations nappe-rivière (Panagoulia et Dimou 1996 ; Belhassan *et al.* 2010).

Dans la région située autour de l'oued Meboudja, le degré de contamination du milieu par l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture et par les rejets industriels et urbain (Khérici 1993; Debièche 2002) a été si intense que dans certains secteurs, notamment au niveau de la confluence des deux oueds Meboudja et Seybouse, l'environnement est devenu indésirable pour la santé humaine et pour la faune et la flore. Les rejets d'eaux usées de l'usine sidérurgique déversés dans l'oued sont caractérisés par une grande diversité de leur composition chimique. Par ailleurs, au niveau de l'usine, les sous-produits (scories, calamines, briques réfractaires usées, poussières d'aciérage, ...) générés par la production sidérurgique sont souvent stockés à même le sol.

Autrefois, la région avait une vocation agricole et aucune des unités industrielles n'a pris de disposition sûre pour réduire les effluents industriels notamment au niveau du complexe

sidérurgique. Le sol était considéré comme un milieu apte à absorber toutes sortes de produits (métaux lourds, déchets) sans qu'il y ait aucune altération de son fonctionnement normal. Aujourd'hui, les teneurs en éléments toxiques dans le milieu (sol, eau et air) dépassent largement les limites autorisées (Djabri *et al.* 2003 ; Debièche *et al.* 2003 ; Hani *et al.* 2006 ; Hani *et al.* 2007 ; Djorfi *et al.* 2008 ; Rouabhia *et al.* 2010). La production agricole a diminué considérablement et la vie aquatique dans l'oued Seybouse, devenu fortement pollué, a disparu.

L'objectif de cette étude est de déterminer l'impact des effluents solides et liquides du complexe sidérurgique « Arcelor-Mittal » sur la qualité des eaux souterraines. Pour ce faire, les résultats des analyses physico-chimiques, effectuées sur les échantillons d'eaux de surface et souterraines durant la période 1999-2009, ont été utilisés.

Les informations acquises sur la contamination des eaux superficielles et souterraines ont été utilisées pour i) caractériser le contenu physico-chimique des eaux superficielles et souterraines, ii) appréhender la relation oued-nappe à partir de l'analyse du comportement du fer et du manganèse et, iii) élaborer un modèle de transfert de polluants dans l'aquifère superficiel de la plaine de Meboudja.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Site étudié

Le secteur étudié est situé dans la basse plaine de la Seybouse (NE Algérie), dans le sous bassin de l'oued Meboudja (Fig. 37). Le site étudié appartient au système aquifère de la région d'Annaba, est bordée à l'Ouest par les micaschistes et gneiss du massif de l'Edough, et par les alluvions de haut niveau du lac Fetzara plus au Sud. Il est limité au Sud par le prolongement oriental de la chaîne numidienne des monts de la Cheffia, au Nord par la Méditerranée et à l'Est par l'oued Seybouse. Le site étudié se trouve dans un bassin d'effondrement comblé par des sédiments mio-plio-quadernaires (Djabri *et al.* 2003). Vila (1980) signale la présence des évaporites du miopliocène dans le secteur de Dréan. La nappe superficielle du sous bassin de l'oued Meboudja est contenue dans des formations sablo-argileuses incluant des lentilles de sables. Ces lentilles sont plus fréquentes à proximité de l'oued Seybouse, et à la périphérie des affleurements des grès numidiens. Des argiles grises compactes en constituent le substratum. La nappe superficielle est globalement libre, sauf en quelques points où elle est captive sous des niveaux d'argiles.

L'oued Meboudja est caractérisé par un écoulement permanent en hiver. Son alimentation est assurée par les eaux de pluie, et par le drainage du lac Fetzara. Son débit peut atteindre alors $16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En été, les apports sont constitués principalement par les sorties du lac (le débit oscille alors entre 1 et $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). L'oued reçoit également sur son parcours les rejets urbains (villages de Hadjar Ediss, Sidi Amar, El-Hadjar) et industriels (usine sidérurgique Arcelor-Mittal, zone industrielle de Chaiba et de Pont Bouchet).

La région renferme dans son sous sol un aquifère contenu dans des formations alluvionnaires constituées de 70% de sables et 30% d'argiles. La perméabilité varie entre 10^{-4} et 10^{-6} m s^{-1} . Le climat de la région est du type méditerranéen avec une saison pluvieuse allant de septembre ou octobre à mai, et une saison pratiquement sèche en juin, juillet et août. Les précipitations moyennes annuelles sont de 650 mm, la température moyenne est de 18°C et l'humidité relative de l'air de l'ordre de 75%. La direction dominante des vents est N-S. L'infiltration efficace est d'environ 15% des précipitations, soit près de 100 mm par an qui s'infiltré vers la nappe (Debièche 2002 ; Hani *et al.* 2003 ; Lamouroux et Hani 2006).

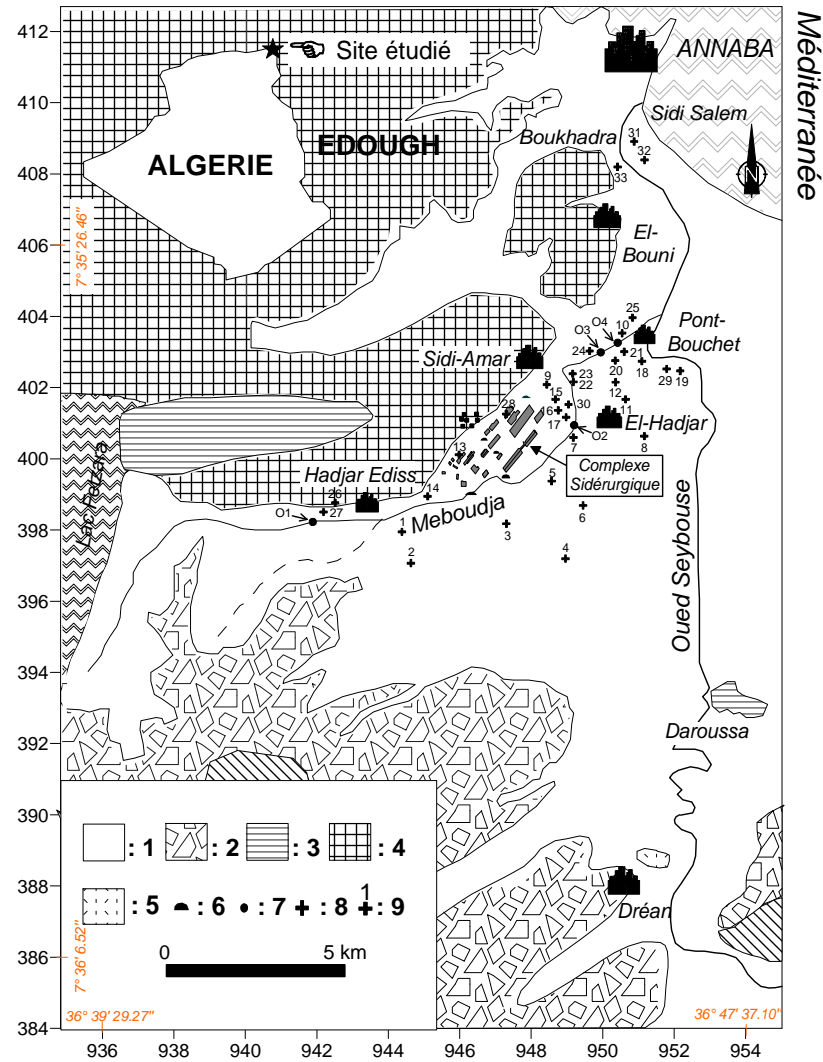


Figure. 37 Localisation de la région d'étude: 1 : Quaternaire récent (Alluvions récentes), 2 : Quaternaire ancien (Hautes terrasses), 3 : Argiles et grès du Numidien, 4 : Formation métamorphique, 5 : Evaporites du miopliocène 6 : Terrils, 7 : Prélèvements eau de surface, 8 : Prélèvements eau souterraine, 9 : Points et numéros utilisés pour calage des modèles et suivi du fer et manganèse

2.2. Méthodologie

Un réseau de surveillance de la qualité des eaux des rejets, de l'oued et de la nappe a été mis en place en 1999 par Debièche (2002). Cette surveillance s'est poursuivie ensuite jusqu'en 2009. Le réseau comprend 4 stations au niveau de l'oued Meboudja, choisies en fonction de la position des zones industrielles. Les mesures et les prélèvements effectués sur les eaux souterraines ont touché près de 33 puits (Fig. 37), utilisés généralement pour l'alimentation du bétail et pour l'irrigation.

Les prélèvements d'eau ont été effectués d'une manière irrégulière à des pas qui peuvent être mensuels, bimensuels ou parfois même trimestriels. D'une manière générale, trois

échantillons d'eau filtrée à 0.45 micron à l'aide des filtres seringues stériles (SFCA) sont placés dans 3 flacons en polyéthylène de 150 ml, préalablement conditionnés par l'eau filtrée de l'échantillon. Le premier est destiné à l'analyse des cations (acidifié à un pH < 2 avec de l'acide nitrique ultra pur), le deuxième est prévu pour les analyses des anions, le dernier échantillon est réservé à l'analyse de l'azote dans différentes formes ioniques, phosphore et les bicarbonates.

Les échantillons sont conservés immédiatement dans une glacière portative avec une réserve de froid suffisante pour garder une température inférieure à 4°C jusqu'à l'arrivée au laboratoire ; le troisième échantillon est mis dans le réfrigérateur et les autres échantillons sont gardés à l'abri de la lumière, jusqu'au moment de l'analyse.

L'ensemble des paramètres physiques (température (T), conductivité électrique (CE), eh, pH et oxygène dissous (O₂)) a été mesuré *in situ* en utilisant un multiparamètre WTW (multiline P4) l'. Les caractéristiques techniques de cet appareil sont présentées dans le tableau 1 :

Tableau21 Caractéristiques techniques de l'appareil Multiline P4

Elément	Unité	précision
Température (T)	°C	±0,01
pH	-	±0,01
Conductivité	µS/cm	±1%
Redox, eH	mV	±1 mV
O ₂	mg/l	±0,01

L'analyse des éléments chimiques s'est effectuée selon deux méthodes : l'absorption atomique à flamme (Perkin-Elmer 1100) pour le dosage des cations majeurs et le spectrophotomètre Photolab Spektral de marque WTW pour l'analyse des anions et des éléments traces. Les analyses ont été effectués au laboratoire UMR 6249 de l'université Franche Compté de Besançon pour le suivi effectué en 1999 et au laboratoire de Polytech'Lille pour ceux de 2007 et 2009.

Les analyses retenues dans cette recherche sont celles qui présentent une balance ionique inférieure à 5% pour les eaux de surface et jusqu'à 10% pour les eaux souterraines, compte tenu de leur forte salinité.

Par ailleurs, le dépouillement et l'analyse des données géologiques (coupes de forage) et hydrodynamiques (pompages d'essai et piézométrie) ont permis d'élaborer le schéma conceptuel afin aborder la modélisation hydrodynamique et le transport de masse dans le secteur étudié.

3. Résultats et Discussion

3.1. Les apports anthropiques

Compte tenu du contexte géologique et de la forte activité urbaine, industrielle et agricole qui se développe dans le secteur d'étude, la minéralisation de l'eau peut avoir plusieurs origines: l'une naturelle, due essentiellement au contact avec les évaporites et à la proximité de la mer et l'autre anthropique liée aux rejets d'eaux usées, au stockage des produits industriels et à l'utilisation des produits chimiques dans l'agriculture. L'ensemble de ces apports induisent une pollution chimique qui provoque l'augmentation de la concentration des éléments chimiques dans les eaux superficielles et souterraines induisant une dégradation de leur qualité.

Les rejets d'eaux usées des agglomérations limitrophes sont caractérisés par de fortes teneurs en ammonium et en phosphate (Debièche *et al.* 2003). L'analyse chimique des eaux usées de l'agglomération de Sidi Amar, dont les effluents sont rejetés directement dans l'oued Meboudja, a donné les résultats du Tableau 22.

Tableau 22 Analyse physico-chimique de l'eau du rejet urbain de Sidi Amar (novembre 1999, 2007, 2009)

	T°C	pH	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	eH (mV)	O ₂ (mgL ⁻¹)	NH ₄ ⁺ (mgL ⁻¹)	NO ₂ ⁻ (mgL ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (mgL ⁻¹)	PO ₄ ³⁻ (mgL ⁻¹)
1999	17,3	8	1440	410	1	70	0,1	10	32
2007	19.2	8.68	1595	119	1.49	55	0.45	17	41
2009	17.2	8.52	1949	123	1.99	68	0.61	18.6	42

Cette analyse montre une eau alcaline, pauvre en oxygène (1 à 2 mg L⁻¹) et riche en ammonium (55 à 70 mg L⁻¹) lié principalement aux déchets humains (urines), et en phosphate (32 à 42 mg L⁻¹) due vraisemblablement à l'utilisation des détergents. Ces rejets effectués dans l'oued Meboudja donnent un caractère réduit à l'eau et favorise par conséquent l'apparition des éléments polluants. En effet un milieu réduit est pauvre en oxygène, eH<0 mV ou O₂<2 mg L⁻¹), et provoque :

- la mise en solution des métaux qui étaient retenus par des carbonates ou des matières organiques,
- la transformation de formes chimiques oxydées qui passent sous forme de sulfures avec apparition de H₂S très malodorant et très dangereux (Pang *et al.* 2002).

L'analyse chimique du principal rejet de l'usine sidérurgique a permis d'obtenir le Tableau 23.

Tableau 23 Composition physico-chimique des rejets industriels dans l'oued Meboudja (Avril 2007 et Juin 2009)

	Débit L s ⁻¹	T °C	pH	CE μS.cm ⁻¹	eH mV	O ₂ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	Fe (T) mg L ⁻¹	Mn ²⁺ mg L ⁻¹
2007	15	22	8.8	2579	397	1.39	79	1.60	105	0.42	4.1	1.1
2009	5	26	8.9	3723	225	1.59	95	0.12	54	0.35	4.55	2.8

Les rejets de l'usine sidérurgique montrent de nombreux polluants chimiques riches en Fe(T), Mn²⁺ et NH₄⁺. La présence du fer et du manganèse est due essentiellement aux alliages utilisés en industrie (aciérie). Les teneurs en NH₄⁺ et en NO₃⁻, forme la plus oxydée de l'azote, sont liées vraisemblablement à l'intense activité agricole dans la plaine de la Meboudja.

Les résultats des mesures montrent de fortes valeurs de la conductivité électrique qui passent de 2579 μS.cm⁻¹ en 2007 à 3723 μS.cm⁻¹ en 2009.

Les deux rejets (industriels et urbains) représentent un danger majeur pour la qualité des eaux, compte tenu des fortes concentrations en polluants chimiques ainsi que le débit élevé des rejets.

3.2. Etat de la qualité des eaux superficielles et souterraines

La composition chimique des eaux de l'oued Meboudja, observée de 1999 à 2009 au point O4, situé à l'aval de l'oued Meboudja (tableau 24), montre la dominance de cinq éléments chimiques majeurs : Ca²⁺, HCO₃⁻, Na⁺, Cl⁻, et SO₄²⁻. L'origine de ces éléments est liée vraisemblablement au lessivage des formations métamorphiques (cipolins) et aux apports salifères du lac Fetzara (Khérici 1993, Debièche 2002).

Le fer total et le manganèse apparaissent au niveau de l'oued Meboudja par des concentrations élevées. La concentration du fer atteint 5.68 mg L⁻¹ et le manganèse 2,80 mg L⁻¹. L'existence de ces éléments au niveau de l'oued Meboudja est liée aux rejets urbains et industriels qui sont déversés directement dans l'oued.

Tableau 24 Composition physico-chimique des eaux de l'oued Meboudja au niveau du site O4, d'août 1999 à décembre 2009

Puits	Année	Mois	pH	eH mV	O ₂ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	TDS mg L ⁻¹	Fer (T) mg L ⁻¹	Mn ²⁺ mg L ⁻¹
Site O4 Oued Mebou dja	1999	Août	7.2	401	0.2	81	93	296	11	330	119	0	288	5731	2.6	2.52
		Déc.	8.9	305	2	89	21	189	9.3	206	130	1.11	279	4198	1.06	0.16
	2007	Août	7.3	411	0.6	69	29	389	7.6	512	62	18	352	2475	4.69	1.10
		Déc.	8.8	391	2.3	96	26	378	2	675	43	21	135	1229	2.77	0.30
	2009	Août	7.2	400	0.8	78	96	301	10	298	114	0.46	495	2030	3.88	2.08
		Déc.	8.9	390	4.2	100	29	245	5.6	232	165	37.5	212	1645	5.68	2.80

Quant aux eaux de la nappe de la plaine de Meboudja, l'analyse en composantes principales, effectuée sur le tableau des résultats analytiques, comportant 19 variables observées en juillet 2009 sur 33 puits, permet d'identifier trois pôles physico-chimiques (Fig. 38A-B).

L'axe I, avec une variance de près de 38% de l'inertie totale, est caractéristique d'une forte minéralisation (Ca, Mg, Na, Cl, SO₄, total des solides dissous (TDS) et la conductivité) (Fig. 38A). Ce pôle, noté G1, est représenté principalement par les puits 7, 3, 25 et 8 (Fig. 38B). L'axe II, avec près de 19% de la variance, permet la distinction de deux familles bien distinctes. La première, G2, intègre les points 13, 24 et 14, tous à fortes teneurs en nitrates. La deuxième, G3, intègre les puits 22 et 30, caractérisés par des teneurs fortes en fer et en manganèse et relativement pauvres en oxygène.

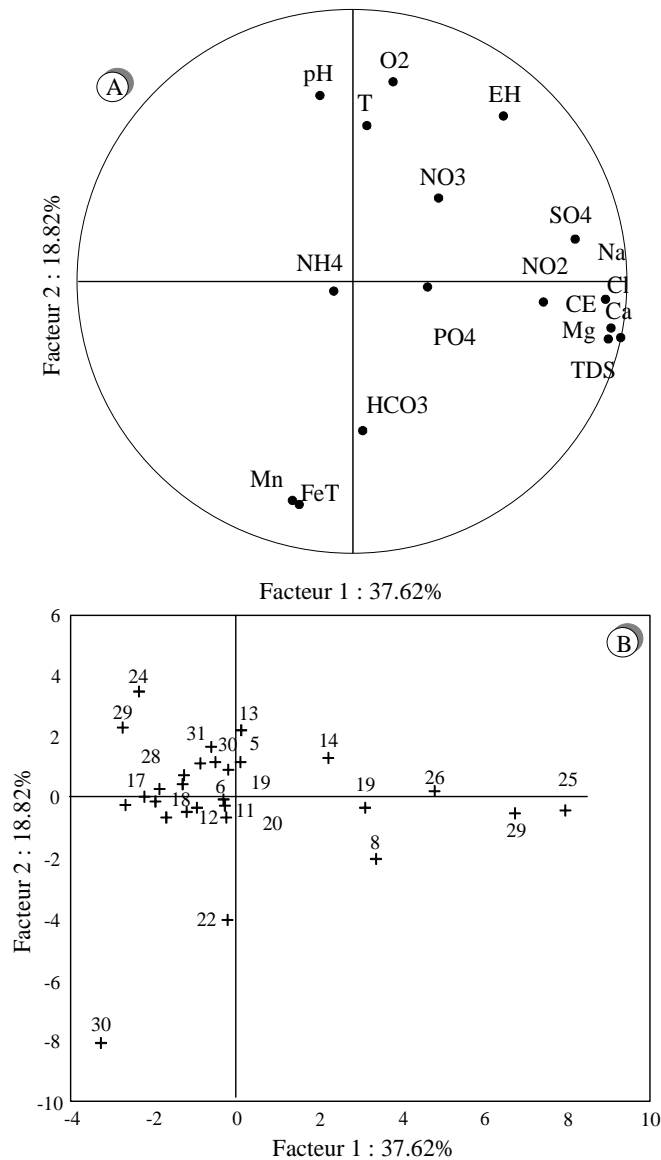


Figure. 38 Résultats de l'analyse en composantes principales. A : Cercle des variables, Plan 1-2 ; B : Plan des individus, Plan 1-2.

Du point de vue géographique, le G1 est porté par des points situés dans le centre de la plaine. Le G2 englobe des points d'eau situés en bordure ouest de la plaine. Le groupe G3, porté par le fer total et le manganèse, est situé en bordure de l'oued Meboudja.

Si l'on tient compte des résultats ainsi obtenus, la distribution spatiale des points d'eau et les principaux processus naturels et/ou anthropiques on peut faire les considérations suivantes. Les puits 8 et 22 du groupe G1, présentent des valeurs de TDS variant de 3820 à 6020 mg L⁻¹ (tableau 25). Cette forte minéralisation, constituée de calcium, Magnésium, sulfate, sodium, chlorures et conductivité, serait liée à la dissolution des formations évaporitiques présentes dans la plaine (Fig. 37) (Kherici 1993 ; Debièche 2002). Les eaux du puits 28 appartenant au G2 sont nettement moins minéralisées avec des valeurs de TDS comprises entre 1355 et 2500 mg L⁻¹. Les teneurs en nitrates ont montré une augmentation significative avec 0 mg L⁻¹ en 1999 à 17 mg L⁻¹. Cette augmentation semble être liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques (Debièche 2002). Le G3, représenté ici par le puits 22, montre une eau minéralisée avec des teneurs en fer et en manganèse relativement fortes.

Tableau 25 Composition physico-chimique des eaux au niveau de trois puits de la nappe d'août 1999 à décembre 2009

Puits	Année	Mois	pH	eH mV	O ₂ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	TDS mg L ⁻¹	Fer (T) mg L ⁻¹	Mn ²⁺ mg L ⁻¹
8	1999	Août	7.35	402	2.6	746	495	3670	3.0	6274	883	0	268	4475	0.2	0.07
		Déc.	7.58	411	2.7	770	460	3440	3.1	5566	859	379	239	3820	0.17	0.08
22		Août	7.21	377	2	356	79	461	4.0	723	318	88	483	2070	0.04	0
		Déc.	7.6	395	1.8	399	92	535	4.8	723	369	20	464	3590	0.13	0.02
28		Août	7.6	346	1.1	79	30	202	1.0	134	60	0	532	2245	0.03	0.06
		Déc.	7.39	383	1.5	105	33	257	1.3	138	67	7	590	1355	0.11	0.09
8	2007	Août	7.46	397	2.4	563	217	1274	3.0	3302	149	0.66	352	6020	0.93	0.5
		Déc.	7.57	466	2.2	770	31	845	2.0	752.6	81	0.5	322	4430	0.64	0.31
22		Août	7.88	388	1.7	91	66	137	1.0	306	48	0	382	2470	0.27	0.09
		Déc.	7.66	402	1.2	276	64	163	4.0	448	52	0.6	347	3670	0.25	0.11
28		Août	7.79	275	0.9	45	70	103	4.0	149	62	0.2	384	2500	0.42	0.14
		Déc.	7.68	398	0.1	69	29	453	3.0	511	60	0	351	2120	0.19	0.2
8	2009	Août	7.58	475	1.9	170	230	957	1.0	1562	99	0.19	1171	4860	1.27	0.98
		Déc.	7.49	364	1.1	128	46	155	1.0	395	50	0	235	3940	0.85	1.0
22		Août	7.53	398	0.9	31	83	189	2.0	392	34	39	385	2240	0.42	0.72
		Déc.	7.63	277	0.3	280	80	12	3.0	437	93	19	348	2450	0.07	0
28		Août	7.65	297	0.8	153	92	110	2.5	241	63	12	303	1358	0.23	0.20
		Déc.	7.89	199	0.4	160	25	114	5.0	306	33	17	268	2240	0.16	0.1

Par ailleurs, les travaux réalisés entre novembre 2008 et octobre 2009, sur 33 puits d'eau captant la nappe montrent une conductivité électrique des eaux souterraines comprises entre 1000 et 6000 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Les valeurs les plus élevées correspondent aux eaux situées en bordure de l'oued, pour lesquelles les concentrations en chlorures oscillent entre 70 et 1400 mg L⁻¹ et celles du sodium de 100 à près de 730 mg L⁻¹. Des teneurs élevées en fer (0,1-3,9 mg L⁻¹) et

en manganèse (0,1-2,1 mg L⁻¹) ont été également obtenues notamment autour du complexe sidérurgique et en bordure de l'oued Meboudja.

Pour mieux apprécier les principaux traits de la qualité des eaux souterraines, les valeurs de TDS, représentant la quantité des solides dissous présents dans l'eau, ont été reportées sur la Fig. 39. Les teneurs oscillent entre 2380 et 4150 mg L⁻¹ dans les eaux de l'oued Meboudja. Les plus fortes concentrations sont situées dans les secteurs du complexe sidérurgique et de Sidi-Amar. La figure 39 permet également de noter que les plus fortes teneurs en fer se localisent essentiellement à l'aval de la zone industrielle et de part et d'autre de l'oued Meboudja.

L'impact de la pollution liée aux rejets de toutes sortes sur les eaux souterraines est très marqué. En effet, les valeurs fortes enregistrées dans les eaux des puits proches de l'oued diminuent progressivement en s'éloignant des berges de la Meboudja.

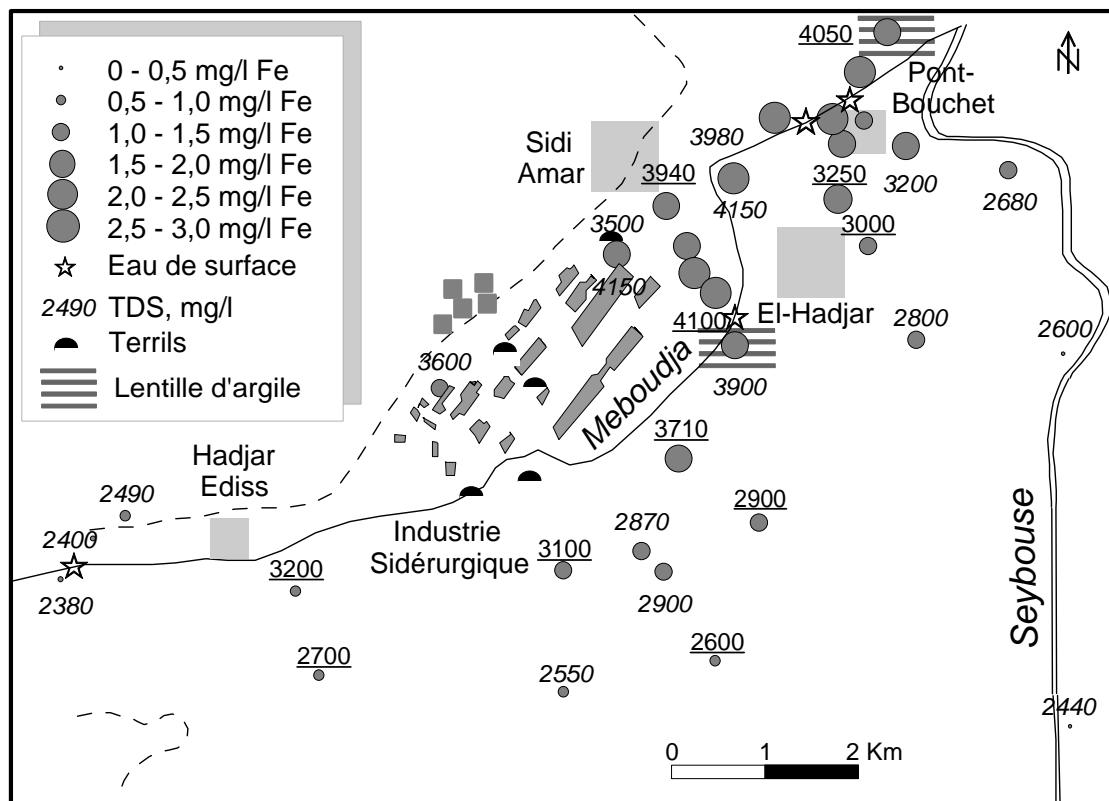


Figure. 39 Sels dissous totaux (TDS) et fer dans les eaux de surface et souterraines de la plaine de l'oued Meboudja (mg L⁻¹)

Pour étudier l'aptitude des eaux à l'irrigation on utilise en général les valeurs de TDS (solide total dissous) et le SAR (coefficient d'absorption du Sodium). Le risque alcalin dans les sols

augmente pour les fortes valeurs du SAR et diminue pour les eaux contenant une concentration élevée en calcium et en magnésium (Hem, 1959). Le SAR est donné par :

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

où tous les ions sont exprimés en milliéquivalents par litre.

Les valeurs du SAR peuvent être utilisées pour prédire le degré pour lequel l'eau d'irrigation a tendance à rentrer en échange cationique avec le sol. Des valeurs élevées de SAR impliquent un risque de sodicité qui peut endommager la structure et la fertilité du sol. Les données de la qualité des eaux souterraines prélevées en 1999 et en 2009, sont portées sur les diagrammes de salinité des Figs. (40(a)-3(b)) (U.S. salinity diagram U.S.S.L, 1954).

Les échantillons d'eau représentant la classe C_2S_1 sont considérées comme de bonne qualité alors que ceux de la classe C_3S_1 comme admissible. Les eaux de la classe C_3S_2 peuvent être utilisées pour les cultures tolérantes au sel. Les échantillons prélevés durant l'année 1999 occupent les classes C_1S_1 (3 échantillons), C_2S_1 (21 échantillons), C_3S_1 (1 échantillon), C_3S_2 (6 échantillons), C_3S_3 (1 échantillon) et aucun échantillon dans la classe C_4S_1 . Pour les analyses effectuées en 2009, les eaux se répartissent selon les classes suivantes : C_3S_1 (14 échantillons), C_3S_2 (9 échantillons), C_4S_1 (3 échantillons), C_4S_2 (3 échantillons) C_4S_3 (2 échantillons) et aucun échantillon dans la classe C_2S_1 , ce qui montre que la qualité de l'eau passe de la classe admissible à mauvaise (Tableau 26). Aussi, il apparaît que l'aptitude des eaux à l'irrigation se dégrade en fonction du temps.

Wilcox (1948) a donné une classification des eaux souterraines pour diverses utilisations selon leur caractéristique chimique. Le diagramme de Wilcox indique qu'il y a une détérioration appréciable de la qualité des eaux de 1999 à 2009 (Figs40 (a)-(b)).

Tableau 26 Détérioration de la qualité de l'eau d'irrigation (d'après le diagramme de Wilcox 1999 - 2009)

Classification	Nombre d'échantillons durant :	
	1999	2009
Excellente	3	-
Bonne	21	1
admissible	8	23
Médiocre	-	6
Mauvaise	-	2

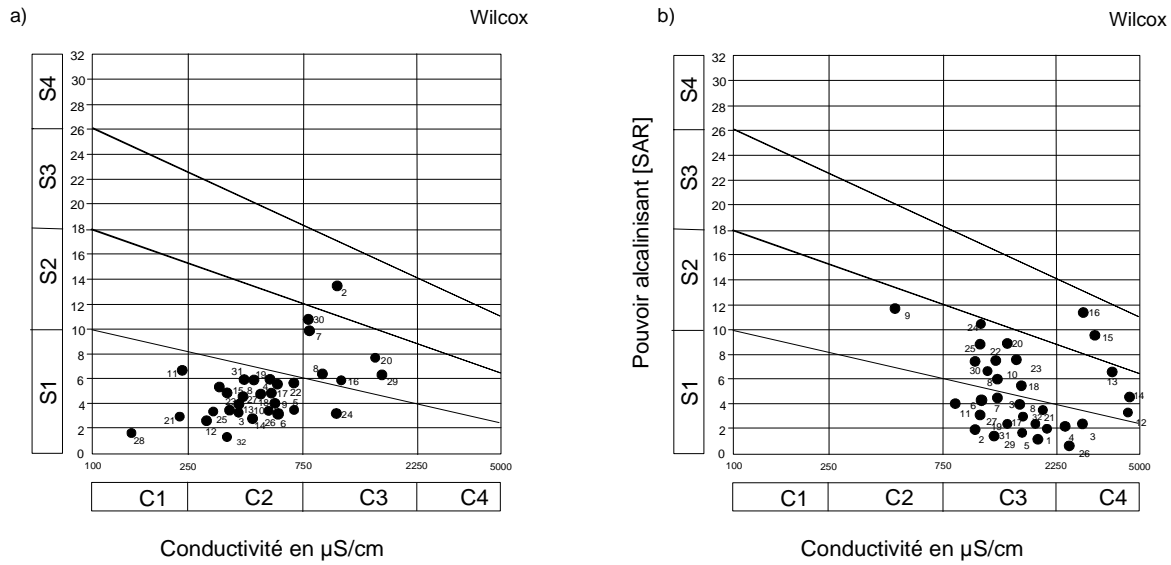


Figure 40. Diagramme de Wilcox
 (a) Aptitude des eaux à l'irrigation (1999)
 (b) Aptitude des eaux à l'irrigation (2009)

3.3. Evolution du fer-manganèse

L'étude à l'échelle du sous bassin de la Meboudja permet de montrer l'importance des relations nappe-oued sur l'évolution spatio-temporelle des teneurs des éléments toxiques tels que le fer et le manganèse.

La variation temporelle des teneurs en fer est sous-tendue par les phénomènes suivants :

- les relations nappe-oued (drainage ou alimentation),
- les variations saisonnières (pluies, oxygène dissous, etc....),
- les infiltrations à travers le couvert pédologique qui peuvent entraîner du fer complexé et des substances réductrices.

Pour démontrer la relation oued-nappe, nous avons reporté sur la Figure 41, les concentrations en fer et manganèse, les niveaux piézométriques ainsi que la distribution des pluies mensuelles enregistrées durant un cycle hydrologique complet (de novembre 2008 à octobre 2009).

Nous constatons globalement une augmentation des teneurs en fer à partir du mois de mai voir juillet, en fonction de la piézométrie observée dans chaque puits, consécutivement à une réalimentation de la nappe par l'oued et à un lessivage possible du sol.

La répartition spatiale des teneurs en fer de juillet 2009 de la Figure 41, montre une augmentation de ces dernières liée à la distance aux berges de la Meboudja, donc vraisemblablement aux réalimentations par l'oued et à une mauvaise oxygénation des eaux de la nappe.

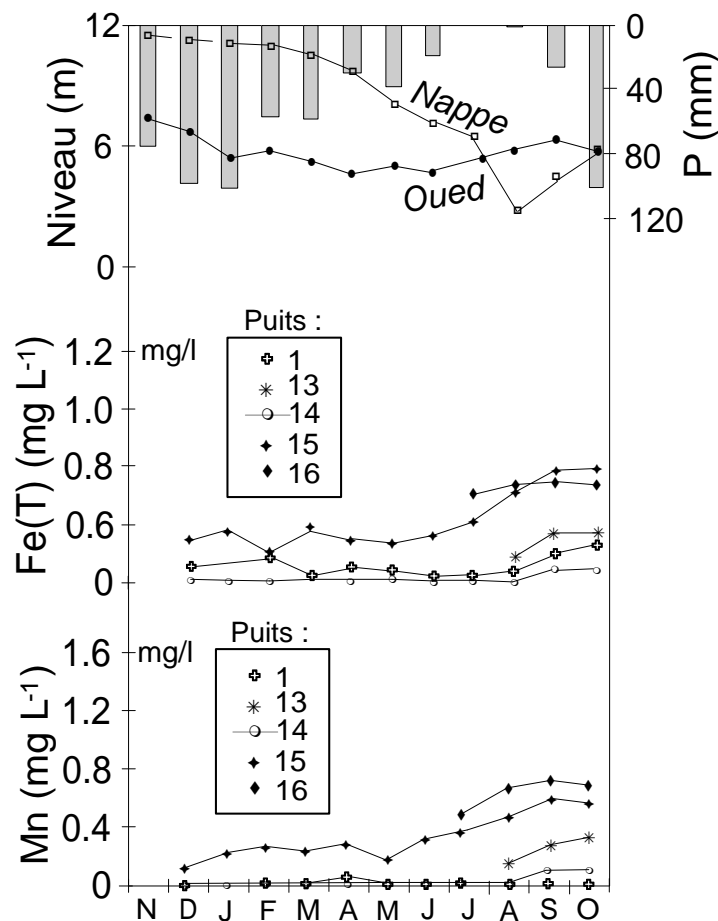


Figure. 41 Evolution dans le temps des teneurs en fer et manganèse de la nappe alluviale de la Meboudja de novembre 2008 à octobre 2009

3.4. Modélisation des écoulements souterrains et du transport de masse

Deux approches numériques distinctes ont été appliquées pour étudier le transfert de masse dans la nappe alluviale lié à l'activité industrielle dans la région :

- la simulation du comportement hydrodynamique à l'aide du code Modflow (McDonald et Harbaugh 1988) ;
- la simulation du transport de polluants en utilisant les données de sortie issues du module d'écoulement MODFLOW (profil des isopièzes et calcul des vitesses) comme données d'entrée par le module de transport MT3D.

- Schématisation des mécanismes d'écoulement et de transport

L'aquifère superficiel des sables argileux, reposant sur des argiles grises, a été découpé en 42 lignes et 41 colonnes de 200 m de coté couvrant un domaine de 8400 x 8200 m. Les limites

du modèle correspondent approximativement aux limites du sous bassin versant de l'oued Meboudja.

La première étape du modèle est la simulation des écoulements souterrains. La répartition des lignes de courant et par conséquent le champ des vitesses n'est pas affecté par la migration du polluant car la densité et la viscosité des eaux souterraines polluées est presque identique à celles des eaux non contaminées dans le secteur. L'équation d'écoulement est donc résolue indépendamment de l'équation de transport de masse. De plus, les relevés piézométriques dans le secteur indiquent que les gradients hydrauliques ne changent pas de manière significative avec le temps. On peut donc considérer que l'écoulement souterrain est en état d'équilibre.

Pour le code numérique d'écoulement, il est nécessaire d'introduire les caractéristiques géométriques de l'aquifère. Les côtes du toit et du mur ont été déterminées essentiellement à partir de l'analyse des données de forage et exprimées par rapport au nivellement général d'Algérie (NGA). L'épaisseur de cette nappe varie de 0 à 18 m. Les perméabilités oscillent entre 10^{-6} et 10^{-4} m s⁻¹, les valeurs les plus élevées sont localisées à l'aval de l'oued Meboudja ce qui, par conséquent, peut favoriser les interactions oued-nappe. La porosité efficace est prise égale à 0,1. La recharge a été calculée à partir des précipitations mensuelles par la formule de Thornthwaite est introduite dans le modèle. Des débits de pompage ont été introduits au niveau de certaines mailles.

La simulation du comportement hydrodynamique de l'aquifère repose également sur une définition rigoureuse des conditions aux limites. Trois types de limites à flux ont été proposés:

- Limite à flux entrant : la nappe reçoit une faible alimentation à partir des cipolins situés à l'Ouest qui renferment une nappe de faible importance. Au Sud Ouest, les apports à la nappe en provenance du lac Fetzara sont relativement plus significatifs.
- Limite à flux nul : au Sud, l'examen des différentes cartes piézométriques montre des apports négligeables en raison de la prédominance de la matrice argileuse dans les alluvions de hautes terrasses.
- Limite à flux sortant : au Nord et à l'Est, les isopièzes montrent presque toujours la même allure avec un drainage du domaine étudié par les alluvions de la grande plaine d'Annaba.

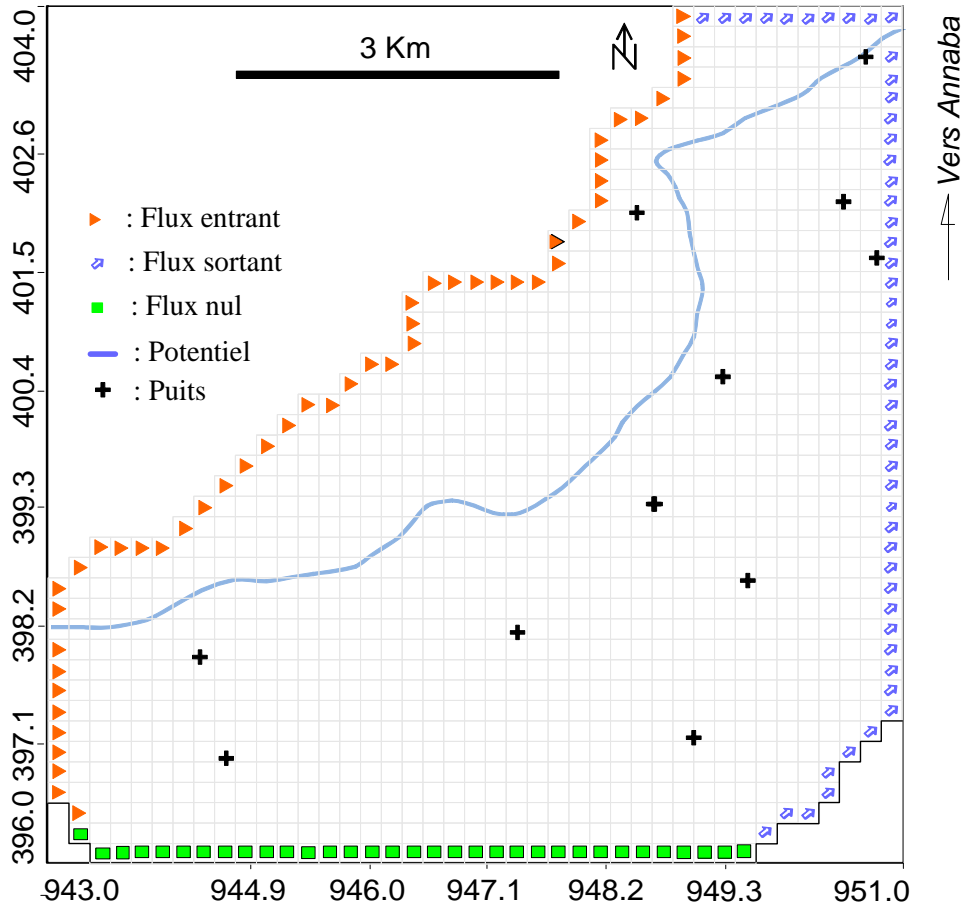


Figure. 42 Conditions aux limites du système aquifère de la plaine de Meboudja.

Les débits entrants sont estimés grâce à la loi de Darcy : $Q = SK \frac{\Delta h}{\Delta x}$ avec S : la section de

l'aquifère, K : la conductivité hydraulique, Δh : la perte de charge entre mailles voisines, Δx : le pas de la maille. En ce qui concerne la rivière on l'a assimilé dans un premier temps à une condition de potentiel imposé en considérant que la hauteur d'eau dans la Meboudja correspondait au toit de la nappe (topographie). Après plusieurs essais, toutes les mailles ont été passées en mailles rivières permettant ainsi au modèle de simuler les flux entre l'aquifère et les eaux de surface. Le passage en mailles rivière est relativement contraignant car il nécessite la prise en compte de trois nouveaux paramètres plus ou moins délicats à quantifier. Il s'agit de la transmissivité du fond de l'oued Coued en $m^2 s^{-1}$, de la côte de l'oued Houed en m et de l'élévation du fond de l'oued Rbot en m. Si les deux derniers paramètres (Rbot et Houed) peuvent être facilement approchés, il n'en est pas de même pour le premier Coued. La

conductance est donnée par la relation $Coued = \frac{K.L.W}{M}$ où K et M correspondent respectivement à la conductivité hydraulique et à l'épaisseur du matériau de colmatage de l'oued, L et W respectivement à la longueur et à la largeur du tronçon de l'oued à l'intérieur

de la cellule. Pour chacune de ces mailles rivières, le modèle calcule une charge hydraulique h . Si h est supérieur à R_{bot} le taux de perte de l'oued vers l'aquifère est alors calculé par $Q_{oued} = C_{oued} (H_{oued} - h)$. Dans le cas où $h > H_{oued}$, Q_{oued} devient négatif. L'oued draine la nappe et un flux de sortie est appliqué au système. Par contre, lorsque h se trouve sous la cote du fond de l'oued, les eaux de surface vont alimenter l'aquifère et le taux de perte par infiltration est donné par la relation $Q_{oued} = C_{oued} (H_{oued} - R_{bot})$ avec $R_{bot} \geq h$.

L'oued Meboudja a été représenté par des mailles à potentiel imposé.

L'état piézométrique initial choisi est celui de juillet 1999 et l'état final celui de juillet 2009.

La seconde phase de cette recherche est l'élaboration du modèle de transport de polluant. Les valeurs de TDS ont été choisies pour la simulation de la pollution des ressources en eau à l'aide du modèle de transport pour les raisons suivantes : (a) elles ont montré une évolution régulière des concentrations entre 2000 et près de 5000 mg L⁻¹ le long du parcours de la Meboudja et (b) les valeurs de TDS dans les eaux souterraines sont uniformes et oscillent en général entre 1500 et près de 3000 mg L⁻¹. Les données introduites dans le modèle peuvent être résumées comme suit :

En l'absence d'essai de traçage, la dispersivité longitudinale est déterminée à l'aide de la relation empirique de Neuman (1990) ; $\alpha_{longitudinal} = 0.0175.L^{1.46}$, elle serait égale à 150 m, en prenant la longueur maximale du panache polluant prise égale à 500 m. Cette méthode présente l'avantage d'être basée sur l'analyse de nombreuses observations de terrain en contexte alluviale et pour des distances inférieures à 3500 m selon l'axe d'écoulement. Elle représente, en général, un bon point de départ pour un travail de modélisation.

Les dispersivités transversale et verticale, correspondant respectivement au dixième et au centième de la distance du panache de pollution (L), c'est-à-dire égale à 5 et 0,5 m. Ces valeurs ont été assignées à l'ensemble des nœuds du modèle. Il était également supposé que le TDS n'est pas influencé par les valeurs de densité et par la viscosité, ce qui peut affecter le flux des eaux souterraines et la migration de polluants.

La diminution progressive des concentrations en TDS en s'éloignant de la Meboudja traduit une recharge relativement constante du polluant à partir de l'oued. Ainsi une concentration constante en TDS a été assignée aux différents nœuds de la Meboudja, avec une valeur de 5000 mg L⁻¹ à la source (au niveau des rejets de l'usine Arcelor-Mittal) près de Sidi Amar et 2000 mg L⁻¹ au niveau de sa confluence avec la Seybouse et à l'entrée de la plaine. Par

ailleurs, une valeur initiale de TDS de 1500 mg L^{-1} a été attribuée à l'ensemble des mailles du modèle.

- Modèle des écoulements souterrains

Le calage du modèle d'écoulement a été effectué par un simple procédé manuel d'essai-erreur jusqu'à l'obtention d'une superposition correcte des données mesurées et calculées.

Les résultats du calage illustrés par la superposition des cartes piézométriques observées et simulées (Fig. 43) peut être considéré comme satisfaisant. En particulier sur des zones caractéristiques comme par exemple en bordure de la rivière, on retrouve bien sur la carte piézométrique calculée les principales relations nappe-oued (drainage ou alimentation) visibles sur la carte élaborée à partir des mesures de terrain. Il en est de même que ce soit sur la limite ouest dans le secteur situé en bordure des formations métamorphiques, ou sud à proximité des formations peu perméables des hautes terrasses et des argiles numidiennes ou alors à l'est où la limite a été choisi arbitrairement.

En revanche, au nord de la plaine, les courbes piézométriques sont moins bien reconstituées sur la carte simulée. Ceci est dû aux variations fréquentes des prélèvements dans ce secteur. Une définition plus fine aurait permis une meilleure similitude avec la piézométrie de référence.

Les critères employés pour juger de la fiabilité des résultats sont l'erreur moyenne, l'erreur moyenne absolue et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne calculée sur 11 puits d'observation. Les valeurs obtenues sont respectivement de -0,14 ; 3,2 et 3,6 m (Fig. 44).

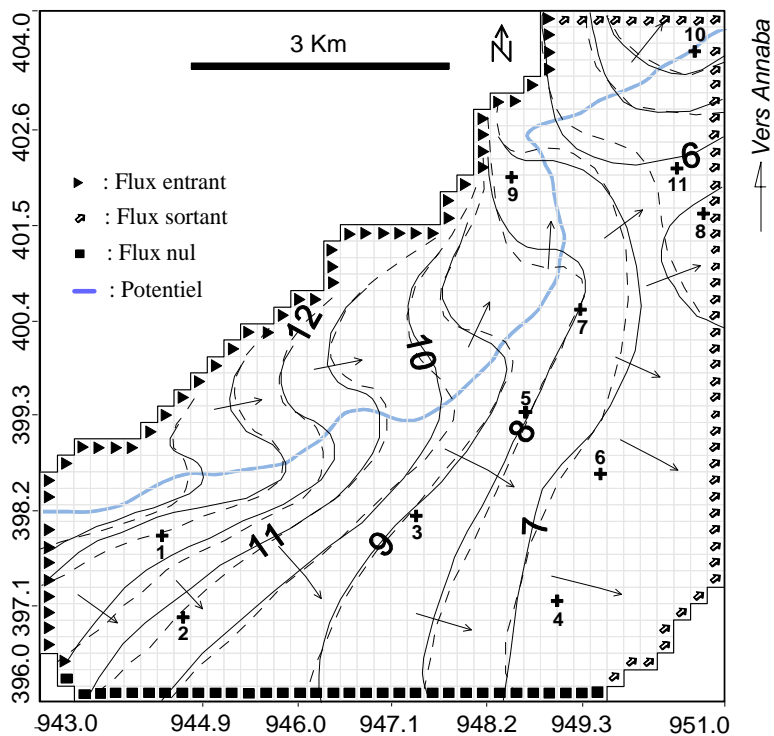


Figure. 43 Reconstitution de la piézométrie de la nappe en m pour juillet 2009 (traits pleins : piézométrie mesurée, traits discontinus : piézométrie simulées)

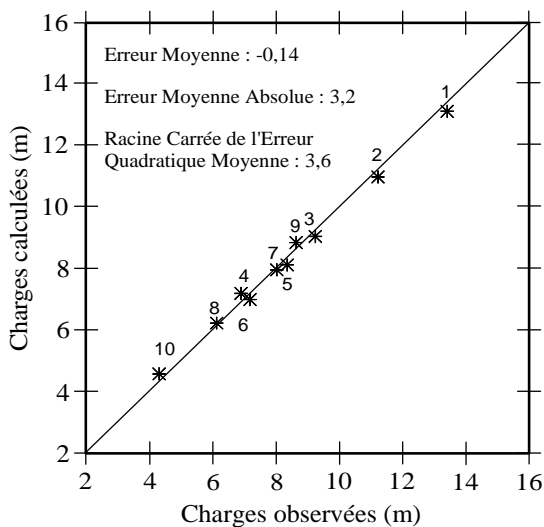


Figure. 44 Comparaison entre côtes piézométriques mesurées et côtes simulées, juillet 2009

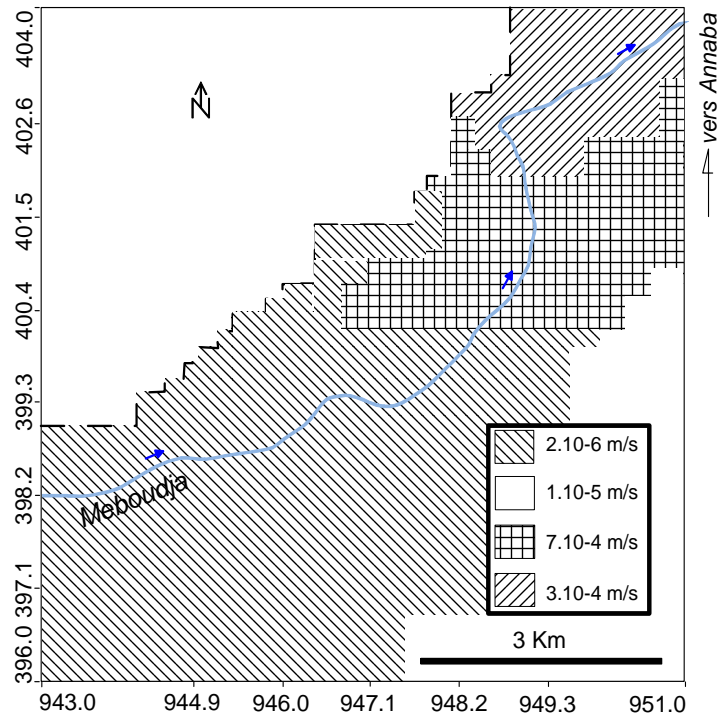


Figure.45 Carte des perméabilités calculées de la nappe alluviale de la Meboudja

Les essais consécutifs du calage ont permis de modifier les valeurs de perméabilité afin d'aboutir à un écart maximum de 0,5 m entre les cotes piézométriques mesurées et simulées. On obtient ainsi une carte de répartition des perméabilités qui peut se traduire par une zonalité des valeurs allant de 3.10^{-4} à $2.10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Fig. 45). La perméabilité au niveau des berges varie de $2.10^{-6} \text{ m} \text{ s}^{-1}$ en amont de la Meboudja à $3.10^{-4} \text{ m} \text{ s}^{-1}$ en aval de l'oued. La forte perméabilité des berges, à l'aval de l'oued, peut s'expliquer par le lessivage des formations consécutif aux échanges permanents entre l'oued et la nappe. C'est cette relation oued-nappe qui peut donc être à l'origine de la pollution des eaux souterraines compte tenu de la forte contamination de l'oued Meboudja par les différents rejets urbains et industriels.

Si l'on compare les perméabilités calculées et celles mesurées, là où des mesures sont disponibles, on peut noter qu'elles sont globalement du même ordre de grandeur ce qui donne pratiquement la même répartition des transmissivités obtenues à partir des pompages d'essai.

La quantification des volumes échangés entre les différents compartiments permet d'avoir une meilleure connaissance du système hydrogéologique globale.

Il est ainsi possible de connaître les volumes échangés en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ entre les différents compartiments réservoirs qui sont : la nappe alluviale, l'oued et la recharge (tableau 27).

En observant les flux échangés, on remarque tout d'abord que le débit d'alimentation de la nappe à l'oued est 1,5 fois plus élevé que celui de l'oued à la nappe. Cependant, on peut noter que le drainage de l'oued par la nappe est non négligeable et peut toucher l'ensemble du site

étudié. Par conséquent les eaux de l'oued, véhiculant une quantité importante de polluants, peuvent s'infiltrer et souiller les eaux souterraines. Néanmoins, il serait intéressant de réaliser des jaugeages différentiels tout au long de l'oued afin de mieux appréhender les relations oued-nappe à une échelle beaucoup plus fine.

Il faut souligner également que le flux sortant au travers de la limite ouest est presque égal au débit de recharge par les précipitations de la nappe alluvionnaire.

Tableau 27 Synthèse du calage hydrodynamique – Bilan des flux – Système aquifère

	Entrées m³.s⁻¹	Entrées %	Sorties m³.s⁻¹	Sorties %	Entrée-Sortie m³.s⁻¹
Puits	0		0,027	7,7	-0,027
Recharge	0,272	77,9	0		+0,272
Flux aux limites	0,024	6,9	0,246	70,7	-0,222
Potentiel	0,053	15,2	0,075	21,6	-0,022
Somme	0,349		0,348		+0,001

- Modèle de transport de masse

Les courbes d'égalité de valeurs de TDS établies pour l'année 2009 indiquent que les polluants suivent le sens d'écoulement. Pendant les 10 dernières années (de 1999 à 2009), le panache s'étend sur une largeur de près de 600 m de part et d'autre de la Meboudja (Fig. 46). Les écarts entre les concentrations calculées et mesurées sont en moyenne de 50 mg L⁻¹ et oscillent entre 2 et 100 mg L⁻¹. Elles sont vraisemblablement dues aux hypothèses relatives (Fig. 47) ; (i) aux pompages considérés comme uniforme sur l'ensemble des puits, (ii) à la concentration affectée à l'ensemble des nœuds de la Meboudja considérée comme étant une source diffuse ce qui est difficile à identifier compte tenu de la complexité des interactions entre l'oued et la nappe.

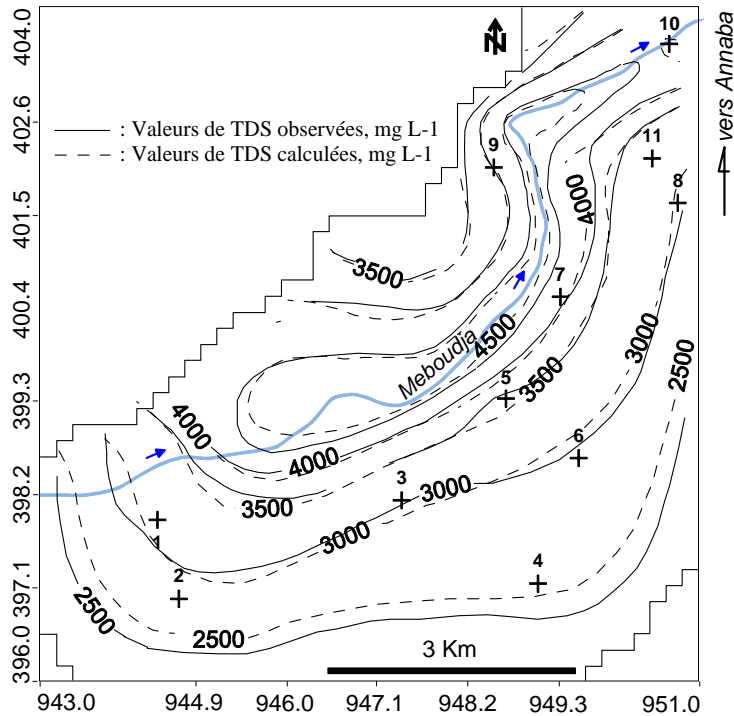


Figure.46 Concentration en TDS simulée en mg L⁻¹ pour juillet 2009.

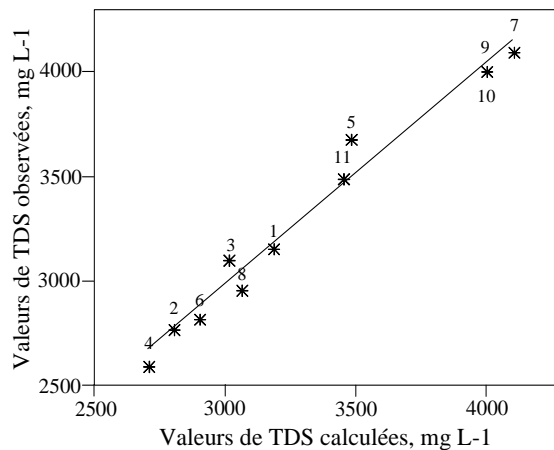


Figure. 47 Comparaison entre valeurs de TDS mesurées et simulées, juillet 2009

L'analyse de sensibilité du modèle a été effectuée en faisant varier les trois paramètres suivants :

- le coefficient de perméabilité K ;
- le coefficient de dispersion transversale α_T ;
- la charge polluante à la source, représentée par les valeurs de TDS.

Pour les perméabilités, les valeurs ont été augmentées puis diminuées de 20% pour l'ensemble des nœuds du modèle. En général, les variations de perméabilité affectent la vitesse des eaux souterraines et conduisent à une redistribution de la concentration du soluté. En somme, plus la conductivité est élevée, plus le mouvement du soluté est rapide.

Par conséquent, la concentration est réduite à proximité des sources puis augmenté et vice versa (colonnes 3 et 4, tableau 28).

La dispersivité longitudinale a été porté de 120 à 180 m (150 ± 20 m). La dispersivité transversale a été prise comme étant égale au un dixième de la distance L. Les variations des valeurs de TDS, suite à la hausse de la dispersivité, peuvent être considérées comme insignifiantes (colonnes 5 et 6, tableau 28). Cela traduit la prédominance du processus d'advection dans la migration des polluants dans la nappe.

Enfin, les résultats des simulations montrent que l'augmentation des valeurs de TDS de 20% au niveau des sources de pollution provoque une hausse des valeurs de TDS dans les mailles situées notamment autour des sources de pollution. Dans le cas d'une réduction de 20%, les valeurs diminuent au niveau des mailles sélectionnées (colonnes 7 et 8, tableau 28).

Tableau 28 Variation des valeurs de TDS lors de l'analyse de sensibilité

Puits	K_0C	K_1C	K_2C	α_1C	α_2C	$C_1'C$	$C_2'C$
1	3160	3120	3130	3175	3176	3162	3162
2	2770	2770	2770	2770	2770	2770	2770
3	3107	3125	3115	3110	3110	3116	3116
4	2600	2620	2610	2597	2597	2605	2605
5	3708	3702	3720	3700	3698	3702	3703
6	2860	2710	2800	2910	2908	2845	2846
7	4120	4070	4250	4550	4550	4460	4455
8	3011	2010	2030	3010	3012	2990	2992
9	4000	4040	4010	3080	3080	3090	3091
10	4080	4080	4080	4082	4082	4078	4082
11	3250	3250	3250	3252	3252	3250	3252

K_0 : perméabilité du modèle, m/s ; $\alpha_L = 150$ m (dispersivité longitudinale) ; $C' = 5000$ mg/l (concentration) ; K_0C : TDS pour K_0 , α_L et C' ; K_1C : TDS pour $K_1 = 80\%$ de K_0 , α_L et C' ; K_2C : TDS pour $K_1 = 120\%$ de K_0 , α_L et C' ; α_1C : TDS pour $\alpha_L = 120$ m, K_0 , C' ; α_2C : TDS pour $\alpha_L = 180$ m, K_0 , C' ; $C_1'C$: TDS pour $C_1' = 4000$ mg/l, K_0 , α_L ; et $C_2'C$: TDS pour $C_1' = 6000$ mg/l, K_0 , α_L .

Au terme de cette recherche, il apparait que les eaux souterraines sont fortement polluées et ne peuvent être utilisées pour l'irrigation. Cette pollution est due vraisemblablement à une réalimentation de la nappe alluvionnaire par les eaux de l'oued chargée en polluants industriels et urbains.

Le schéma synthétique de la Fig. 48, inspiré des travaux de Chauve *et al.* (1986), montre en effet qu'une forte épaisseur des niveaux argileux et des limons peut jouer le rôle d'écran en surface et favoriser les conditions réductrices dans la nappe. Ces dernières sont notablement renforcées lorsque des matières organiques s'associent aux argiles.

Au cours de leur transit vers la nappe les eaux de l’oued riches en matières organiques provoquent au niveau des berges une prolifération bactérienne qui se manifeste par une diminution de l’oxygène dissous, du pH, du eH et une mise en solution du fer et du manganèse avec dégagement de H_2S et NH_4 .

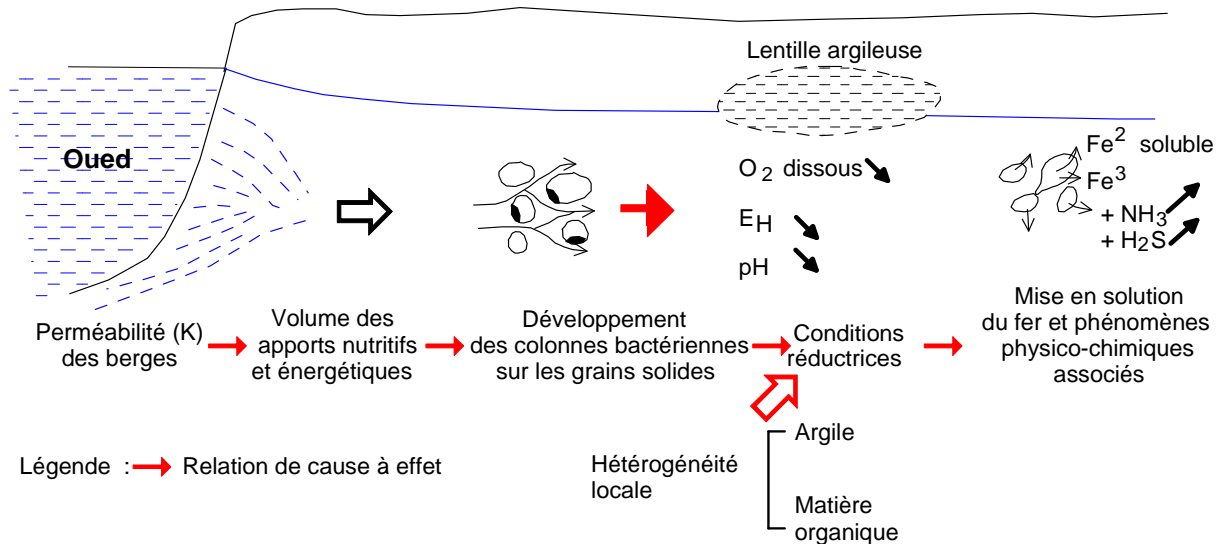


Figure. 48 Schématisation de l’évolution des teneurs en fer dans la nappe alluviale

Conclusion :

La présente étude se rapporte à un cas de pollution des eaux superficielles et souterraines engendrée par le stockage des déchets industriels directement sur le sol et par les rejets non contrôlés d’effluents industriels dans le milieu récepteur.

La pollution des eaux souterraines s’étale latéralement sur une bande de 500-600 m de part et d’autre de l’oued Meboudja. Cette dernière reçoit en effet les effluents industriels dans le secteur de Sidi-Amar où elle est en relation hydraulique avec les alluvions perméables. La propagation de la pollution est facilitée par les prélèvements effectués dans les puits pour les besoins en eau pour l’irrigation et pour les besoins des nombreuses unités industrielles implantées dans le secteur de Sidi Amar - El Hadjar. La modélisation des écoulements souterrains et de transport de masse a permis de mieux comprendre les interactions oued-nappe et d’évaluer la migration de contaminant.

Les effluents non traités rejetés par les unités industrielles doivent être contrôlés pour maintenir les concentrations en dessous des standards de qualité des eaux notamment pour le TDS. La présente étude a permis de constituer un stock important d’informations pour l’évaluation de la contamination des eaux dans la région d’El-Hadjar. Pour réduire les

interactions eaux superficielles - eaux souterraines, il est impératif de modérer, voire interdire, l'exploitation des eaux souterraines sur les bordures de la Meboudja.

Des campagnes de contrôle de la qualité des eaux doivent être effectuées d'une manière systématique pour prévoir toute augmentation excessive des teneurs en éléments toxiques.

Références bibliographiques

- Azzaoui, S., El Hanbali, M., Leblanc, M. (2002) Cuivre, Plomb, Fer et Manganèse dans le bassin versant du Sebou ; Sources d'apport et impact sur la qualité des eaux de surface. *Water Qual. Res. J. Canada*. Volume **37**, No. 4, 773-784.
- Belhassan. K., Hessane. M. A., Essahlaoui, A. (2010) Interactions eaux de surface–eaux souterraines: bassin versant de l'Oued Mikkes (Maroc). *Hydrological Sciences Journal*, **55**(8), 1371- 1384
- Benoit, G., Comeau, A. (2005) Méditerranée : les perspectives du Plan Bleu sur l'environnement et le développement. Editions de l'Aube (Le Moulin du Château, 84240 La Tour d'Aigues, France), 432 p.
- Chan, N. W., Bouguerra, L. (2005) Introduction to Water Issues on a Global Perspective, *contribution à l'Assemblée mondiale des citoyens sur l'eau, Penang*.
- Chauve, P., Mania J., Mignot, C., Rémy, F., Verjus, Ph. (1986) Interaction nappe-rivière et cycle de fer-manganèse dans la nappe alluviale de L'Ognon (Franche-Comté). *Hydrogéologie*, **1**,3-18
- Debièche, T.H. (2002) Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Th. Doct. Univ. Franche-Comté, 199p.
- Debièche, T. H., Mania, J., Mudry, J. (2003) Species and mobility of phosphorus and nitrogen in a wadi relationship. *Journal of African Earth Sciences*, **37**/1-2/47-57.
- Djabri, L., Hani, A., Laouar, R., Mania, J., Mudry, J., Louhi, A. (2003) Potential pollution of groundwater in the valley of the Seybouse River, north-eastern Algeria. *Environmental Geology*, vol **44**, no 6, pp. 738-744
- Djorfi, S., Hani, A., Laouar, R., Djabri, L. (2008) Impacts des rejets industriels sur la qualité des eaux de l'aquifère d'Annaba (Algérie). *Bulletin du Service Géologique National*. Vol. **19**, n°1, pp 33-49.
- Gurunadha, V. V. S. Rao, Dhar, R. L., Subrahmanyam, K. (2001) Assessment of contaminant migration in groundwater from and industrial development area, Medak district, Andhra Pradesh, India. *Water, Air and Soil Pollution* **128**: 369-389.
- Hani, A., Djorfi, S., Djabri, L., Lamouroux, C., Lallahem, S (2007). Impact of the industrial rejections on water of Annaba aquifer (Algeria). *European Water* **19/20**: 3-14.
- Hani A., Lallahem, S., Mania, J., Djabri, L. (2006) On the use of finite-difference and Neural network models to evaluate the impact of underground water overexploitation. *Hydrol. Process.* **20**, 4381-4390.
- Hani, A., Mania, J., Djabri, L., Mudry, J. (2003) Identification des apports latéraux et de drainage partir des réponses chimiques et isotopiques : cas du système aquifère Annaba-Bouteldja. *Africa Géosciences Review* vol. **10**, no 3, pp. 267-280.
- Kherici, N. (1993) Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba la Mafragh (Nord - Est Algérien)). Th. Doct. Es-Sciences, Univ. Annaba 170p.
- Lamouroux, L., Hani, A. (2006) Identification of groundwater flow paths in complex systems aquifer. *Hydrol. Process.* **20**, 2971-2987.
- McDonald, J. M., Harbaugh, A.W. (1988) A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model, Techniques of Water Ressources Investigations of the U.S. *Geological Survey Book*, **6**, pp. 586.

- Meybeck, M. (1998) La seine en son bassin : fonctionnement écologique d'un écosystème fluvial anthropisé. Elsevier, Paris.
- Nouacer R., 1993, Essai de synthèse des caractéristiques hydrologiques et hydrochimiques de la nappe du massif dunaire de Boutheldja, Thèse de Magister, Université de Annaba.
- Neuman, S. P. (1990) Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media. *Water Resources Research* 26(8), 1749-1758.
- Panagoulia, D. and Dimou, G., (1996) Sensitivities of groundwater-streamflow interaction to global climate change. *Hydrological Sciences Journal*, 41 (5): 781-796.
- Pang, L., Close, M., Schneider, D., Stanton, G. (2002) Effect of pore-water velocity on chemical nonequilibrium transport of Cd, Zn, and Pb in alluvial gravel columns. *Journal of Contaminant Hydrology* 57 (2002) 241– 258.
- Ramdani, R. 1996, Etude hydrologique et simulation par modèle mathématique de la nappe dunaire de la région de Boutheldja, Thèse de Magister, Université de Annaba.
- Rouabhia, A., Djabri, L., Hadji, F., Baali, C., Fehdi, A., Hani, A. (2010) Geochemical characterization of groundwater from shallow aquifer surrounding Fetzara Lake N. E. Algeria. *Arab J Geosci DOI* 10.1007/s12517-010-0202-6.
- Vila J.M. (1980).- La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro – tunisiens. Thèse Docteur es sciences. Université de Pierre et Marie- Curie. Paris VI, France, pp.58-68.

Chapitre V:

Etude des concentrations, de la mobilité et de la spéciation des métaux lourds

Introduction

La définition du terme métal est sujette à controverse et les classifications adoptées sont diverses selon les champs disciplinaires considérés.

Dans la classification périodique des éléments, les métaux et métalloïdes comprennent tous les éléments sauf les gaz rares et H, B, C, N, O, F, P, S, Cl, Br, I et Al (GADD, 1992). Les métalloïdes sont les éléments Si, Ge, As, Se, Sb et Te, tandis que les métaux regroupent les éléments des métaux alcalins (cations monovalent) et métaux alcalino-terreux (cations divalent), et les métaux de transition (voir table de Mendeleïev)

La terminologie « métaux lourds » est relativement floue. Ceux-ci sont souvent définis comme un groupe de 65 éléments métalliques. De densité supérieure à 5, pouvant avoir des effets toxiques sur les micro-organismes et autres formes de vie. Cette définition regroupe cependant des éléments dont les propriétés chimiques et biologiques différents, certains d'entre eux ayant des structures typiquement non métalliques (Gadd, 1992)

Les eaux souterraines sont soumises, de plus en plus intensivement, aux rejets volontaires d'effluents polluants, eaux usées ou eau de ruissellement pluvial en milieu urbanisé (Pitt *et al.*, 1999; Bower, 2002)

Certains éléments sont des « **oligo-éléments** » indispensables au développement ou à certaines fonctions des organismes vivants : Cu, Zn, Ni, Co, mais peuvent devenir toxiques selon la nature, la teneur, la mobilité et la biodisponibilité de l'élément et du milieu considéré. En revanche d'autres métaux (plomb ou mercure par exemple) n'ont aucune fonction biologique essentielle connue à ce jour.

Par la suite nous emploierons le plus souvent, par souci de simplification, le terme générique « métaux », mais nous parlerons d'éléments en traces pour désigner les polluants inorganiques faisant l'objet de notre étude.

Les métaux sont ajoutés à la nature soit de manière directe par les pratique agricoles intensives (pesticides, fertilisants, épandage organiques), soit de manière indirecte par transport

atmosphérique d'émission d'automobiles (combustion des véhicules à moteur), voire par ruissellement des eaux de pluies sur des surfaces imperméabilisées chargées.

Les métaux lourds, font partie des cas de pollution représentant un problème environnemental majeur. Ils peuvent migrer dans les eaux souterraines, s'accumuler dans la chaîne alimentaire et présenter des risques pour la santé humaine (Jourdan *et al.*, 2005). Les sources anthropiques d'émissions de substances métalliques sont multiples, et sont principalement dues à L'intensification des activités industrielles et agricoles, ainsi que la diversification des modes de sous-produits de production ou des déchets après consommation, rendent vulnérables les ressources en eau souterraines. Aux Etats-Unis, 54 % des affections de la santé humaine ayant pour origine la contamination d'eau sont attribuées à l'eau souterraine (Riser-Roberts, 1992; Banton et Bangoy, 1999).

La qualité des eaux naturelles dépend essentiellement de leur origine, de la nature des alluvions et des roches qui emmagasinent l'eau, ainsi que des conditions physico-chimiques caractéristiques du milieu. Ces dernières ont fait l'objet de cette étude, compte tenu de leur rôle important dans le changement de la forme chimique des éléments, on va examiner l'évolution de deux éléments chimiques (Fer, manganèse) en fonction de la variation du Eh et pH....etc.

1. Les différentes formes des métaux :

Dans les systèmes environnementaux comme les sols ou l'eau, les métaux lourds peuvent exister sous des formes chimiques variées (espèces) : libre, complexé avec un ligand « simple » organique ou inorganique, complexé avec un ligand colloïdal ou macromoléculaire, adsorbé ou incorporé à des particules en suspension, adsorbé ou assimilé par un organisme vivant.(Fig.49). La répartition quantifiée du métal entre ces différentes formes physico-chimique définit sa spéciation. Cette spéciation conditionne son devenir et son transfert dans le milieu, ainsi que sa biodisponibilité et sa toxicité dans l'environnement. (Weber, 2006).

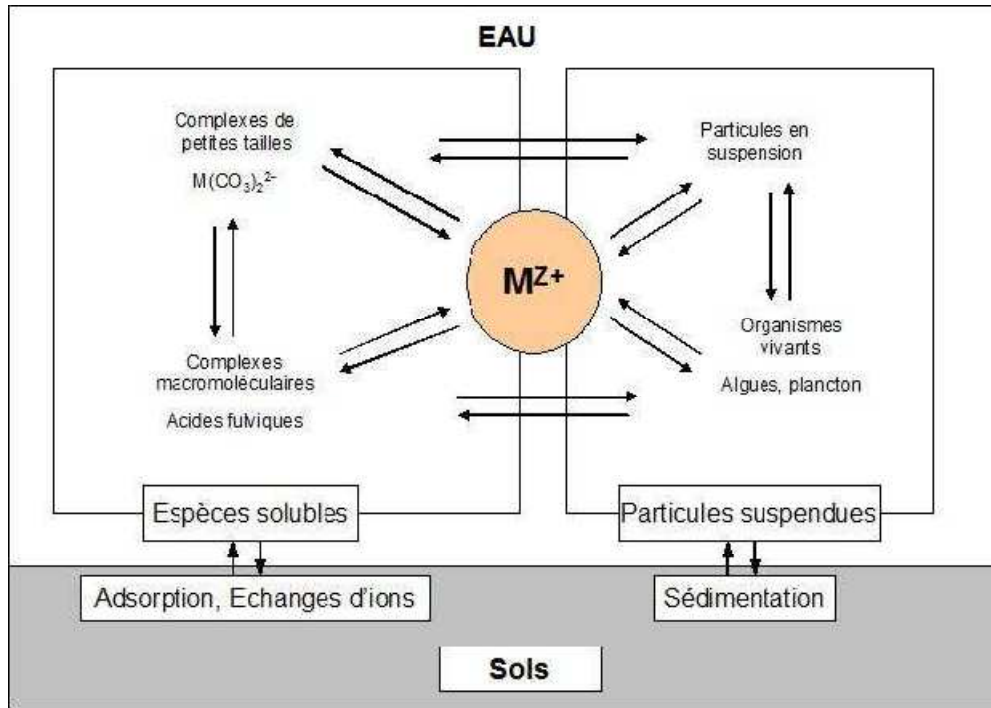


Figure. 49 Répartition schématique des phénomènes influant la spéciation des métaux dans les milieux naturels (Buffle, 1988)

tableau-periodique.fr

Légende:

Non-métaux	Métaux alcalins	Métaux alcalino-terreux	Métaux de transition
Métaux pauvres	Métalloïdes	Halogènes	
Gaz nobles	Lanthanides	Actinides	

PERIODE \ GROUPE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																															
1	Hydrogène 1 H																	Hélium 2 He																															
2	Lithium 3 Li	Béryllium 4 Be											Bore 5 B	Carbone 6 C	Azote 7 N	Oxygène 8 O	Fluor 9 F	Néon 10 Ne																															
3	Sodium 11 Na	Magnésium 12 Mg											Aluminium 13 Al	Silicium 14 Si	Phosphore 15 P	Soufre 16 S	Chlore 17 Cl	Argon 18 Ar																															
4	Potassium 19 K	Calcium 20 Ca	Scandium 21 Sc	Titane 22 Ti	Vanadium 23 V	Chrome 24 Cr	Manganèse 25 Mn	Fer 26 Fe	Cobalt 27 Co	Nickel 28 Ni	Cuivre 29 Cu	Zinc 30 Zn	Gallium 31 Ga	Germanium 32 Ge	Arsenic 33 As	Sélénium 34 Se	Brome 35 Br	Krypton 36 Kr																															
5	Rubidium 37 Rb	Strontium 38 Sr	Yttrium 39 Y	Zirconium 40 Zr	Niobium 41 Nb	Molybdène 42 Mo	Téchnétium 43 Tc	Ruthénium 44 Ru	Rhodium 45 Rh	Palladium 46 Pd	Argent 47 Ag	Cadmium 48 Cd	Indium 49 In	Étain 50 Sn	Antimoine 51 Sb	Tellure 52 Te	Iode 53 I	Xénon 54 Xe																															
6	Césium 55 Cs	Baryum 56 Ba			Hafnium 72 Hf	Tantale 73 Ta	Tungstène 74 W	Rhénium 75 Re	Osmium 76 Os	Iridium 77 Ir	Platine 78 Pt	Or 79 Au	Mercuré 80 Hg	Thallium 81 Tl	Plomb 82 Pb	Bismuth 83 Bi	Polonium 84 Po	Astate 85 At	Radon 86 Rn																														
7	Françium 87 Fr	Radium 88 Ra			Rutherfordium 104 Rf	Dubnium 105 Db	Seaborgium 106 Sg	Bohrium 107 Bh	Hassium 108 Hs	Meitnerium 109 Mt	Darmstadtium 110 Ds	Roentgenium 111 Rg	Copernicium 112 Cn	Ununtrium 113 Uut	Ununquadium 114 Uuq	Ununpentium 115 Uup	Ununhexium 116 Uuh	Ununseptium 117 Uus	Ununoctium 118 Uuo																														
			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td>Lanthane 57 La</td> <td>Cérium 58 Ce</td> <td>Praséodyme 59 Pr</td> <td>Néodyme 60 Nd</td> <td>Prométhium 61 Pm</td> <td>Samarium 62 Sm</td> <td>Europium 63 Eu</td> <td>Gadolinium 64 Gd</td> <td>Terbium 65 Tb</td> <td>Dysprosium 66 Dy</td> <td>Holmium 67 Ho</td> <td>Erbium 68 Er</td> <td>Thulium 69 Tm</td> <td>Ytterbium 70 Yb</td> <td>Lutécium 71 Lu</td> </tr> <tr> <td>Actinium 89 Ac</td> <td>Thorium 90 Th</td> <td>Protactinium 91 Pa</td> <td>Uranium 92 U</td> <td>Neptunium 93 Np</td> <td>Plutonium 94 Pu</td> <td>Américium 95 Am</td> <td>Curium 96 Cm</td> <td>Berkélium 97 Bk</td> <td>Californium 98 Cf</td> <td>Einsteinium 99 Es</td> <td>Fermium 100 Fm</td> <td>Mendélévium 101 Md</td> <td>Nobélium 102 No</td> <td>Lawrencium 103 Lr</td> </tr> </table>																	Lanthane 57 La	Cérium 58 Ce	Praséodyme 59 Pr	Néodyme 60 Nd	Prométhium 61 Pm	Samarium 62 Sm	Europium 63 Eu	Gadolinium 64 Gd	Terbium 65 Tb	Dysprosium 66 Dy	Holmium 67 Ho	Erbium 68 Er	Thulium 69 Tm	Ytterbium 70 Yb	Lutécium 71 Lu	Actinium 89 Ac	Thorium 90 Th	Protactinium 91 Pa	Uranium 92 U	Neptunium 93 Np	Plutonium 94 Pu	Américium 95 Am	Curium 96 Cm	Berkélium 97 Bk	Californium 98 Cf	Einsteinium 99 Es	Fermium 100 Fm	Mendélévium 101 Md	Nobélium 102 No	Lawrencium 103 Lr
Lanthane 57 La	Cérium 58 Ce	Praséodyme 59 Pr	Néodyme 60 Nd	Prométhium 61 Pm	Samarium 62 Sm	Europium 63 Eu	Gadolinium 64 Gd	Terbium 65 Tb	Dysprosium 66 Dy	Holmium 67 Ho	Erbium 68 Er	Thulium 69 Tm	Ytterbium 70 Yb	Lutécium 71 Lu																																			
Actinium 89 Ac	Thorium 90 Th	Protactinium 91 Pa	Uranium 92 U	Neptunium 93 Np	Plutonium 94 Pu	Américium 95 Am	Curium 96 Cm	Berkélium 97 Bk	Californium 98 Cf	Einsteinium 99 Es	Fermium 100 Fm	Mendélévium 101 Md	Nobélium 102 No	Lawrencium 103 Lr																																			

Tableau 29 Tableau périodique des éléments, (table de Mendeleïev, 1869)

2. Origine des métaux lourds

La présence des métaux lourds dans l'eau peut avoir diverses origines :

- lessivage des terrains avec dissolution des roches et des minerais contenus dans le sous-sol ;
- rejets industriels (pollutions minières, métallurgiques, sidérurgiques, ...)
- corrosion des canalisations métalliques (en fonte ou en acier), existence de dépôts antérieurs ou conduites défectueuses ;
- utilisation de sels de fer comme agents de coagulation dans la production d'eau potable.

Par Conséquences, les modifications de régimes induisant des variations de niveau piézométrique par des pompages excessifs dans les zones urbaines peuvent aussi causer des contaminations par interconnexion des flux. L'impact peut être d'ordre hydrologique dans la mesure où une importante exploitation de la ressource a une action sur le fonctionnement hydraulique de la nappe (Collin et Melloul, 2003). Le mouvement se fait naturellement, soit à l'intérieur des terres, on parle ainsi de mouvement descendant des sources de surface et des eaux d'irrigation vers l'aquifère et de mouvement ascendant des formations inférieures vers l'aquifère (Maimone et Fitzgerald, 2001)

a) Pollutions causées par l'industrie :

L'industrie est l'élément moteur de croissance et de dégradation de l'environnement dans la ville d'Annaba et sa région, aux paysages distincts de plaines et de montagnes. L'industrialisation a assurément permis de répondre aux besoins des populations et du pays en produits sidérurgiques, engrais azotés, constructions ferroviaires et autres industries de transformations (Mebirouk, 2007).

Tableau 30 Principaux polluants à Annaba

Polluants	Origine	Effets environnementaux	Effets Biologiques	Observations
Monoxyde de carbone (CO)	Combustion incomplète des carburants.		Bloque l'oxygénation des tissus. A forte dose : asphyxie mortelle.	Effet de proximité
Oxyde d'azote (NOX)	Trafic automobile	Formation d'ozone En basse Atmosphère (NOX + Vapeur = contribution aux pluies acides)	Altération des fonctions respiratoires	Le monoxyde émis à l'échappement s'oxyde et se transforme en dioxyde d'azote (NO ₂) plus toxique.
Dioxyde de soufre SO ₂	Combustion du Fioul	SO ₂ + Vapeur = Acide sulfurique (Pluies Acides)	Gaz irritant : asthme et gêne respiratoire	Effet régional
Particules en suspensions	Emission des moteurs Diesel	Souillures des bâtiments	Se fixant dans les voies respiratoires	Effet de proximité
Plomb	Nuisances en ville		Oxyde de plomb est un toxique neurologique, rénal, etc.	Effet de proximité
Dioxyde de carbone (CO ₂)	Combustion des carburants	Effet de serre		Effet planétaire
Ozone (O ₃)	Composant de l'air. Réaction photochimique entre oxygène de l'air, oxydes d'azote et de soufre, COV sous l'effet du rayonnement ultra violet du soleil.	Concentration en basse atmosphère	Irritation oculaire, céphalées. Altère les fonctions respiratoires et la résistance aux infections.	Protège la planète en haute altitude

Source (H. Mebirouk, 2007)

b) Pollution indirecte par transport atmosphérique d'émission d'automobiles :

Selon les statistiques (Mars 2010) annuels du parc des véhicules de la zone d'étude (*in* Mourdi, 2011), le tableau suivant illustre les différents types de véhicules et leurs âges ainsi que l'évolution de leur nombre en fonction du temps durant une période de 20 ans (1989-2009)

Tableau 31 Nombre de véhicules par type et par âge, wilaya d'Annaba (inventaire 2009, *in* Mourdi, 2011)

Type Age	Voitures	Camions	Camionnettes	Bus	Tracteurs	Engins	Total
	Inf. à 5ans	28220	618	4261	510	378	208

De 5 à 10 ans	15895	379	2001	345	305	129	19290
Sup. à 10ans	38165	6535	13024	1931	4344	3305	70238
Total	82280	7532	19286	2786	5027	3642	124072

En milieu urbain les pollutions engendrées par les différents moyens de transport s’ajoutent aux diverses autres sources ponctuelles ou diffuses (Afri-Mehennaoui, 2009), voir figure.

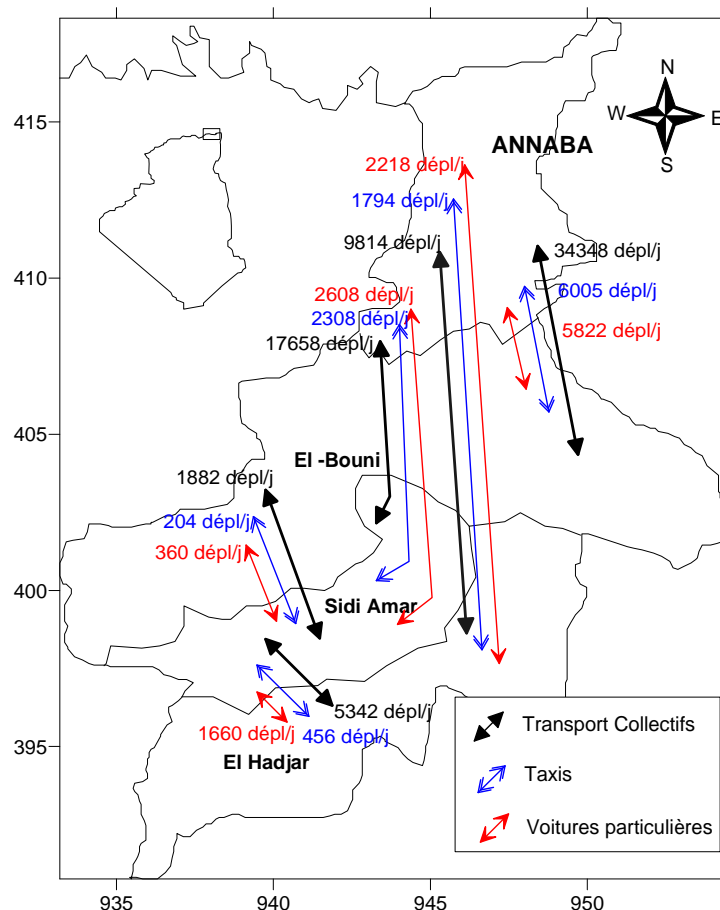


Figure. 50 Déplacements intercommunaux (source : URBAN Annaba, 2006)

Depuis quatre décennies, la mutation socio-économique de la région d’Annaba a engendré un véritable bouleversement des groupements paysagers aussi bien dans leur nature que dans leur vocation. Ils comprennent : le tissu industriel comprenant plusieurs unités source d’une pollution multiforme (Derradji, 2009) ; cette dernière a atteint un degré élevé à de principales unités industrielles à travers le sous bassin de la Seybouse (voir fig..51)

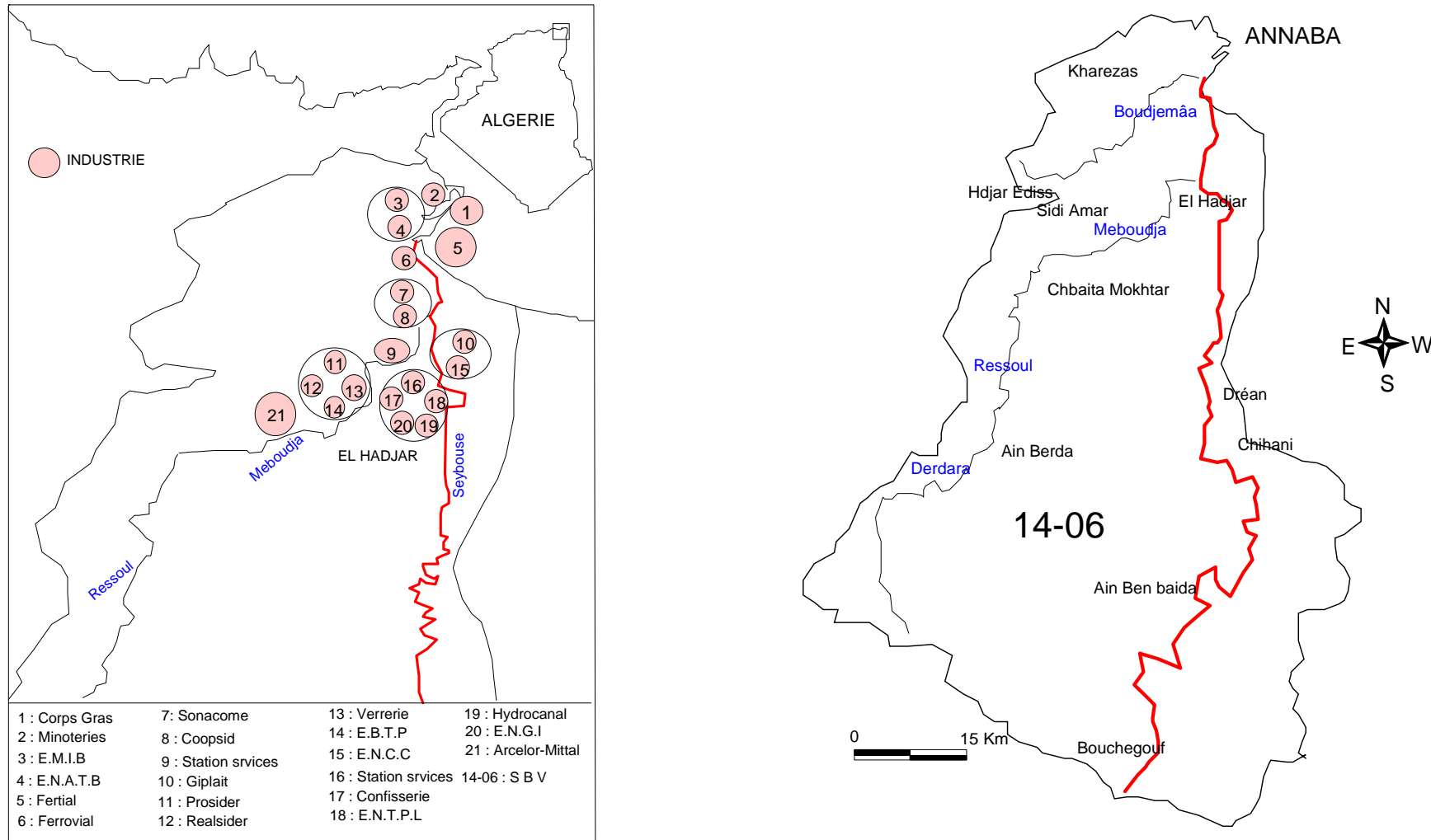


Figure. 51 Carte des rejets du sous Bassin de la Seybouse.

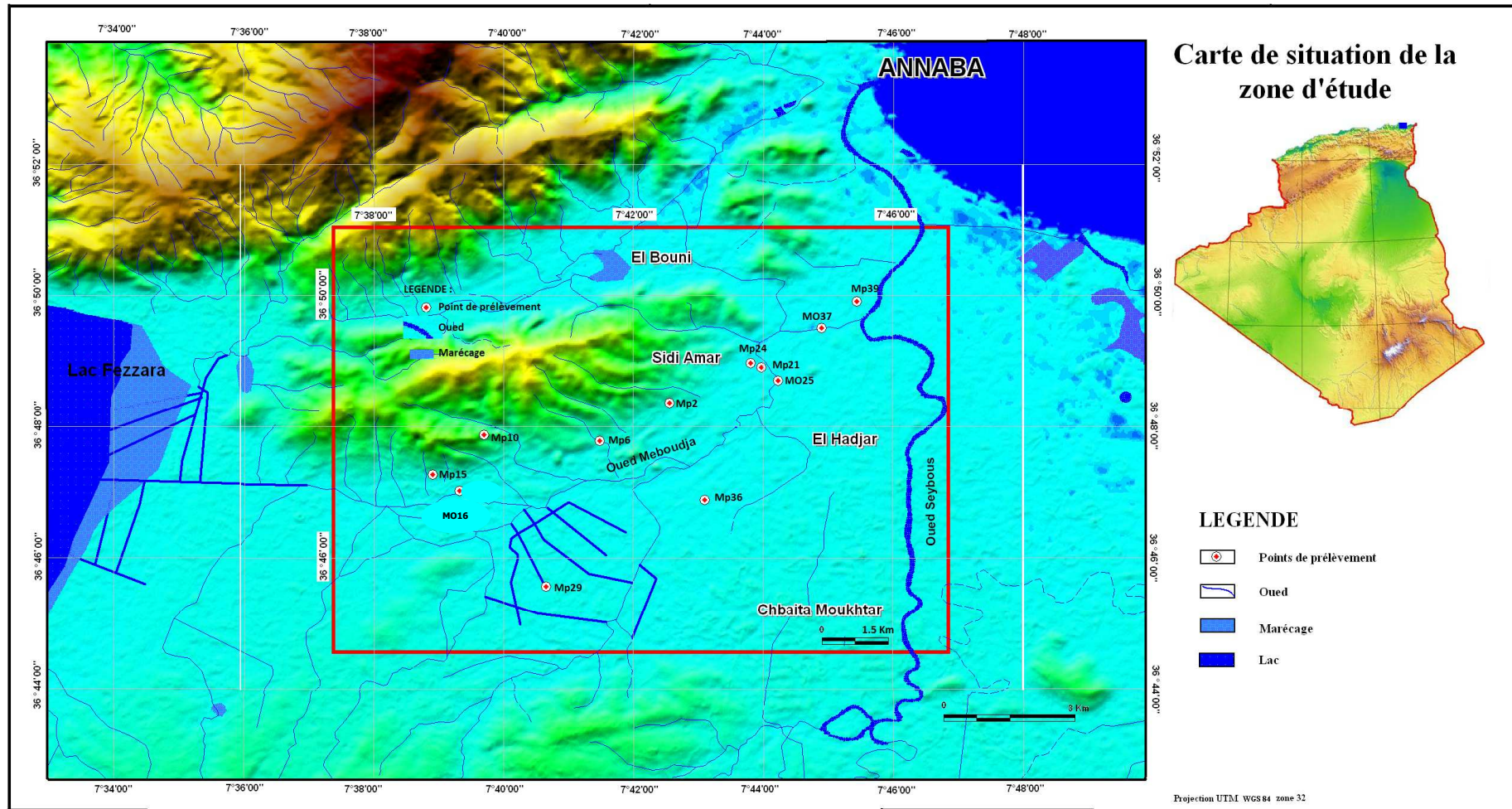


Figure. 52 Carte d'inventaire des points de prélèvement

3. Interprétation des résultats des analyses physico-chimiques :

3.1. Evolution du fer-manganèse

Plusieurs travaux se sont attachés à la nature géochimique des eaux (Robertson *et al.*, 1996), (Edmunds *et al.*, 1992), dans ce travail on va examiner l'évolution de deux éléments chimiques (Fer, manganèse) en fonction de la variation temporelle dans un passage naturel entre le milieu oxydant et le milieu réduit de la nappe. Les variations des teneurs en manganèse suivent celles du fer comme le montre la figure 53 avec un coefficient de corrélation significatif ($r = 0,609$ pour $n = 96$).

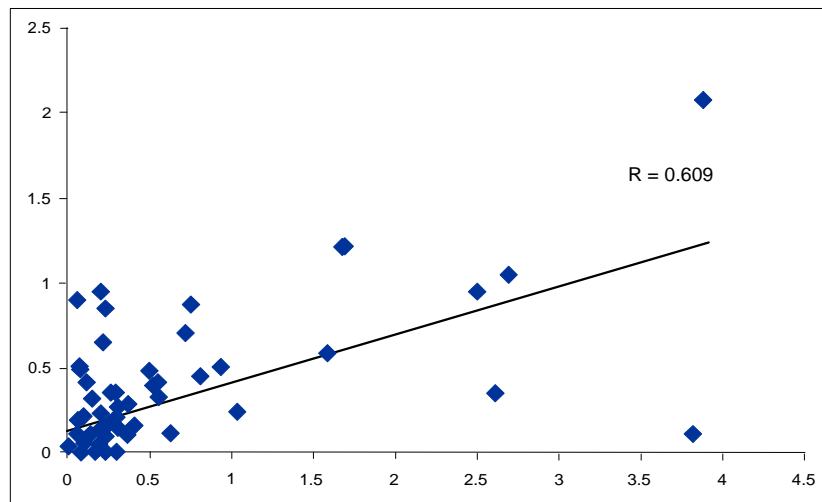


Figure.53 Corrélation des teneurs en fer et manganèse de la nappe alluviale de la Meboudja de novembre 2009 à octobre 2010

3.2 Quelles concentrations en fer et en manganèse rencontre-t-on dans les eaux de la plaine de la Meboudja ?

Les résultats des analyses des métaux en traces particulières et dissous au niveau de l'oued Meboudja, montrent que la variabilité temporelle et spatiale du fer et du manganèse (Fer (T) & Mn^{2+}) présentent un caractère polluant et qui se présente par des concentrations variables très élevées atteignant 0 à 3.97 $mg.l^{-1}$, pour le fer (t) et 0 à 3.4 $mg.l^{-1}$ pour le manganèse.

Le suivi de ces deux éléments durant les campagnes de 1999, 2005 et 2006 permet d'élaborer les tableaux 2 & 3 des statistiques élémentaires.

Tableau 32 Valeurs maximales, minimales, médianes et moyennes arithmétiques des teneurs du Fer (T) de 1999 à 2005 et 2006

Fer (T) $mg.l^{-1}$	Mp2	Mp6	Mp10	Mp15	MO16	Mp21	Mp24	MO25	Mp29	Mp36	MO37	Mp39
Moyenne	0,145	0,184	0,347	0,100	0,493	0,130	0,181	3,082	0,233	0,261	3,971	0,194
Max	0,286	0,296	0,835	0,100	1,170	0,256	0,652	15,600	0,500	0,700	26,300	0,407
Min	0,004	0,037	0,100	0,100	0,030	négative	négative	0,026	0,029	0,012	0,052	0,019
Ecart type	0,118	0,117	0,290	0,100	0,413	0,111	0,249	5,222	0,180	0,263	8,589	0,140

Tableau 33 Valeurs maximales, minimales, médianes et moyennes arithmétiques des teneurs du Mn(T) de 1999 à 2005 et 2006

Mn mg.l ⁻¹	Mp2	Mp6	Mp10	Mp15	MO16	Mp21	Mp24	MO25	Mp29	Mp36	MO37	Mp39
Moyenne	0,025	négative	négative	0,005	0,323	0,003	0,015	0,379	0,354	0,100	0,816	0,133
Max	0,100	0,030	0,080	0,010	1,040	0,010	0,030	1,000	1,000	0,100	3,400	0,400
Min	0,004	0,037	négative	négative	0,020	négative	négative	0,060	négative	0,100	0,050	négative
Ecart type	0,050	négative	négative	0,007	0,352	0,005	0,021	0,309	0,436	0,000	1,448	0,231

Le tableau 32, montre des valeurs du fer (T) : avec un max supérieur à 3.9 mg.l⁻¹ pour MO37, et supérieur à 3mg.l⁻¹ pour le Mp25 de l'Oued Meboudja. Les statistiques élémentaires obtenus des analyses du Mn²⁺ des eaux superficielles est souterraines sont représentés dans le tableau 33, avec un max supérieur à 3.4 mg.l⁻¹ pour MO37; [*Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels Fe= 3 mg/l ; Mn = 1mg/l (journal officiel de la république Algérienne 2006)*].

3.3 Le pH

Les points dans l'oued MO16, MO25, MO37 indiquent que les eaux sont caractérisées par des valeurs du pH relativement alcalins dont leurs limites supérieures qui correspondent à toute la période de (Nov.2009 à Oct.2010) à l'exception de mois de Mars, et sont comprises entre 7.20 (MO25) et 8.89 (MO37) la valeur moyenne est de 8.39.

Le pH qui se situe à 7.04 (presque la neutralité) pour le (Mp21), limite inférieure correspondant à la période de (Avr.2010) et la limite supérieure correspond à 8.88 (Jan.2010) est dû probablement à la diminution de la température.

Il faut noter aussi que la quantité et la qualité des eaux rejetées sont aussi très variables à cause des opérations discontinues comme les lavages et rinçages.

3.4. La Conductivité électrique C.E :

Tableau 34 Valeurs maximales, minimales, médianes et moyennes arithmétiques des teneurs de la C.E.

Paramètres		Eau usée	
		Eaux superficielles	Eaux souterraines
Paramètres	Max	4430	10430
	Moy	2030	2473
	Min	643	328

Les eaux des points étudiés présentent des conductivités électriques variables : un minimum de 328 µs/cm a été mesuré au point témoin (Mp29). Les valeurs maximales ont été

enregistrées au point (Mp36 = 10.43 ms/cm), qui malgré son éloignement relatif des rejets industriels.

La conductivité électrique est faible aux trois autres points (MO16-25-37) la moyenne est respectivement de 2200 ; 2043 ; 1847 $\mu\text{S}/\text{cm}$ un maximum de 4430 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Juillet 2010).

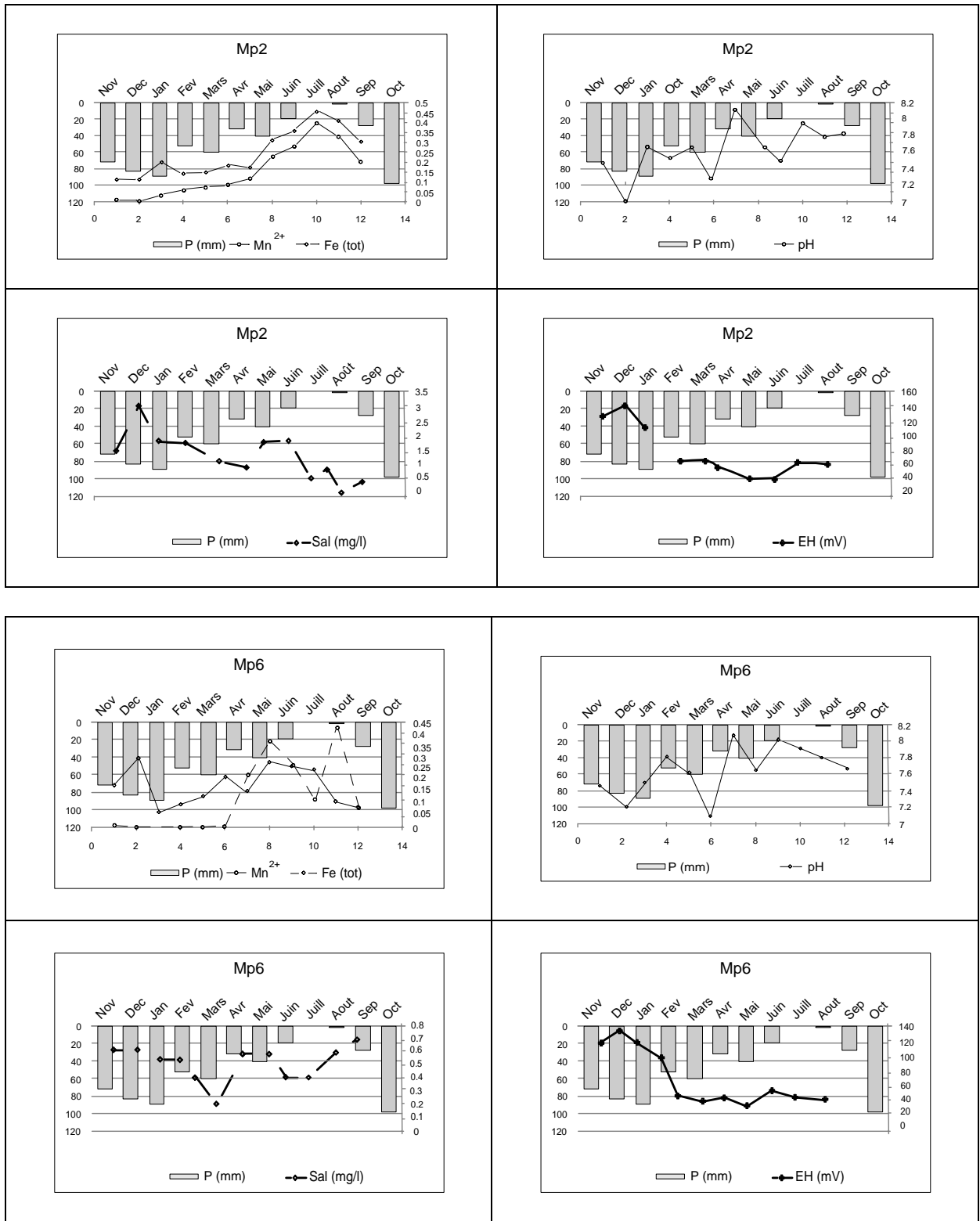
Nous constatons aussi que toutes les valeurs obtenues pour les trois stations sont supérieures à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Arrignon (1998) faisait remarquer que de telles eaux étaient soumises à une minéralisation excessive des matières organiques qui les rendait impropres à l'irrigation. Cette minéralisation étant essentiellement le fait des bactéries hétérotrophes (Billen *et al.* 1999).

3.5. Le Eh :

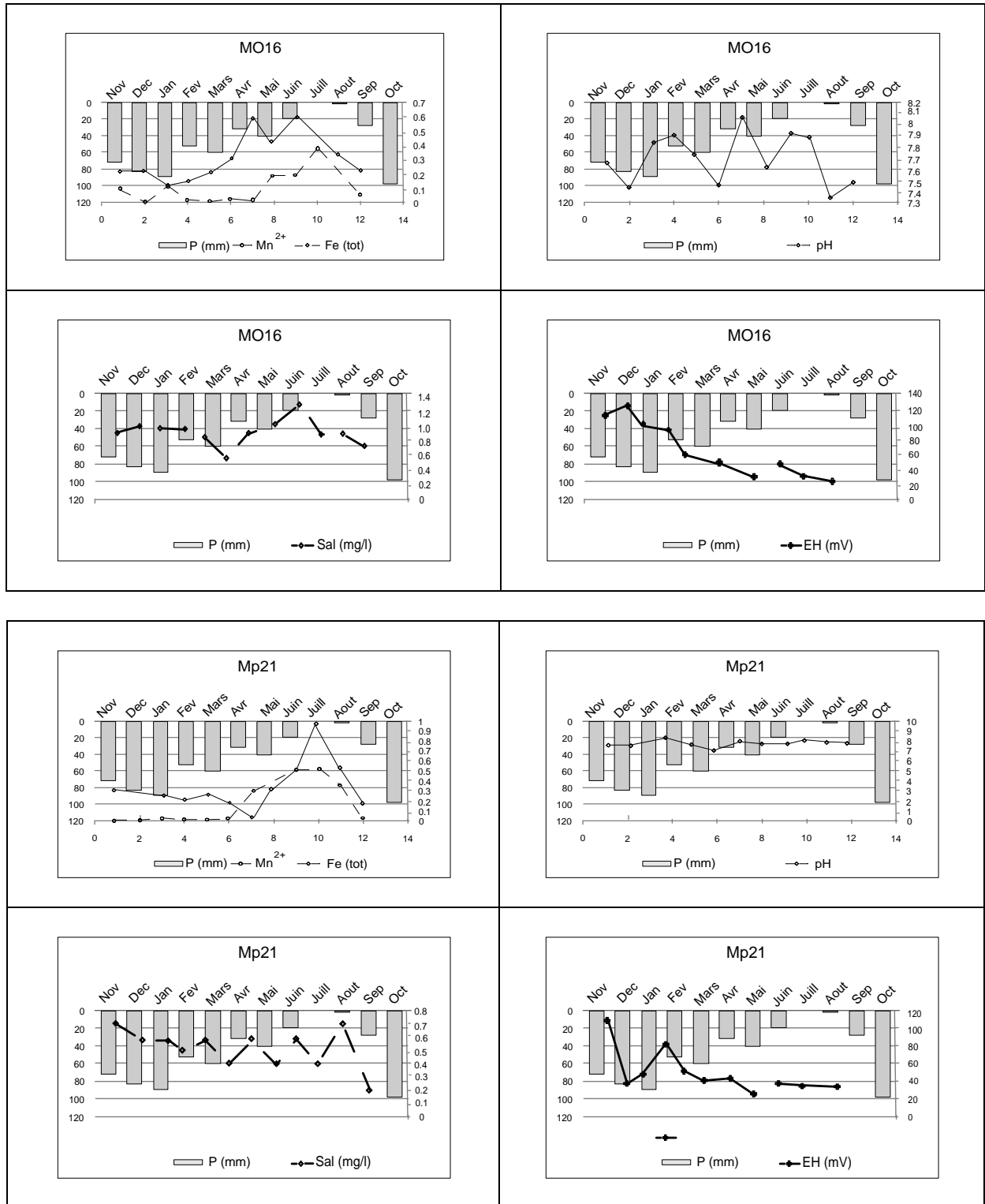
Le potentiel d'oxydo-réduction (Eh), déjà élevé, a évolué dans le sens d'une diminution (140mV (Mp2) à 60 mV). Les valeurs faibles du Eh montrent que le milieu était très réduit, que les métabolismes microbiens n'étaient pas donc aérobies et que la matière organique été dégradée.

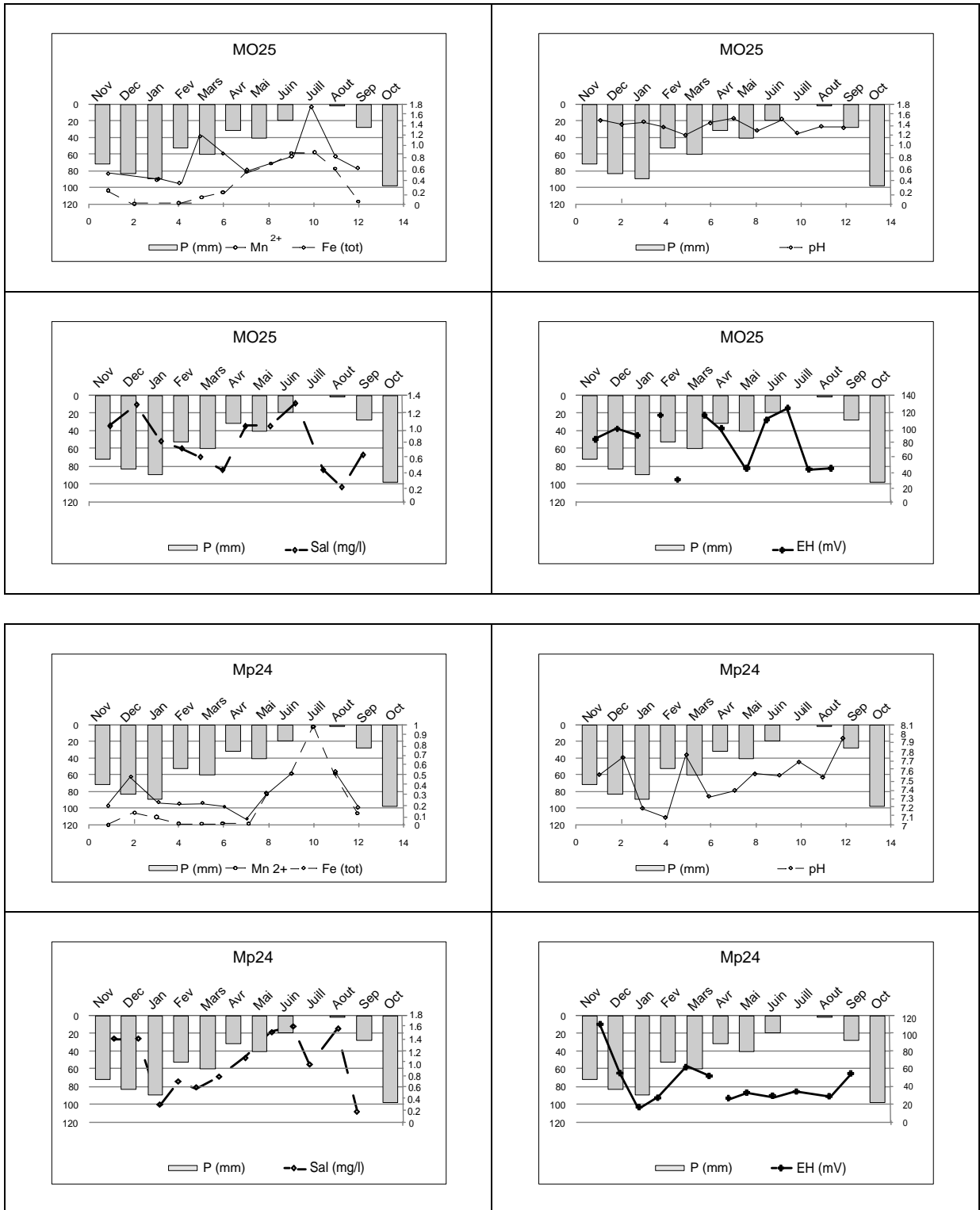
3.6. La salinité :

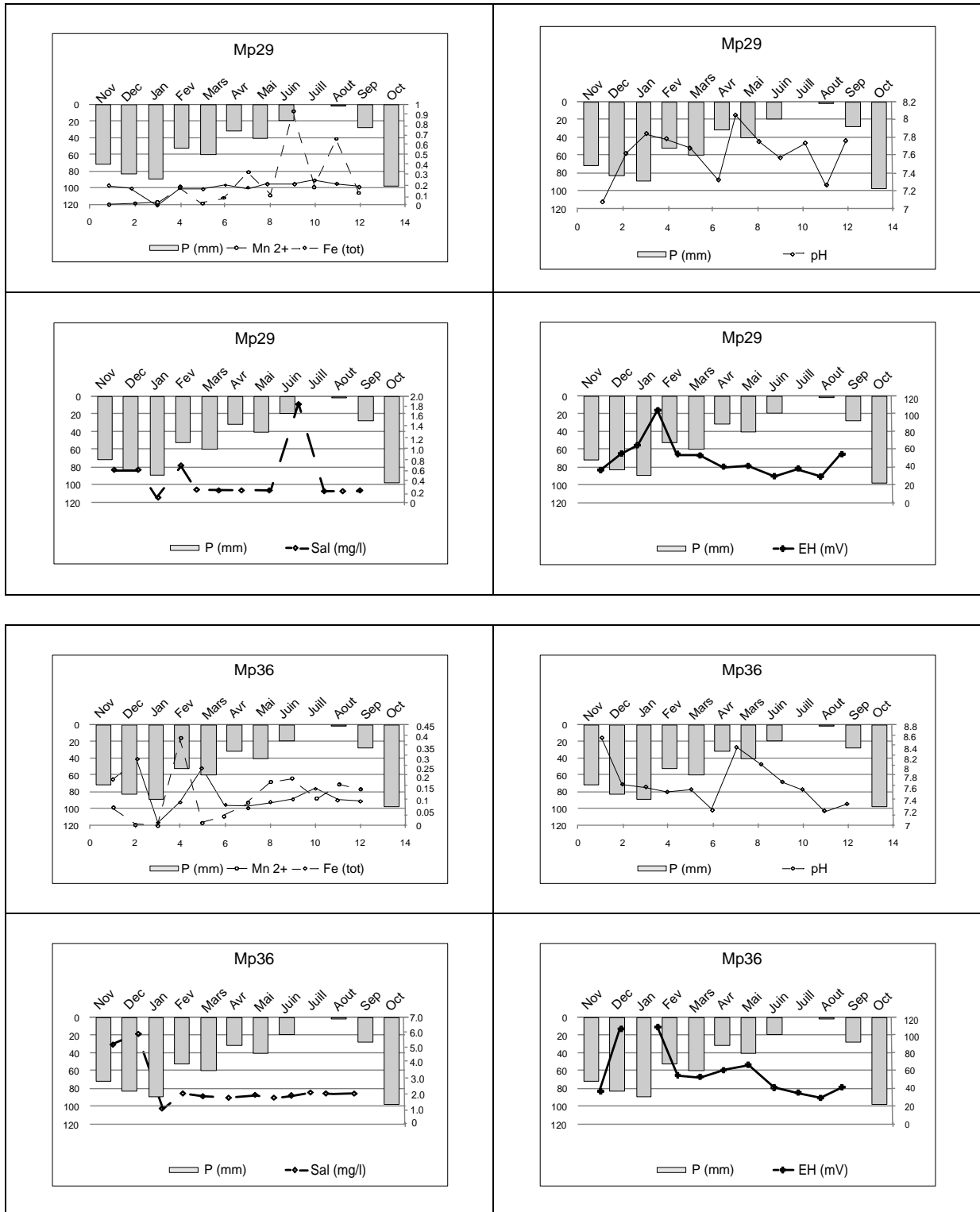
Une valeur élevée de la salinité signifie une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend plus difficile l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la plante, elle peut se mesurer aussi par la conductivité électrique, la majorité des puits (Mp2.10.15.24.29.36) montrent des valeurs supérieures à 1.2 mg/l (*H.G. Peterson 1999 : Water quality and Micro-irrigation for horticulture. Agriculture et Agroalimentaire Canada Inférieur à 1,0-1,5*), les autres points (Mp6.21.39) sont représentés par une diminution de la salinité, ceci est du probablement, par les apports latéraux moins chargés.











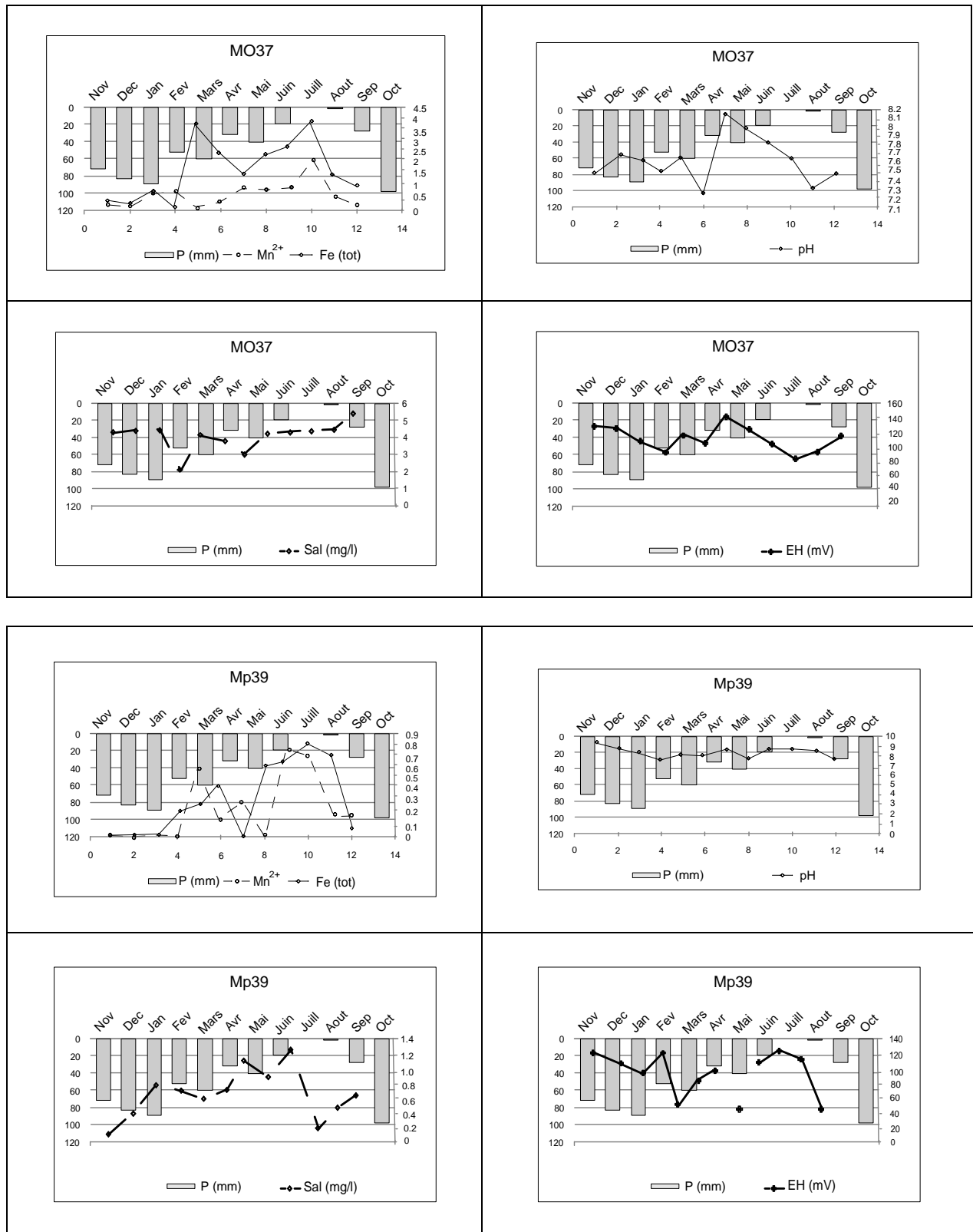


Figure.54 - Evolution dans le temps des teneurs en fer et manganèse de la nappe alluviale de la Meboudja de octobre 2009 à novembre 2010

4 - Etat de la pollution des eaux par les métaux lourds

C'est la forme sous laquelle se trouve le métal qui détermine prioritairement sa toxicité. En effet, il a été établi que la concentration (ou l'activité) de l'ion métallique libre (M^{z+}) était le facteur clé pour déterminer la biodisponibilité et la toxicité du métal (Weng, 2005).

4.1 Le Chrome : des concentrations élevées en chrome, du fait du rejet de produits en métal dans les eaux de surface peut endommager les ouïes des poissons nageant dans des eaux proches du point de rejet ^[5].

Les comportements du Chrome _{total} et du cuivre sont similaires tout au long de la chronique. Leurs concentrations varient très peu. Néanmoins, on peut remarquer une légère augmentation de la concentration en Chrome _{total} pendant les trois premiers mois du cycle, qui coïncide avec une augmentation de concentration de zinc.

4.2 Le Plomb : Chez certains bivalves, le plomb inhibe l'enfouissement et place donc le mollusque dans des conditions précaires de protection vis-à-vis des prédateurs (Mac Greer, 1979). Le plomb retarde, voire inhibe, le développement embryonnaire de la moule et augmente le pourcentage de larves anormales (Brenko *et al.*, 1977), la concentration totale en plomb commence à augmenter à partir du mois d'Octobre et tout au long de la période considérée le pic est atteint le mois de Mars, avec une concentration allant jusqu'à 1 mg.l^{-1} . L'augmentation de la concentration du mois de mai coïncide avec celle du zinc. On peut supposer qu'il existe des origines communes à ces deux métaux.

4.3 Le cuivre : le cuivre peut bloquer la photosynthèse à partir de $1 \mu\text{g/g}$ chez certaines espèces de phytoplancton marin. Les animaux sont diversement sensibles à la contamination par le cuivre : le crustacé nauplius elminus tolère $10 \mu\text{g/g}$ tandis que l'oursin arbacia est tué à $0,3 \mu\text{g/g}$ (Augier, 2008).

4.4 Le zinc : Le plus inquiétant est que le zinc est désormais reconnu comme un cancérigène lent, mais puissant (Augier, 2008).

La concentration totale en zinc augmente au cours du temps, avec plusieurs élévations brutales pouvant atteindre $3,2 \text{ mg.l}^{-1}$.

La figure 3 représente les variations de concentration totale en chrome, plomb, cuivre, et zinc mesurées dans les puits de la nappe superficielle et au niveau de l'oued Meboudja.

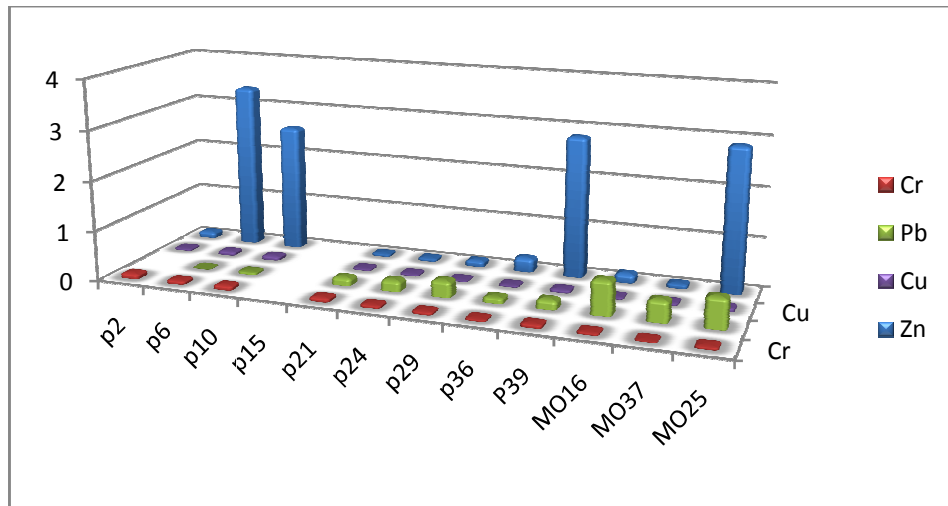


Figure. 55 - Concentration totale en Zinc dissous dans les eaux souterraines de la plaine de la Meboudja

On peut là encore supposer qu'il existe une source polymétallique de Chrome et de zinc. Bien que les concentrations totales mesurées ici soient largement au dessus (0.25 mg/l et > 3mg/l) des valeurs limites des paramètres des rejets d'effluents liquides industriels (tableau 7).

Tableau 35 Valeurs limites des paramètres des rejets d'effluents liquides industriels (Journal de la République Algérienne, 2006)

Paramètres	Concentration maximale admissible	
	Unités	Valeurs limites
pH	-	6.5 – 8.5
Chrome	mg/l	0.5
Zinc	mg/l	3
Plomb	mg/l	0.5
Cuivre	mg/l	0.5

Tableau 36 Normes de potabilité des eaux pour les métaux (d'après Normes Européennes CEE 1975)

	Concentration maximale admissible (en µg/l et en mol/ L)		Concentration T moyenne mesurée (mol/ L)
	µg/L	M	
Zinc	100 µg/L	$1,54 \cdot 10^{-6}$ M	$6 \cdot 10^{-8}$ M
Plomb	50 µg/L	$2,41 \cdot 10^{-7}$ M	$5 \cdot 10^{-10}$ M
Cuivre	50 µg/L	$7,87 \cdot 10^{-7}$ M	$2 \cdot 10^{-8}$ M

5. Diagrammes de Pourbaix :

Les processus d'oxydo-réduction constituent un aspect important de l'évolution géochimique des eaux souterraines lors de leur déplacement en zone saturée (W. Kloppmann *et al.*, année)
Dans le cas d'une nappe en système fermé vis-à-vis de l'oxygène et qui contient de la matière organique, on peut établir une séquence type des réactions d'oxydo-réduction, en partant de leur énergie libre. A la condition qu'il existe une microfaune capable de catalyser ces réactions

celles-ci se succéderaient dans l'aquifère dans le sens de l'écoulement, en fonction du temps de résidence (Stumm & Morgan, 1981). La diminution du potentiel d'oxydo-réduction en fonction de la profondeur ou de la distance de la zone de recharge est d'abord liée à une réduction de O_2 , accompagnée par une réduction de NO_3^- et de NO_2^- en NH_4^+ ou N_2 et par une réduction du $Mn(IV) O_2$ en Mn^{2+}

Les oxydations Correspondantes sont celles de la matière organique et du Fe^{2+} en Fe^{3+} . Il s'en suit la réduction de $Fe(III) OOH$ en Fe^{2+}

. **Dans un milieu fortement réducteur** ($Eh < \pm 0$), les réductions de la matière organique, des sulfates en H_2S et HS^- et du CO_2 en CH_4 sont des réactions typiques. Des études d'aquifères de lithologie différente ont pu mettre en évidence de telles séquences de réactions qui se manifestent par une zonation verticale (Gillham & Cherry, 1977; Leuchs, 1988) ou horizontale dans le sens du flux dans des nappes captives (Champ *étal.*, 1979; Edmunds & Walton, 1983; Edmunds *et al.*, 1984; Howard, 1985 ; Edmunds *et al.*, 1987; Mariotti *et al.*, 1988). On a observé dans plusieurs cas une brusque chute du potentiel d'oxydo-réduction (Eh) que Edmunds (1973) a appelée "redox barrier". L'existence de telles barrières chimiques au sein d'un aquifère a des implications pratiques importantes dans la mesure où elles influencent sur la migration et le comportement de polluants (espèces azotées et sulfatées, substances organiques) et de certains métaux de transition.

5.1. Définition

Les diagrammes potentiel-pH ou diagrammes de Pourbaix ont pour but de représenter dans un espace à 2 dimensions les circonstances d'équilibre, pour un système donné, en fonction de 2 variables indépendantes.

Le système choisi comporte des espèces (gazeuses, solides ou en solution) correspondant, par exemple, à un élément du tableau périodique ou à une famille de composés (en chimie organique).

Dans les travaux de Pourbaix, le solvant considéré est l'eau. La généralisation est possible dans d'autres solvants (voir paragraphe 6).

Les deux variables indépendantes sont le potentiel..... et le pH. On a préféré choisir le pH et non pas la concentration en H^+ car les équations de Nernst donnent des représentations linéaires en fonction du pH.

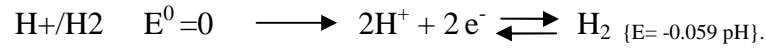
Les diagrammes de Pourbaix ou diagramme potentiel-[pH] (ou Eh-pH), ce sont des diagrammes de zone qui montrent les aires de stabilité des espèces pour un degré d'oxydation et pour un pH donné. Les frontières représentent les lignes d'équi-concentration.

Ces diagrammes indiquent sur un plan E_H -pH les domaines d'existence ou de prédominance d'un élément (Pourbaix, 1963).

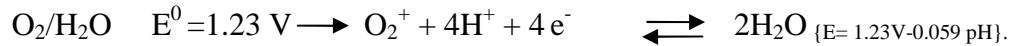
Le but du diagramme de Pourbaix est de mettre en évidence la réaction dans deux couples redox de l'oxydant le plus puissant sur le réducteur le plus fort de l'autre couple, plus au moins quantitativement selon l'écart entre les potentiels associés aux deux couples. Il permet de savoir dans quel sens est déplacée une réaction redox donnée, si on a pris soin d'y reporter les droites représentatives des deux couples redox mis en jeu (Guasmi, 2009)

5.2. Tracé du diagramme H₂O :

Tous les diagrammes de Pourbaix sont comparés à celui des deux éléments fondamentaux hydrogène et oxygène, fournis par le solvant (l'eau). Le diagramme de l'hydrogène correspond au seul couple redox :



Le diagramme de l'oxygène correspond lui aussi au seul couple redox :



Ces diagrammes sont reportés sur les schémas ci dessous.

5.3. Tracé du diagramme du Fer :

Pour le *fer*, on étudie les nombres d'oxydation 0 (Fe↓), +II (Fe²⁺ et Fe(OH)₂↓) et +III (Fe³⁺ et Fe(OH)₃↓) pour les campagnes de la période 2009-2010 (Nov.2009 à Oct.2010). Le diagramme est reporté sur la figure 56.

Le domaine d'existence des différentes espèces solubles et insolubles sont données sur les (figures.2.6.10.14) représentant les diagrammes simplifiés Eh = f (pH) - potentiel Redox en fonction du pH.

On constate que les points sont bien concentrés dans le domaine d'oxydation du fer, qui correspond à la forme de Fe OH⁺ avec une tendance vers la forme dissoute (Fe (OH)₃⁺)

△ Déc.2009 □ Jan.2010 ○ Fév.2010

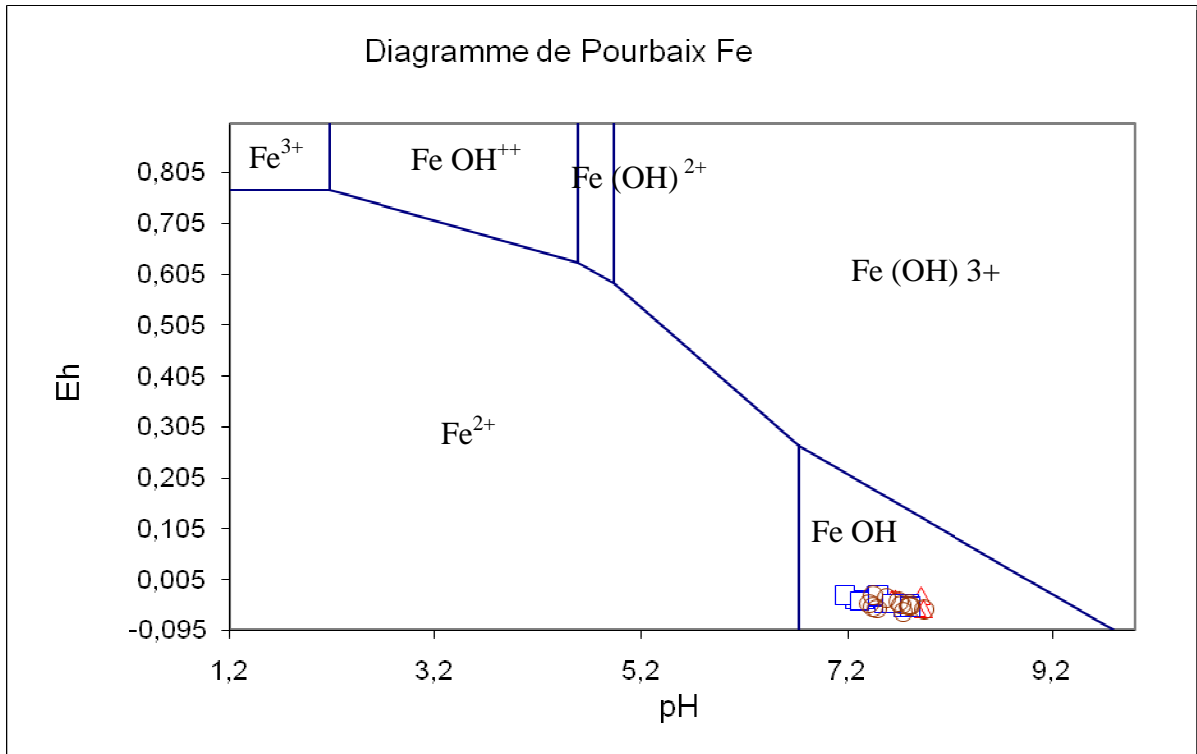


Figure.56 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du fer (mois Déc. 09. Janv. Fév. 2010)

△ mars-10 □ avr-10 ○ mai-10

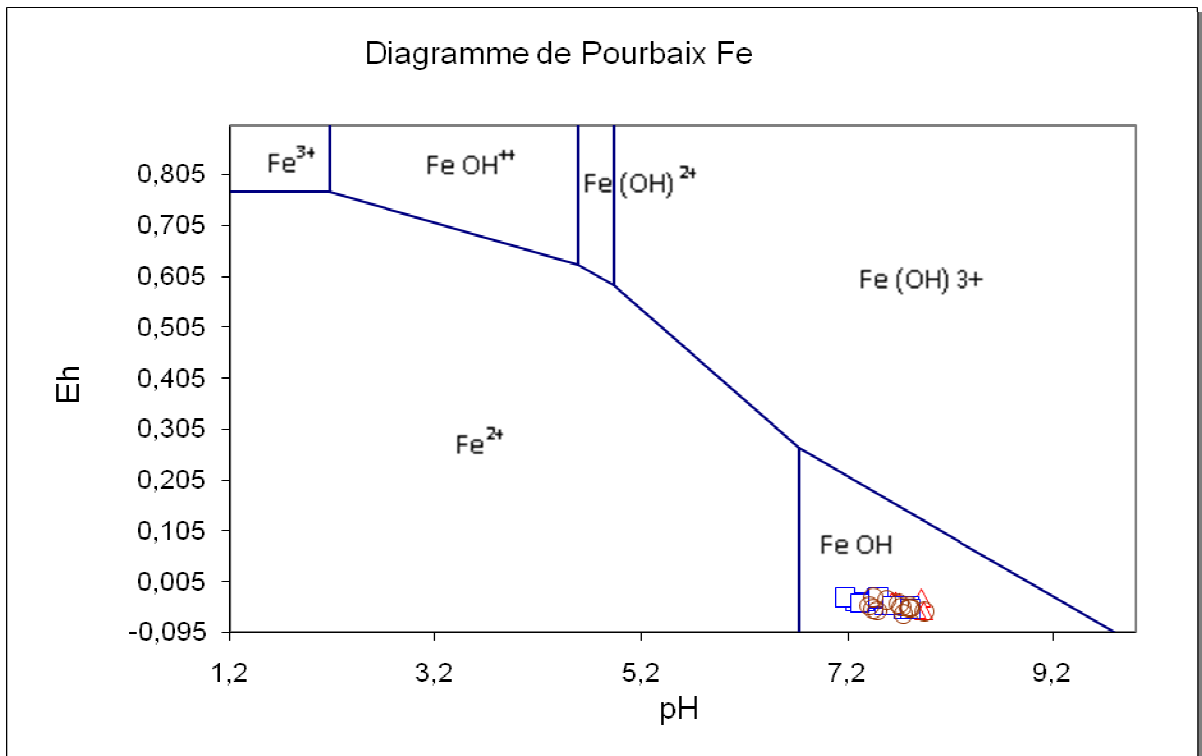


Figure.57 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du fer (mois Mars. Avr. Mai. 2010)

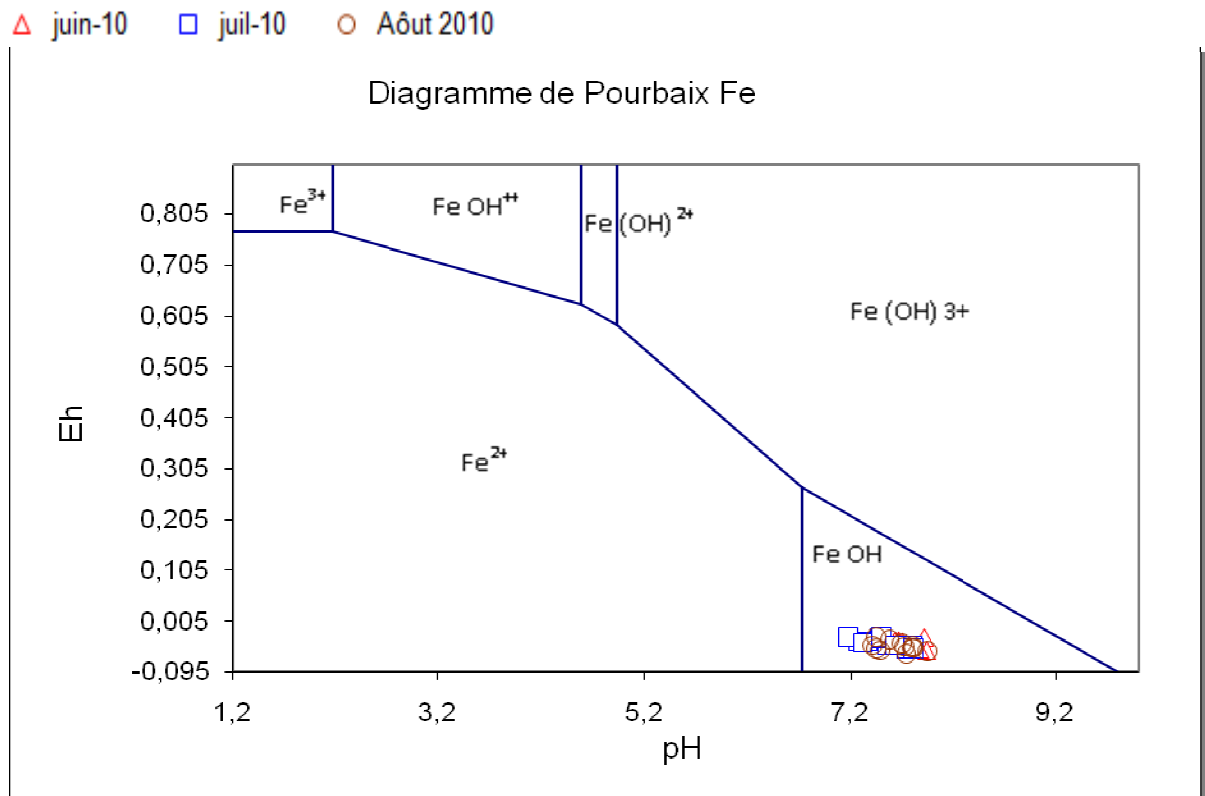


Figure.58 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du fer (mois Juin. Jul. Août. 2010)

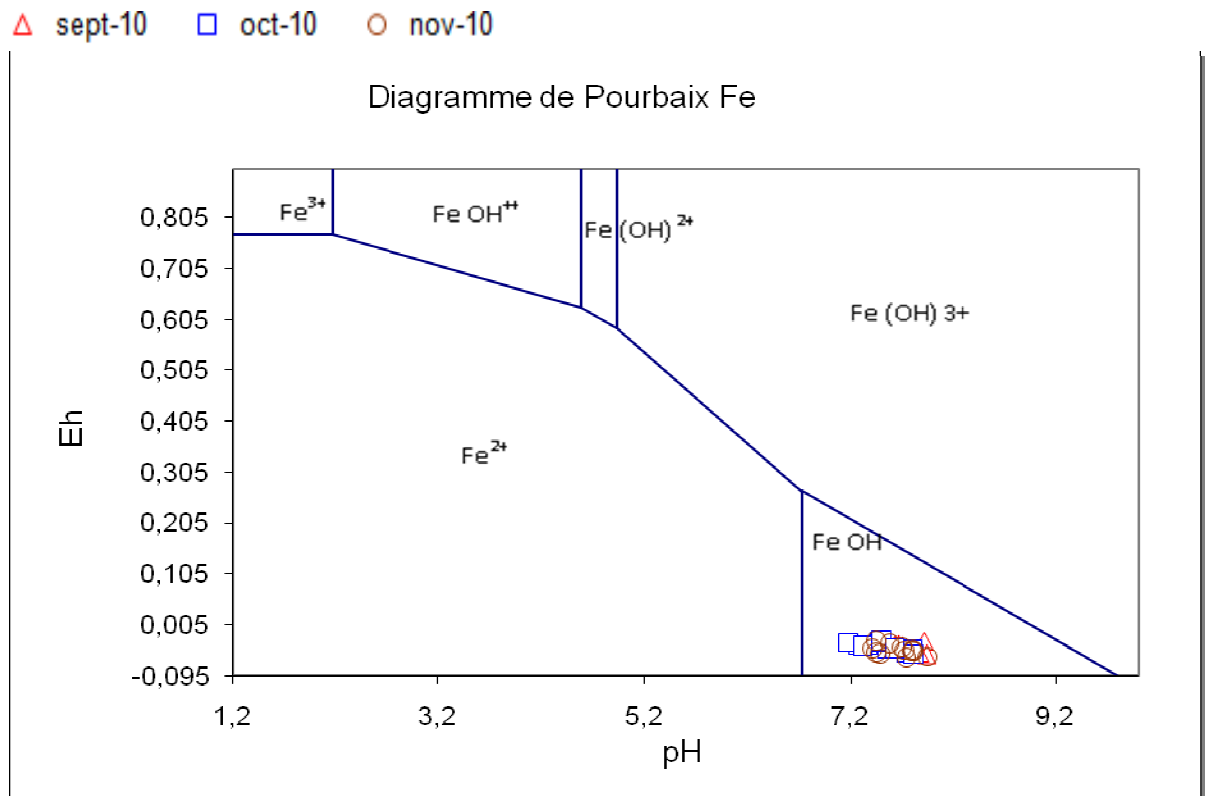
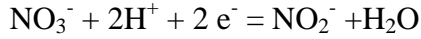


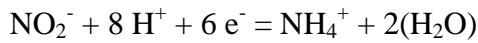
Figure.59 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du fer (mois Sept. Oct. Nov. 2010)

5.4. Tracé du diagramme de l'azote:

La forme la plus stable de l'azote est le diazote N₂, c'est donc une forme très répandue d'azote. Si l'on s'intéresse aux formes de l'azote en solution et en excluant N₂, les espèces les plus fréquentes sont NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺ et NH₄OH, deux formes ammoniacales.



On constate d'après la figure 4 que la concentration des points se présente dans le domaine de prédominance de NH₄⁺, ceci apparaît plus facilement en écrivant l'équation entre le domaine de nitrite et la forme ammoniacale NH₄⁺ comme suit :



△ Déc.2009 □ Jan.2010 ○ Fév.2010

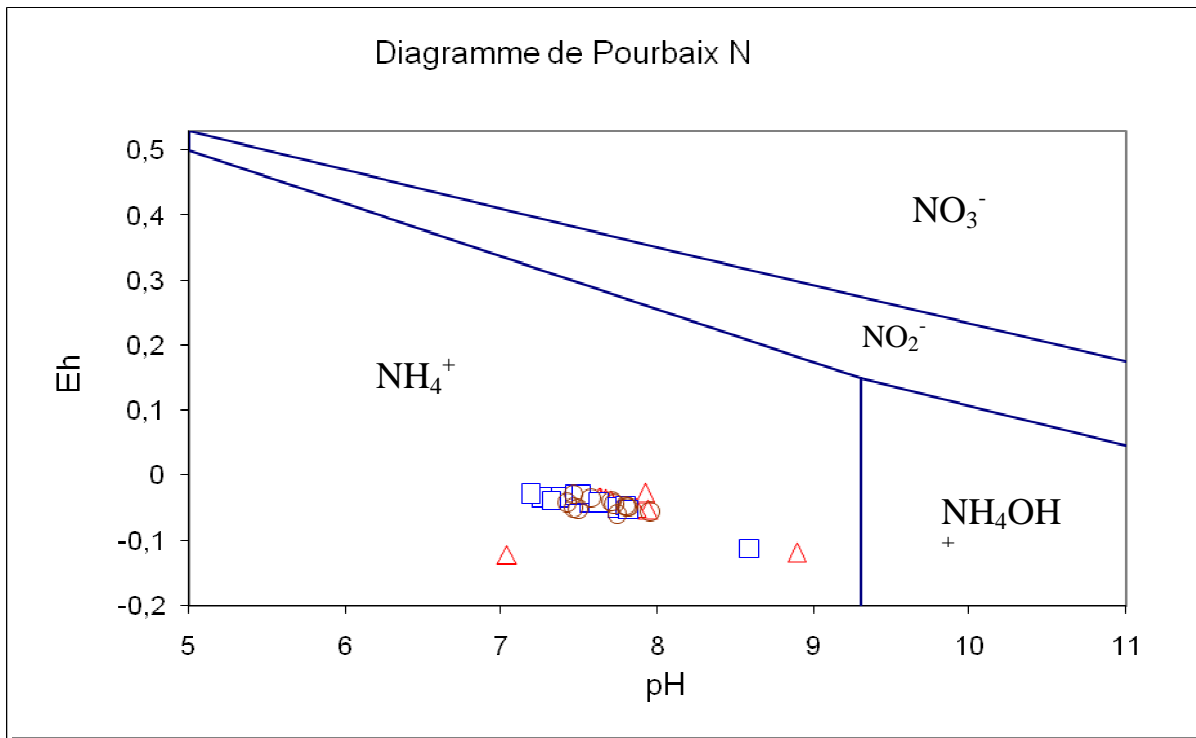


Figure.60 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'azote (mois Déc. 09. Janv. Fév. 2010)

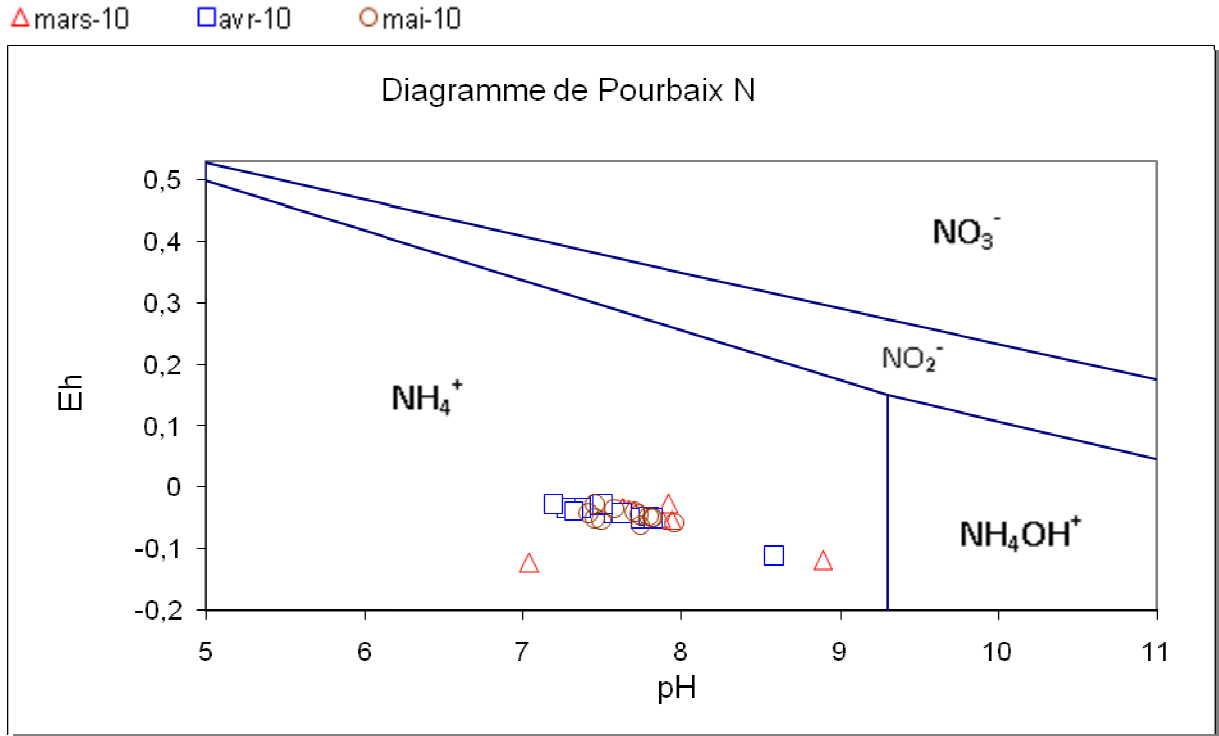


Figure.61- Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'azote (mois Mars. Avr. Mai. 2010)

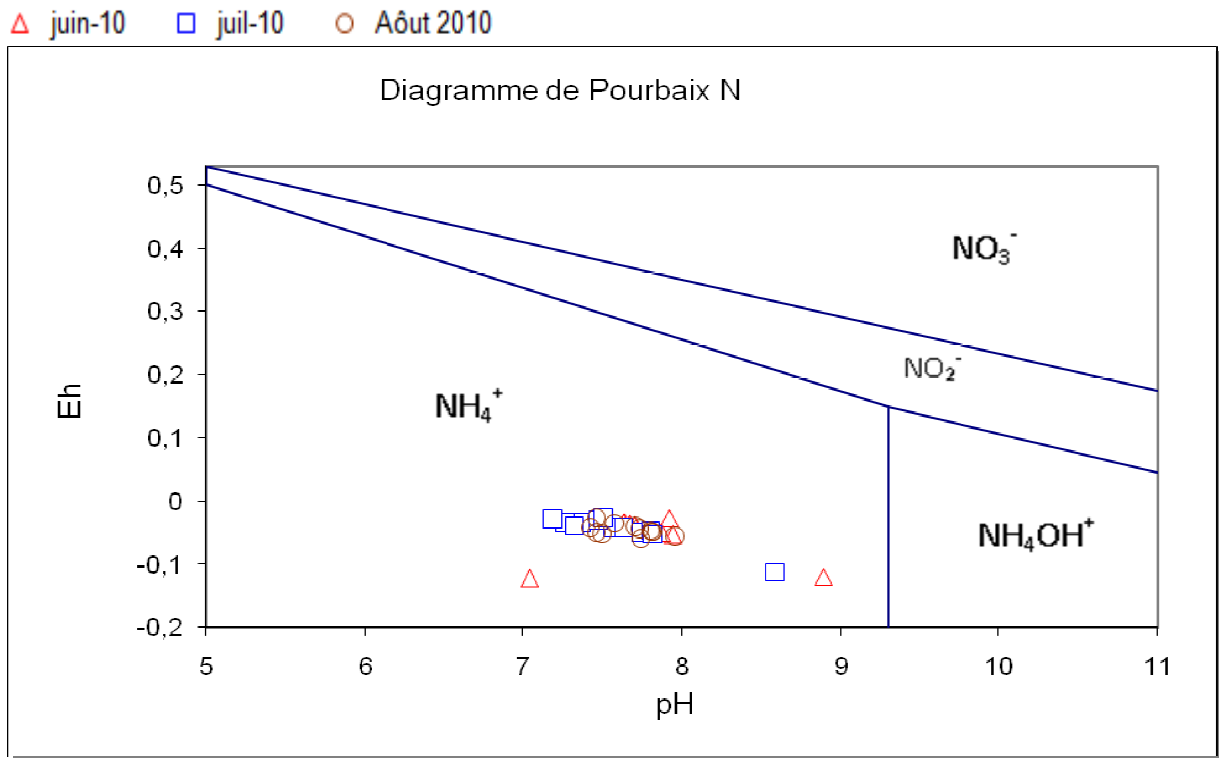


Figure.62- Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'azote (mois Juin. Juli. Août. 2010)

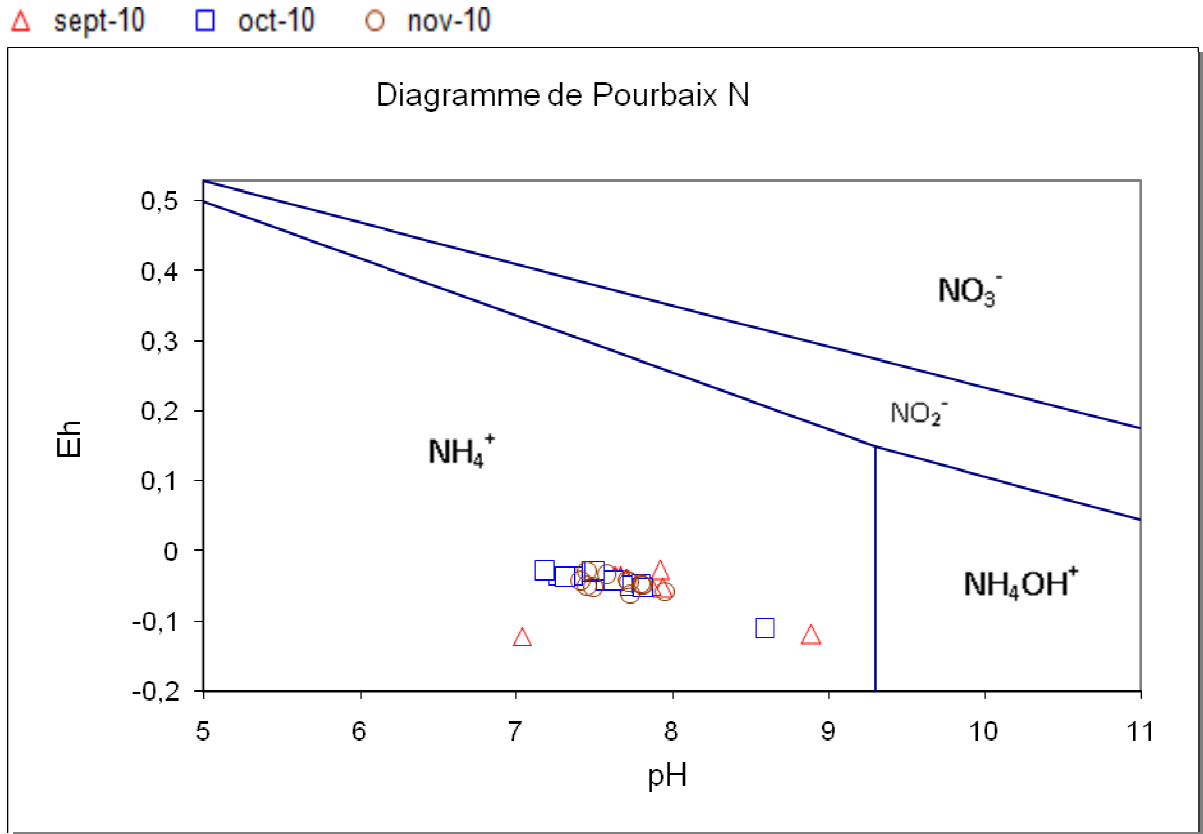


Figure.63 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'azote (mois Sept. Oct. Nov. 2010)

5.5. Tracé du diagramme du Soufre:

Le diagramme des principales formes du soufre est représenté dans la figure 6. Le Soufre VI (SO_4^{2-} et HSO_4^-) domine en conditions oxydantes. Ainsi on distingue que pendant toute la période d'étude, l'évolution des formes se fait dans le domaine (SO_4^{2-}) du soufre. Le passage Soufre-VI/Soufre -II se situe dans des niveaux très bas de potentiel redox.

Enfin, l'équilibre entre HS^- et H_2S^0 se situe à $\text{pH}=7$; ainsi dans les eaux réductrices, et en l'absence d'un tampon acido-basique plus fort, ce couple peut tamponner à pH neutre.

△ Déc.2009 □ Jan.2010 ○ Fév.2010

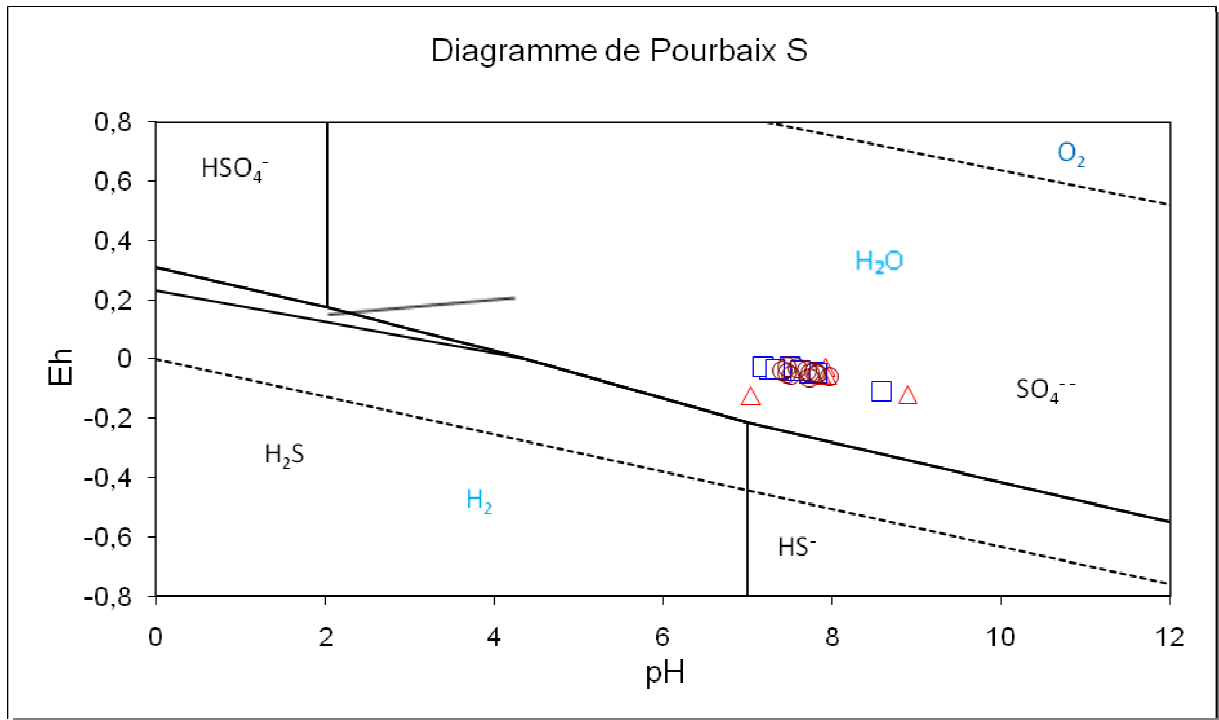


Figure.64 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du Soufre (mois Déc. 09. Janv. Fév.2010)

△ mars-10 □ avr-10 ○ mai-10

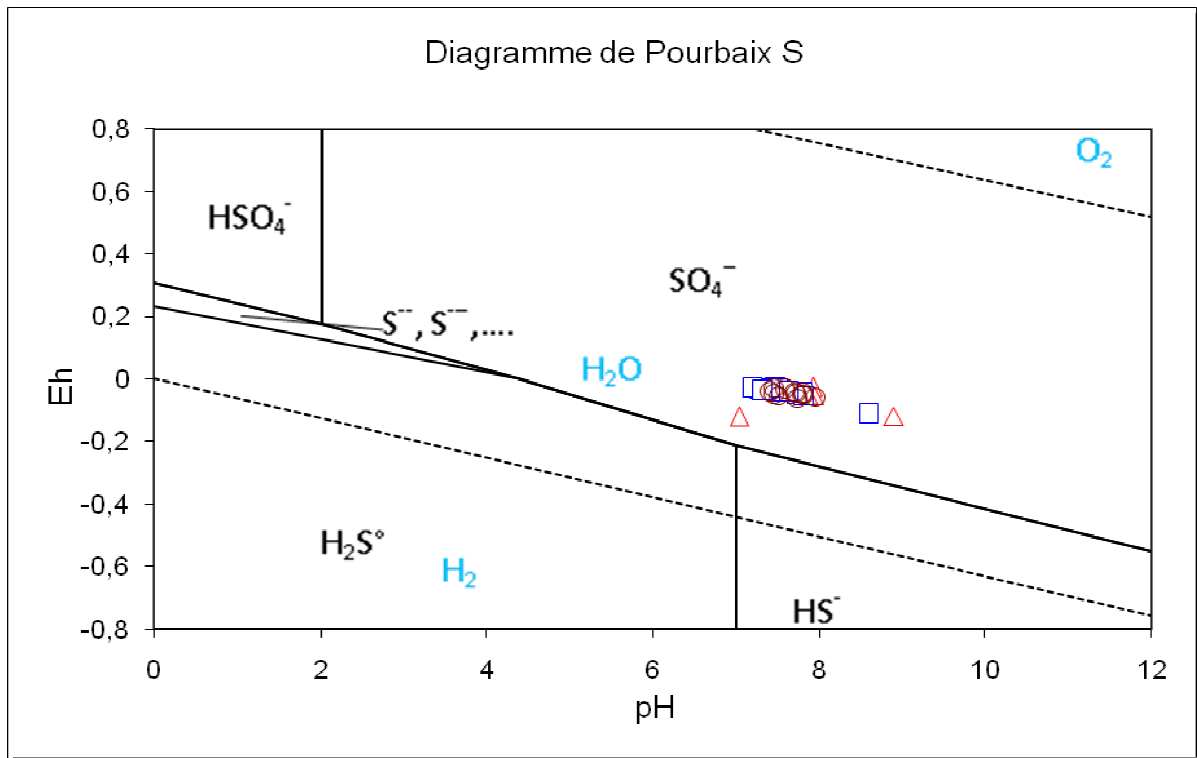


Figure.65 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du Soufre (mois Mars. Avr. Mai. 2010)

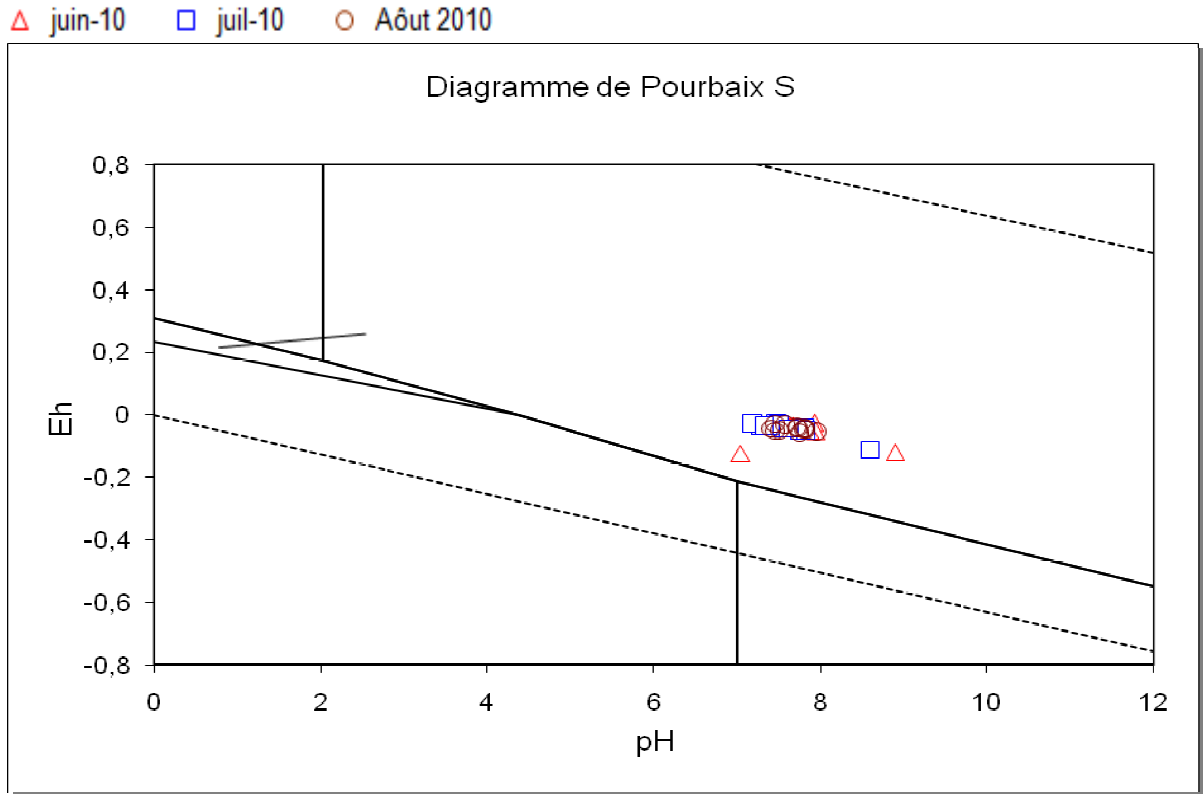


Figure.66 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du Soufre (mois Juin. Juli. Août. 2010)

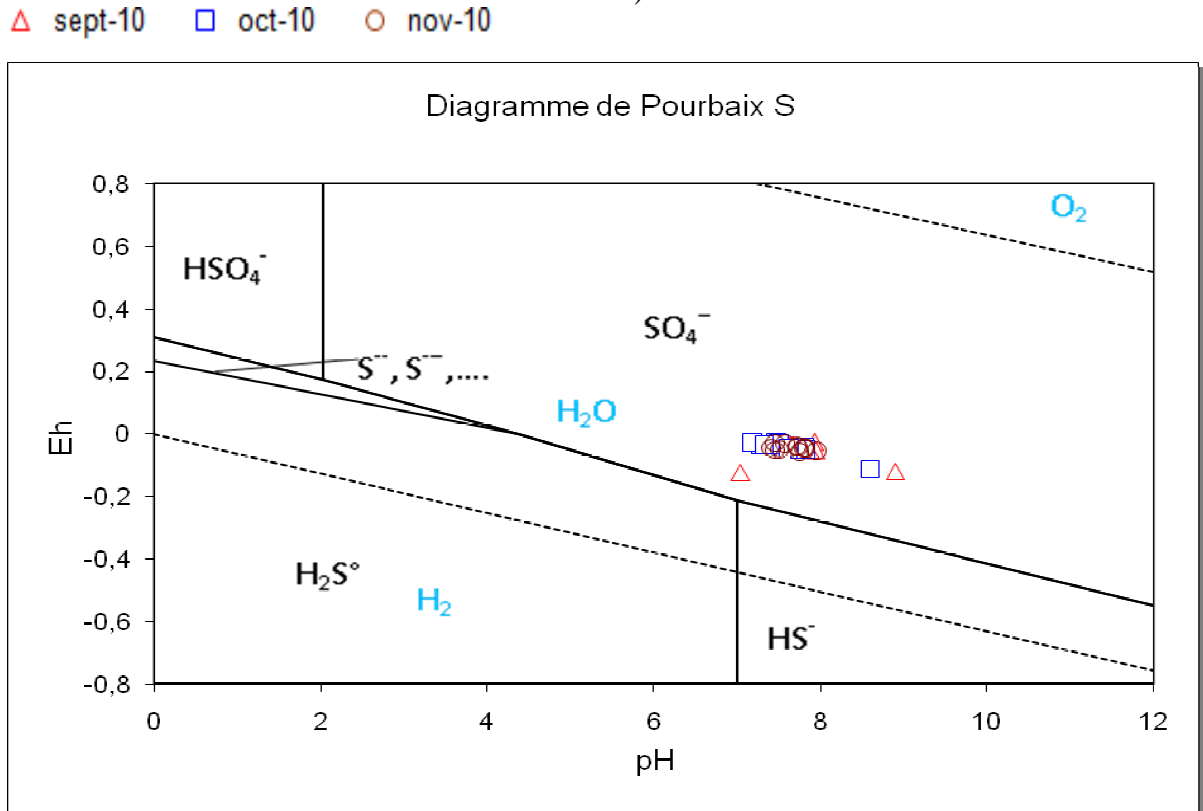


Figure.67 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié du Soufre (mois Sept. Oct. Nov. 2010)

5.6. Tracé du diagramme de l'arsenic:

La présentation des espèces pour le diagramme de l'Arsenic dans la figure 7 se traduit comme suit :

- 1- En conditions oxydantes, l'arsenic est sous forme pentavalente AsV avec les espèces AsO_4^{--} , HAsO_4^- , H_2AsO_4^- , $\text{H}_3\text{AsO}_4^\circ$. Ainsi,
- 2- En conditions réductrices, l'arsenic est sous forme trivalente AsIII avec les espèces AsO_3^- , HAsO_3^- , H_2AsO_3^- , $\text{H}_3\text{AsO}_4^\circ$ et H_4AsO_3^+ . La forme trivalente est beaucoup plus toxique que la pentavalente.

Sous forme solide, en conditions réductrices, l'arsenic passe sous forme d'arséniure associé au soufre qui passe sous forme de sulfure dans les arsénopyrites.

△ Déc.2009 □ Jan.2010 ○ Fév.2010

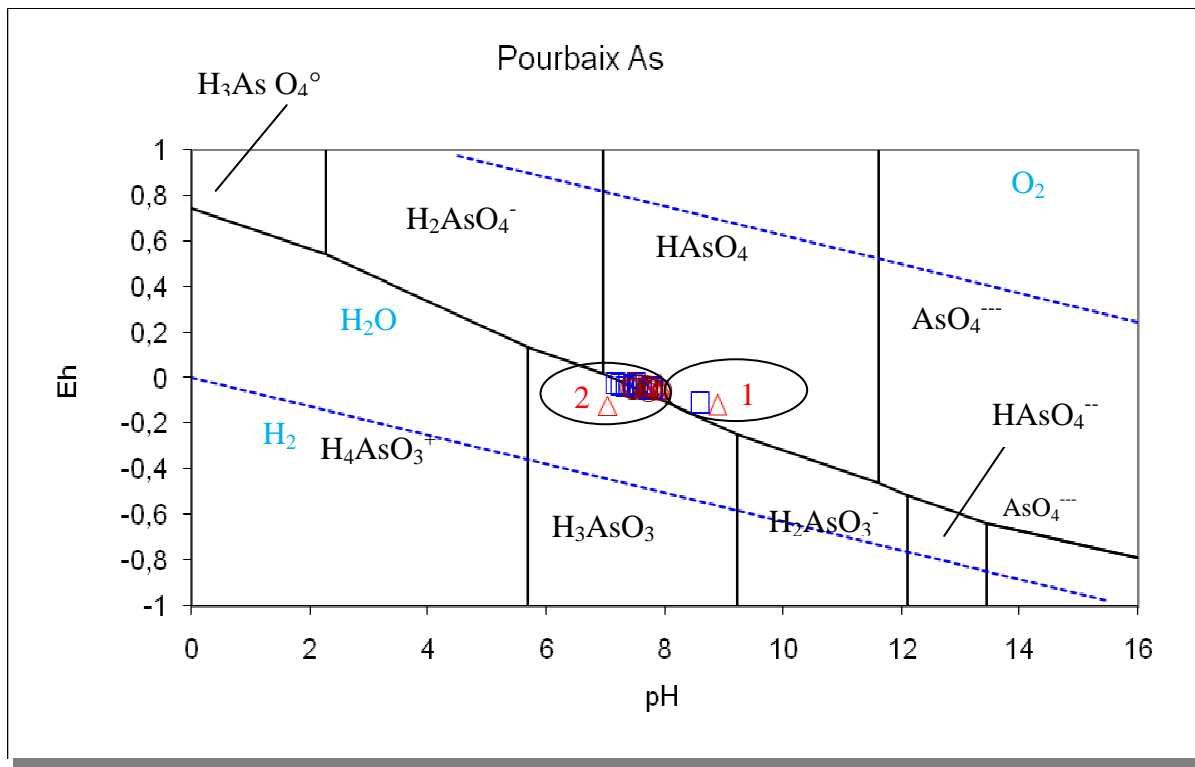


Figure.68 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'Arsenic (mois Déc. 09. Janv. Fév. 2010)

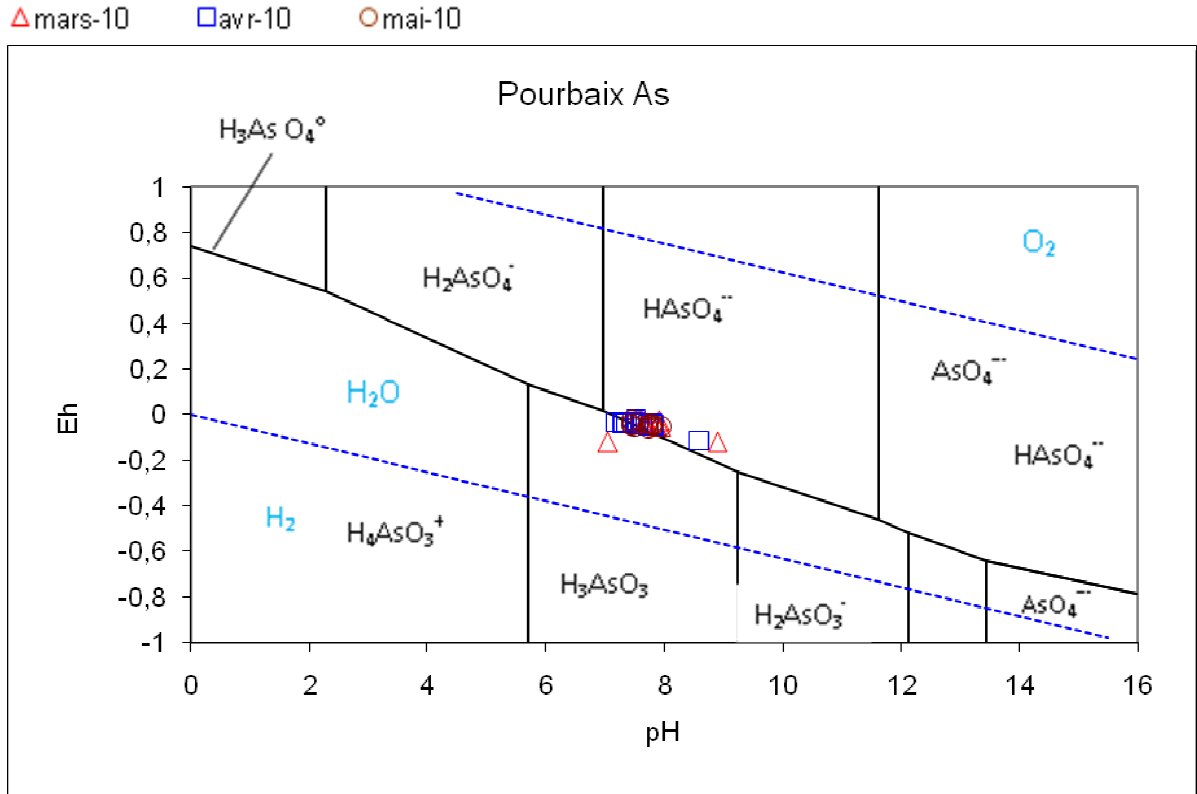


Figure.69 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'Arsenic (mois Mars. Avr. Mai. 2010)

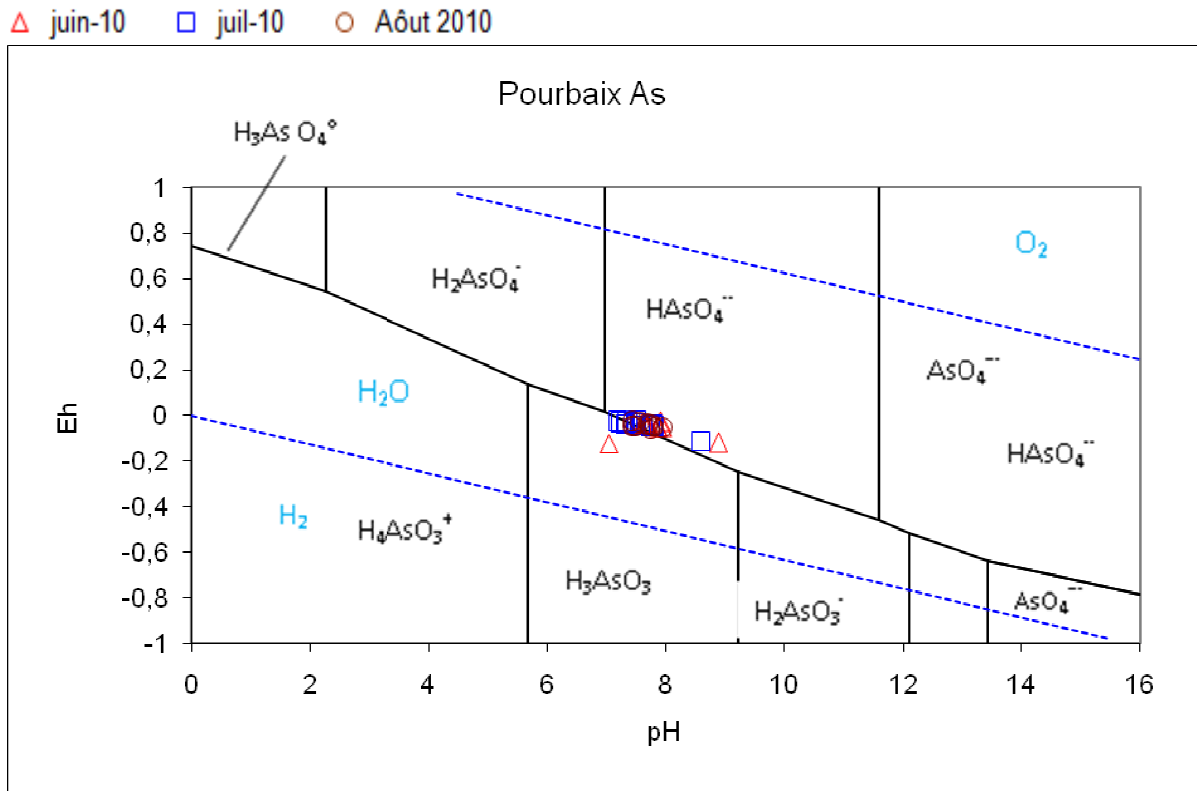


Figure.70 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'Arsenic (mois Juin. Jul. Août. 2010)

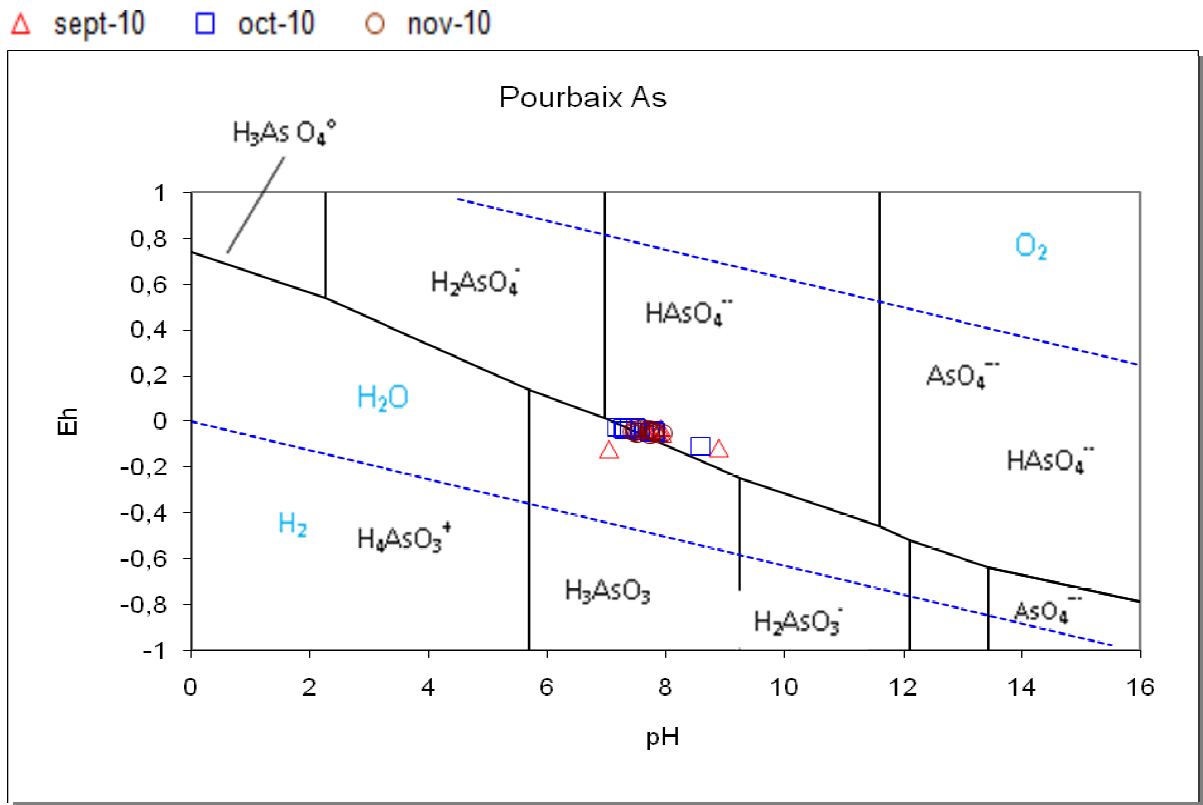


Figure.71 - Tracé du Diagramme de Pourbaix simplifié de l'Arsenic (mois Sept. Oct. Nov. 2010)

6. Résultats de la spéciation en solution avec PHREEQC :

PHREEQC est un programme écrit en C par David L. Parkhurst et C.A.J. Appelo; il est diffusé par l'*US geological survey*. PHREEQC est utilisé pour simuler des réactions chimiques et du transfert dans des eaux naturelles et polluées.

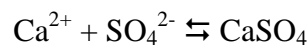
Les premières versions remontent à 1980 (PHREEQC, Parkhurst *et al.*). Il est suivi et en constante amélioration. Aujourd'hui, il dispose d'une interface intuitive sous window\$. Son code source est gratuit et disponible.

6.1 Les possibilités de PHREEQC :

Il permet notamment :

- de calculer la spéciation des espèces chimiques dans une solution aqueuse ainsi que les indices de saturation des minéraux ;
- de simuler pour les gaz, les phases solides et aqueuses, à différentes températures, des réactions chimiques (précipitation, dissolution...) en batch ou avec du transport en 1D (convection, dispersion) ;
- de tenir compte de lois cinétiques dans certaines réactions ;
- de simuler des réactions de surface (adsorption et complexation) ;
- d'utiliser également certains isotopes : ^2H , ^{13}C , ^{18}O , ^{34}S et ^{87}Sr .

6.2 La spéciation en solution :



K est la constante d'équilibre de cette réaction :
$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G_r^0}{R T}\right)$$

À l'équilibre et pour une température et pression donnée, on a :

$$\text{Log } K = \frac{a_{\text{CaSO}_4}}{a_{\text{Ca}^{2+}} \cdot a_{\text{SO}_4^{2-}}}$$

où a_i est l'activité de l'espèce i telle que $a_i = \gamma_i m_i$

Idéalement, la quantité « efficace » de l'espèce i dans le système correspond au nombre de moles de ce constituant (loi de Raoult). Dans les cas réels, la quantité « efficace » peut être notablement différente ; on ne peut plus considérer que $\gamma = 1$.

Ce coefficient d'activité γ_i traduit les interactions entre l'espèce i et les autres constituants du système.

6.3 Le coefficient d'activité γ_i

PHREEQC utilise l'équation de Debye-Hückel pour calculer les γ_i et donc la distribution de toutes les espèces en solution.

$$\text{Log } \gamma_i = - \frac{A z_i^2 \sqrt{\mu}}{1 + B a_i^0 \sqrt{\mu}} + b_i \mu$$

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_i z_i^2 c_i$$

est la force ionique de la solution (<1) ;

z_i est la charge de l'ion i ;

A et B sont constants et ne dépendent que de la température ;

a_i^0 est un paramètre représentant la taille de l'ion en solution ;

b_i est une constante qui représente l'écart à la loi de Debye-Hückel.

6.4 Etat de saturation :

« Le coefficient d'activité γ_i traduit les interactions entre l'espèce i et les autres constituants du système. »

Il est donc indispensable de connaître les concentrations des différentes espèces en solution, ainsi que le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, l'alcalinité, la température.

Ensuite, armé des valeurs des coefficients d'activités, on peut calculer les activités des espèces i puis l'état (ou l'indice) de saturation (IS) de la solution vis-à-vis d'un minéral. C'est le rapport : $\text{Log } Q/K$.

Pour l'espèce i , K est la constante d'équilibre et Q est le produit d'activité ionique. Ici, nous avons une phase minérale pure, donc l'activité vaut 1. Les solutions solides sont également prises en compte.

Pour notre exemple :
$$\text{Log } Q = a_{\text{Ca}^{2+}} \cdot a_{\text{SO}_4^{2-}}$$

6.5 Indice de saturation (IS) :

Ainsi,

- lorsque $Q/K < 0$, la solution est « sous-saturée » par rapport au minéral ;
- lorsque $Q/K = 0$, la solution et la phase solide sont à l'équilibre ;
- lorsque $Q/K > 0$, la solution est « sur-saturée » par rapport au minéral

6.6 Les ETM :

La spéciation et les propriétés physico-chimiques des ETM sont particulières. Pour simuler leurs comportements en solution, nous avons besoin de connaître :

- sous quelles formes ils peuvent se présenter (en phase minérale pure, en solution solide, sorbés, ioniques dissous, complexés avec de la matière organique...);
- les réactions chimiques qui déterminent la répartition entre les phases dissoutes et solides (vitesses de dissolution de phases porteuses, précipitation de phases secondaires, adsorption, désorption, etc.);
- les processus physiques responsables de leur transport dans le sol (diffusion, advection, transfert colloïdal...)

Les analyses détaillant les différents indices de saturation obtenus par point de mesure sont montrées dans les tableaux suivant.

Ces tableaux montrent chaque phase minérale possible, son indice de saturation, le log de l'activité des ions produits (AIP), et le log de la constante d'équilibre de la température de l'eau (KT). La dernière colonne est la stœchiométrie de la phase minérale qui est en équilibre.

- Par exemple, sur cette page, l'échantillon est légèrement sous-saturés (IS = -1.70 et -1,32) par l'anhydrite et Manganite, mais l'Aragonite, la calcite, la dolomite, et l'hématite sont sursaturés (IS = 1.85, 1.99, à 16.32).

Le calcul de l'indice de saturation (IS) des minéraux dissous vis-à-vis à l'eau au niveau de tous les points, pendant le mois d'avril 2014 par le logiciel PHREEQC, montre que plusieurs éléments chimiques sont susceptibles d'être impliqués dans les processus de précipitation / dissolution (voir simulations) en particulier le calcium (Ca^{2+}), le fer (Fe) et le manganèse (Mn^{2+}).

Les minéraux carbonatés (anhydrite, aragonite, calcite, dolomite,) pour le Mp2 par exemple, montrent un état d'équilibre (-1,70 à 4.10). En revanche, on trouve seulement les espèces minérales du fer (hydroxyde, goethite, hématite) qui possèdent un indice de saturation élevé (de 1.26 jusqu'à 16.32) vu l'effet du pompage qui produit une oxygénation de la nappe, ces indices sont plus élevés pour le MO37 (Hématite = 18.37). Dans les conditions favorables (oxydantes), l'hydroxyde tendra à se précipiter. Les teneurs en manganèse ne semblent pas être contrôlées par l'un des minéraux suivants : pyrochroite, manganite et pyrolusite, hausmannite. En effet, les

IS du manganèse sont largement négatifs (-1.32 à -12.33). Cependant, on trouve seulement de la rhodocrosite qui présente un indice de saturation proche de l'équilibre (-0,09).

Phase	<u>MP2</u>	SI	log IAP	log KT	
	<u>Anhydrite</u>	-1.70	-6.06	-4.36	CaSO4
	<u>Aragonite</u>	1.85	-6.49	-8.34	CaCO3
	<u>Calcite</u>	1.99	-6.49	-8.48	CaCO3
	CO2(g)	-3.71	-5.17	-1.47	CO2
	<u>Dolomite</u>	4.10	-12.99	-17.09	CaMg(CO3)2
	<u>Fe(OH)3(a)</u>	1.26	6.15	4.89	Fe(OH)3
	<u>Goethite</u>	7.15	6.15	-1.00	FeOOH
	Gypsum	-1.48	-6.06	-4.58	CaSO4:2H2O
	H2(g)	-26.17	-29.32	-3.15	H2
	H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
	Halite	-5.90	-4.32	1.58	NaCl
	Hausmannite	-2.05	58.98	61.03	Mn3O4
	<u>Hematite</u>	16.32	12.31	-4.01	Fe2O3
	Jarosite-K	-9.51	-18.72	-9.21	KFe3(SO4)2(OH)6
	Manganite	-1.32	24.02	25.34	MnOOH
Phase	<u>MP6</u>	SI	log IAP	log KT	
	Anhydrite	-1.52	-5.88	-4.36	CaSO4
	Fe(OH)3(a)	-0.03	4.86	4.89	Fe(OH)3
	<u>Goethite</u>	5.86	4.86	-1.00	FeOOH
	Gypsum	-1.30	-5.88	-4.58	CaSO4:2H2O
	H2(g)	-22.00	-25.15	-3.15	H2
	H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
	Halite	-6.06	-4.48	1.58	NaCl
	<u>Hematite</u>	13.73	9.72	-4.01	Fe2O3
	Jarosite-K	-6.93	-16.14	-9.21	KFe3(SO4)2(OH)6
	Melanterite	-8.04	-10.25	-2.21	FeSO4:7H2O
	O2(g)	-39.19	-42.08	-2.89	O2
Phase	<u>MP10</u>	SI	log IAP	log KT	
	Anhydrite	-1.81	-6.17	-4.36	CaSO4
	<u>Fe(OH)3(a)</u>	0.48	5.37	4.89	Fe(OH)3
	<u>Goethite</u>	6.37	5.37	-1.00	FeOOH
	Gypsum	-1.59	-6.17	-4.58	CaSO4:2H2O
	H2(g)	-22.00	-25.15	-3.15	H2
	H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
	Halite	-6.28	-4.70	1.58	NaCl
	<u>Hematite</u>	14.75	10.75	-4.01	Fe2O3
	Jarosite-K	-5.86	-15.07	-9.21	KFe3(SO4)2(OH)6
	Melanterite	-7.73	-9.94	-2.21	FeSO4:7H2O
	O2(g)	-39.19	-42.08	-2.89	O2

Phase <u>MP15</u>	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.79	-6.15	-4.36	CaSO4
Fe(OH)3(a)	-0.02	4.87	4.89	Fe(OH)3
<u>Goethite</u>	5.87	4.87	-1.00	FeOOH
Gypsum	-1.57	-6.15	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.00	-25.15	-3.15	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.88	-4.30	1.58	NaCl
<u>Hematite</u>	13.75	9.75	-4.01	Fe2O3
Jarosite-K	-7.07	-16.28	-9.21	KFe3(SO4)2(OH)6
Melanterite	-8.09	-10.30	-2.21	FeSO4:7H2O
O2(g)	-39.19	-42.08	-2.89	O2

Phase <u>MO16</u>	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.74	-6.11	-4.36	CaSO4
<u>Fe(OH)3(a)</u>	0.58	5.47	4.89	Fe(OH)3
<u>Goethite</u>	6.47	5.47	-1.00	FeOOH
Gypsum	-1.53	-6.11	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.00	-25.15	-3.15	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.76	-4.18	1.58	NaCl
<u>Hematite</u>	14.95	10.94	-4.01	Fe2O3
Jarosite-K	-5.24	-14.45	-9.21	KFe3(SO4)2(OH)6
Melanterite	-7.53	-9.74	-2.21	FeSO4:7H2O
O2(g)	-39.19	-42.08	-2.89	O2

Phase <u>MP21</u>	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.83	-6.19	-4.36	CaSO4
<u>Fe(OH)3(a)</u>	0.30	5.19	4.89	Fe(OH)3
<u>Goethite</u>	6.19	5.19	-1.00	FeOOH
Gypsum	-1.61	-6.19	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.00	-25.15	-3.15	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-6.22	-4.64	1.58	NaCl
<u>Hematite</u>	14.39	10.38	-4.01	Fe2O3
Jarosite-K	-5.82	-15.03	-9.21	KFe3(SO4)2(OH)6
Melanterite	-7.74	-9.95	-2.21	FeSO4:7H2O
O2(g)	-39.19	-42.08	-2.89	O2

Phase <u>MP24</u>	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-2.01	-6.37	-4.36	CaSO4
<u>Fe(OH)3(a)</u>	0.02	4.91	4.89	Fe(OH)3
<u>Goethite</u>	5.91	4.91	-1.00	FeOOH
Gypsum	-1.79	-6.37	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.00	-25.15	-3.15	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-6.22	-4.64	1.58	NaCl
Hausmannite	-17.88	43.15	61.03	Mn3O4
<u>Hematite</u>	13.83	9.82	-4.01	Fe2O3
Jarosite-K	-7.19	-16.40	-9.21	KFe3(SO4)2(OH)6
Manganite	-7.29	18.05	25.34	MnOOH
Melanterite	-8.22	-10.43	-2.21	FeSO4:7H2O
O2(g)	-39.19	-42.08	-2.89	O2
Pyrochroite	-8.15	7.05	15.20	Mn(OH)2
Pyrolusite	-12.33	29.05	41.38	MnO2

Phase <u>MO25</u>	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-2.07	-6.43	-4.36	CaSO4
Fe(OH)3(a)	1.43	6.32	4.89	Fe(OH)3
Goethite	7.32	6.32	-1.00	FeOOH
Gypsum	-1.85	-6.43	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.00	-25.15	-3.15	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-6.29	-4.70	1.58	NaCl
Hausmannite	-12.95	48.08	61.03	Mn3O4
Hematite	16.64	12.63	-4.01	Fe2O3
Jarosite-K	-2.94	-12.15	-9.21	KFe3(SO4)2(OH)6
Manganite	-5.65	19.69	25.34	MnOOH
Melanterite	-6.77	-8.98	-2.21	FeSO4:7H2O
O2(g)	-39.19	-42.08	-2.89	O2
Pyrochroite	-6.51	8.69	15.20	Mn(OH)2
Pyrolusite	-10.69	30.69	41.38	MnO2

Phase <u>MP29</u>	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-2.13	-6.49	-4.36	CaSO4
Fe(OH)3(a)	0.71	5.60	4.89	Fe(OH)3
Goethite	6.60	5.60	-1.00	FeOOH
Gypsum	-1.91	-6.49	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.00	-25.15	-3.15	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-6.37	-4.79	1.58	NaCl
Hausmannite	-16.09	44.94	61.03	Mn3O4
Hematite	15.21	11.21	-4.01	Fe2O3
Jarosite-K	-4.35	-13.56	-9.21	KFe3(SO4)2(OH)6
Manganite	-6.69	18.65	25.34	MnOOH
Melanterite	-7.40	-9.61	-2.21	FeSO4:7H2O
O2(g)	-39.19	-42.08	-2.89	O2
Pyrochroite	-7.55	7.65	15.20	Mn(OH)2
Pyrolusite	-11.73	29.65	41.38	MnO2

Phase <u>MP36</u>	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.92	-6.28	-4.36	CaSO4
Fe(OH)3(a)	0.31	5.20	4.89	Fe(OH)3
Goethite	6.20	5.20	-1.00	FeOOH
Gypsum	-1.70	-6.28	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.00	-25.15	-3.15	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-6.59	-5.01	1.58	NaCl
Hausmannite	-12.47	48.56	61.03	Mn3O4
Hematite	14.41	10.40	-4.01	Fe2O3
Jarosite-K	-6.02	-15.23	-9.21	KFe3(SO4)2(OH)6
Manganite	-5.49	19.85	25.34	MnOOH
Melanterite	-7.84	-10.05	-2.21	FeSO4:7H2O
O2(g)	-39.19	-42.08	-2.89	O2
Pyrochroite	-6.35	8.85	15.20	Mn(OH)2
Pyrolusite	-10.53	30.85	41.38	MnO2

Phase <u>MO37</u>	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-2.20	-6.56	-4.36	CaSO4
Aragonite	-1.01	-9.35	-8.34	CaCO3
Calcite	-0.87	-9.35	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-1.81	-3.28	-1.47	CO2
Dolomite	-0.92	-18.01	-17.09	CaMg(CO3)2

<u>Fe(OH)3(a)</u>	2.39	7.28	4.89	Fe(OH)3
<u>Goethite</u>	8.28	7.28	-1.00	FeOOH
Gypsum	-1.98	-6.56	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.00	-25.15	-3.15	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.99	-4.41	1.58	NaCl
Hausmannite	-12.81	48.22	61.03	Mn3O4
<u>Hematite</u>	18.57	14.56	-4.01	Fe2O3
<u>Jarosite-K</u>	0.53	-8.68	-9.21	KFe3(SO4)2(OH)6
Manganite	-5.60	19.74	25.34	MnOOH
Melanterite	-5.66	-7.87	-2.21	FeSO4:7H2O
O2(g)	-39.19	-42.08	-2.89	O2
Pyrochroite	-6.46	8.74	15.20	Mn(OH)2
Pyrolusite	-10.64	30.74	41.38	MnO2
Rhodochrosite	-0.09	-11.22	-11.13	MnCO3
<u>Siderite</u>	0.23	-10.66	-10.89	FeCO3

Phase **MP39**

SI log IAP log KT

Anhydrite	-2.08	-6.45	-4.36	CaSO4
Aragonite	-0.67	-9.00	-8.34	CaCO3
Calcite	-0.52	-9.00	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-1.77	-3.24	-1.47	CO2
Dolomite	-0.75	-17.84	-17.09	CaMg(CO3)2
<u>Fe(OH)3(a)</u>	0.42	5.32	4.89	Fe(OH)3
<u>Goethite</u>	6.32	5.32	-1.00	FeOOH
Gypsum	-1.86	-6.45	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.00	-25.15	-3.15	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-6.30	-4.72	1.58	NaCl
<u>Hematite</u>	14.64	10.63	-4.01	Fe2O3
Jarosite-K	-5.95	-15.16	-9.21	KFe3(SO4)2(OH)6
Melanterite	-7.81	-10.02	-2.21	FeSO4:7H2O
O2(g)	-39.19	-42.08	-2.89	O2
Siderite	-1.69	-12.58	-10.89	FeCO3

End of simulation.

Conclusion :

Les activités anthropiques rejettent des métaux dans l'environnement sous différentes formes par le biais du lessivage des sols et de la solubilisation des poussières par les pluies. Ces métaux sont retrouvés dans l'Oued Meboudja sous forme dissoute et particulaire.

Il est nécessaire de connaître la chimie de ces éléments en amont de la rivière pour mieux comprendre les effets à l'aval ainsi que les modifications de la forme sous laquelle se trouvent ces éléments.

Dans la plaine de la Meboudja, les eaux de ruissellement issues des toitures, des trottoirs, des chaussées, des routes, des sols, des cultures et particulièrement les rejets industriels bruts qui gagnent les eaux de surface et souterraines déjà contaminées par les métaux lourds, augmentant ainsi leur vulnérabilité.

La représentation de toutes les valeurs du Eh et du pH mesurés pendant la période d'octobre novembre 2010 sur les diagrammes d'équilibre du fer, manganèse et de l'azote, montre que les valeurs sur le diagramme du fer se positionnent toujours dans le domaine de stabilité de la forme Fe(OH), alors que sur le diagramme du manganèse, elles se partagent entre trois domaines de stabilité Mn₂O₃, Mn²⁺ et Mn₃O₄. Il est donc logique de trouver que les indices de saturation des minéraux du fer sont plus importants que ceux des minéraux du manganèse.

Chapitre IV : Etude des concentrations de la mobilité et de la spéciation des ETM

Références bibliographiques

Back, W. & Barnes, J (1965) Relation of electrochemical potentials and iron content to groundwater flow patterns. US Geol. Surv. Prof. Pap. 498-C, 1-16.

Bauhus, W. (1988) Hydrochemische, isotonenphysikalische Untersuchungen an Grundwässern tieferer Aquifere in Raum Hamburg-Münster. Forsch. Geol. Paläont. 67.

Beaucaire, C. & Toulhoat, P. (1987) Redox chemistry of uranium and iron, radium geochemistry, and uranium isotopes in the groundwaters of the Lodève Basin, Massif Central, France. Appl. Geochem. 2, 417-426.

Böttcher, J. & Strebel, O. (1985) Redoxpotential und F⁻/pH-Diagramme von Stoffumsetzungen in reduzierendem Grundwasser (Beispiel Fuhrberger Feld). Geol. Jahrb. Reihe C, 40, 3-34.

CEE (1982) Groundwater resources of the European Community, coordinateur J. J. Fried. Schäfer, Hannover, Germany.

Champ, D. R., Gulens, J. & Jackson, R. E. (1979) Oxidation-reduction sequences in groundwater flow systems. Can. J. Earth Sci. 16, 12-23.

Dever, L. (1985) Approches chimiques et isotopiques des interactions fluide-matrice en zone non saturée carbonatée. Thèse de Doctorat es sciences, Université Paris-Sud, France.

Dzombak, D.A. et Morel, F.M.M. (1990) – Surface complexation modeling -Hydrous ferric oxide. John Wiley, New York, 393 p.

Edmunds W. M., Darling W. G., Kimmiburgh D. G., Dever L., Vachier P. 1992. Chalk groundwater in England and France : hydrogeochemistry and water quality. British Geological Survey Research Report SD,92,2.

Edmunds, W. M. & Walton, N. R. G. (1983) The Lincolnshire Limestone - hydrogeochemical evolution over a ten year period. / . Hydrol. 61, 201-211.

Edmunds, W. M. (1973) Trace element variations across an oxidation-reduction barrier in a limestone aquifer. In: Proc. Symp. Hydrogeochemistry and Biogeochemistry (Tokyo, 1970) ed. E. Ingerson, 115-147. Clarke Co., Washington DC, USA.

Edmunds, W. M., Miles, D. L. & Cook, J. M. (1984) A comparative study of sequential redox processes in three British aquifers. In: Hydrochemical Balances of Freshwater Systems, ed. E. Eriksson, 55-70. IAHS Publ. no. 150.

Gillham, R. W. & Cherry, J. A. (1977) Field evidence of denitrification in a shallow groundwater flow system. Water Pollut. Res. 13, 53-71.

Grenthe, I., Stumrn, W., Laaksuharju, M., Nilsson, A. C. & Wikberg, P. (1992) Redox potentials and redox reactions in deep groundwater systems. Chem. Geol. 98, 131-150.

Howard, K. W. F. (1985) Denitrification in a major limestone aquifer. J. Hydrol. 76, 265-280.

<http://pays-de-la-loire@sante.gouv.fr>

Jones. M. & Andrews, J. N. (1987) Baseline geochemical conditions in the Chalk Aquifer, Berkshire, UK. A basis for groundwater quality management. Appl. Geochem. 2(3), 251-274.

Kloppman, L. Dever & W. M. EDMUNDS (1996) Zones d'oxydo-réduction dans l'aquifère de la Craie des bassins de Paris et de l'Allemagne du nord, Hydrological Sciences Journal, 41:3, 311-326.).

- Kloppmann, W. (1995) Datation des eaux de la Craie (France et Allemagne): Approche chimique et isotopique. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Paris-Sud, France.
- Kloppmann, W., Dever, L. & Edmunds, W. M. (1994) Isotopic and geochemical investigations of chalk groundwater of the Champagne region, France. *Z. dt. geol. Ges.* 145, 143—152.
- Koestler, A. G. & Ehrmann, W. U. (1986) Fault patterns in the calcareous overburden of a salt diapir: Laegerdorf, N.W. Germany. *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.* 1986(9), 555-569.
- Leuchs, W. (1988) Geochemische und mineralogische Auswirkung beim mikrobiellen Abbau organischer Substanz in einem anoxischen Porengrundwasserleiter. *Z. dt. geol. Ges.* 139, 415-423.
- Lindberg, R. D. & Runnels, D. D. (1984) Groundwater redox reactions: An analysis of equilibrium state applied to Eh measurements and Geochemical modeling. *Science* 225, 925-927.
- Mariotti, A., Landreau, A. & Simon, B. (1988) ^{15}N isotope biogeochemistry and natural denitrification process in groundwater: Application to the chalk aquifer of northern France. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52, 1869-1878.
- Moulin, M. (1990) Genèse et évolution des minéraux secondaires en zone non saturée carbonatée: étude géochimique et isotopique de la zone non saturée de la Craie de Champagne. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Paris-Sud, France 168 pp.
- Parkhurst D.L. et Appelo C.A.J. (1999) – User's guide to PHREEQC version 2: a computer program for speciation, batch-reaction, one dimensional transport and inverse geochemical calculations. USGS, Water-resources investigations report 99-4259.
- Parkhurst, D.L., Thorstenson, D.C. et Plummer, L.N. (1980) – PHREEQE - A computer program for geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 80-96, 195 p. (Revised and reprinted August, 1990.)
- Rotterdam, The Netherlands. Schönfeld, J. & Grube, F. (1990) Chloride distribution pattern and fracturing in the white chalk of Lagerdorf/Holstein (N.W. Germany). In: *Chalk*, 591-596. Thomas Telford, London, UK.
- Ruskeeniemi, T., Niini, H., Söderholm, B., Vesterinen, M., Blomquist, R., Holonen, S., Lindberg, A., Jaakola, T., Suski, J. & Suutarinen, R. (1989) The Palmottu U-Th deposit in SW Finland as a natural analogue to the behaviour of spent nuclear fuel in bedrock: A preliminary report. In: *Proc. 6th Int. Symp. on Water/Rock Interaction* (Malvern, UK, 1989) ed. D. Miles, 601-604. Balkema,
- Sposito G.A. (1986) – Distinguishing adsorption from surface precipitation. In: *Geochemical processes at mineral surfaces* (Eds. J. A. Davis and K. H. Hayes), symposium series 323. American chemical society.
- Tomas François. Les mines et la région d'Annaba. In: *Revue de géographie de Lyon*. Vol. 45 n°1, 1970. pp. 31-59.
- Urbain FIFI; contamination des eaux souterraines : une situation particulière dans les villes des pays en développement. Laboratoire de Qualité de l'Eau et de l'Environnement (LAQUE), Université Quisqueya, BP 796, Port-au-Prince, Haïti.

Chapitre VI:

Etude des concentrations des métaux lourds dans les sédiments

Introduction

Le sol est le lieu d'interactions entre le climat, la roche mère et l'activité biologique. Sa composition chimique et ses variations sont de ce fait très complexes, et beaucoup d'éléments présents participent aux cycles biogéochimiques, en particulier les éléments traces (Pédro et Delmas, 1970). Une grande partie de ces éléments comme les métaux sont souvent immobilisés dans le sol et ne sont mis en solution que dans des conditions physico-chimiques particulières (Charlatchka et Cambier, 1996). Or la quantité d'éléments traces présents dans le sol tend à augmenter par des intrants de différentes origines : déchets industriels boues de station d'épuration (Kelly et al, 1999) ou encore, produits phytosanitaires (Novak et al, 1996). La tendance actuelle est donc de veiller à contrôler les apports en éléments traces afin de limiter leur accumulation (Ifen, 2000).

Deux objectifs principaux se dégagent ainsi pour l'étude du domaine chimique.

- La composition chimique des sédiments récoltés doit être définie et située en termes d'apport relatif au fond géochimique, mais aussi par rapport aux réglementations existantes quant à l'épandage de matières susceptibles de renfermer des métaux lourds.
- Les conditions de milieu susceptibles de mettre en solution des éléments pouvant être toxiques par leur nature et leur concentration, doivent être analysées à l'aide d'expériences visant à maximiser les risques.

Cette étude vise à déterminer les modifications chimiques, et physiques qui sont susceptibles d'être engendrées par la présence des ETM ; à la surface ou incorporé au sol. Ce dernier assume de nombreuses fonctions de stockages et de transferts, liées à son caractère poreux. Il est notamment un facteur majeur des échanges avec l'atmosphère pour l'eau et la chaleur, mais c'est également un acteur essentiel des conditions offertes à l'activité biologique (Fig.72).

Pedro et Delams (1970) distinguent différentes catégories d'éléments (A, B, C, D, E) en se basant sur leurs caractéristiques chimiques. Ces caractéristiques sont en relation avec le rayon ionique r de l'élément et la charge de l'ion Z . l'affinité de quelques éléments traces peut être expliquée par association avec des éléments majeurs (sous certaines conditions, en particulier le pH du sol). Ainsi Cd^{2+} a un comportement proche de Ca^{2+} . Ce qui en fait un des éléments en traces les plus mobiles (catégories A). Au contraire Cr^{3+} exhibe un comportement proche de Al^{3+} ou Fe^{3+} . Sa mobilité est donc réduite sauf en conditions complexantes ou réductrices (catégorie C). la plupart des autres éléments en traces (Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+}) se rapprochent de Mg^{2+} , ou Fe^{2+} et sont donc dotés d'une plus grande mobilité en milieu peu acide (catégorie B).

L'élément en trace n'est pas seulement défini par sa nature en moyenne, qui est un critère statique, mais aussi par certaines propriétés comme sa mobilité géochimique et les composés qu'il peut former. Les éléments en trace du sol à caractère polluant reconnu, susceptibles de retenir en premier lieu l'attention, sont ceux qui, à cause de leur nature, sont toxiques à faibles teneurs dans les organismes animaux ou végétaux et peuvent être disséminés dans l'environnement : As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn...

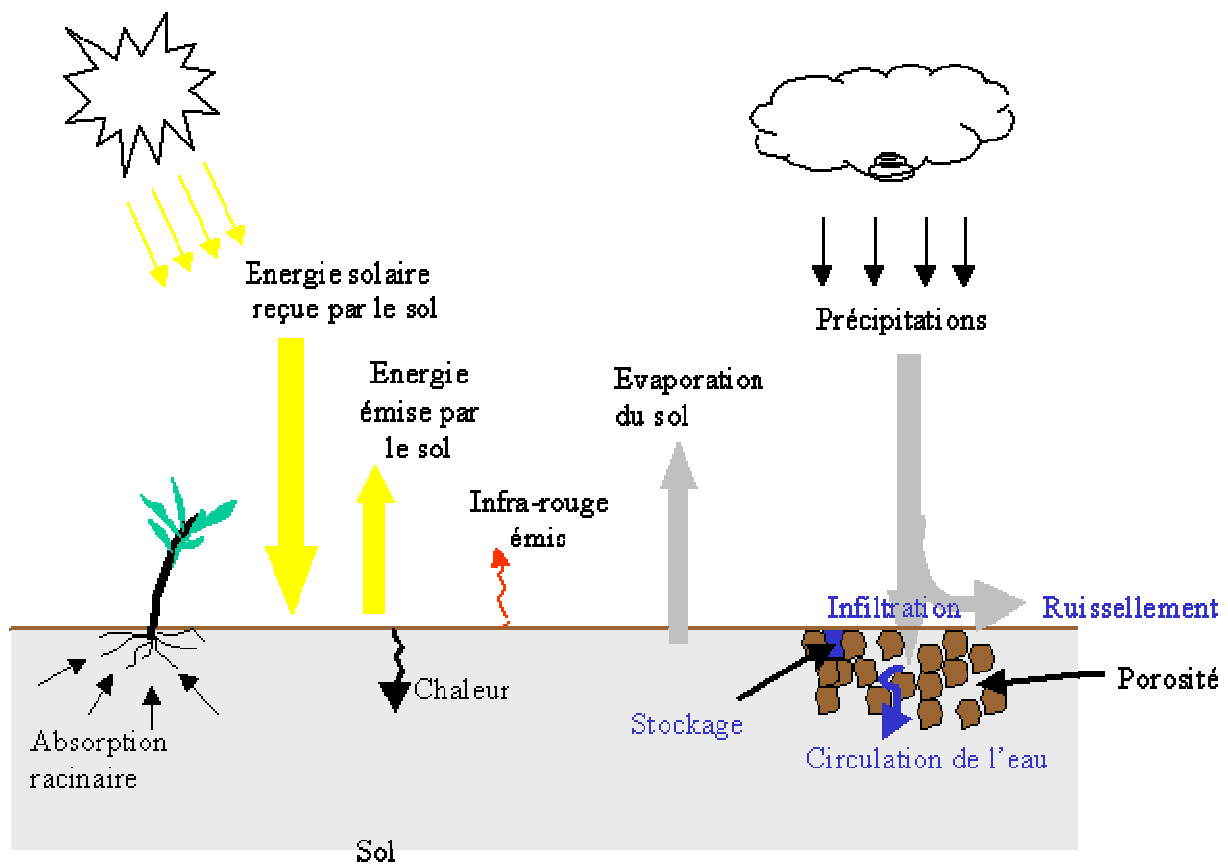


Figure 72. Rôle du sol dans les transferts et le stockage (Pédro et al.1970)

Une analyse est donc nécessaire pour mettre en évidence les principales modifications des effets engendrés par les rejets industriels, agricoles, ou domestiques des eaux ; qui mènent à l'incorporation des ETM dans le sol. Pour évaluer ces impacts à l'issu de quelques années. Les processus observés sur les résultats expérimentaux obtenus dans chaque domaine seront interprétés et analysés.

On constate que l'évaluation des résultats d'analyses de l'eau est simplifiée, par conséquence la nécessité d'une investigation plus approfondie; nous a mené à effectuer des analyses concernant les Sédiments.

C'est une investigation menée afin d'apprécier l'impact des rejets du complexe sidérurgique sur l'environnement.

I. Géologie de la région :

La région d'Annaba présente, en effet cette originalité de recouvrir toutes les grandes unités structurales Algérienne (cf. croquis n°73)

- C'est tout d'abord, au nord, le massif de l'Edough, noyau le plus oriental du bourrelet liminaire africain, qui s'enlève brutalement au dessus de la mer et des plaines d'Annaba. Pour l'essentiel il est constitué de roches cristallophylliennes mais une mince pellicule sédimentaire en recouvre le centre et il se termine à l'Ouest par les venus volcaniques du Cap de Fer.
- Puis viennent les complexes chaînes telliennes, ici plus confuses encore que dans le reste du Maghreb. A l'Ouest de Guelma, en effet, viennent mourir les derniers chaînons calcaires (Djebel Debagh), laissant la place à un relief chaotique taillé aussi bien dans la couverture allochtone des grés de Numidie que dans les diapirs triasiques.
- Enfin le domaine atlasique où, malgré une morphogénie complexe foisonnement les formes structurales simples. Elles apparaissent d'ailleurs ici d'autant plus magnifiques qu'une évolution plus poussée multiplié les formes en inversion de relief.

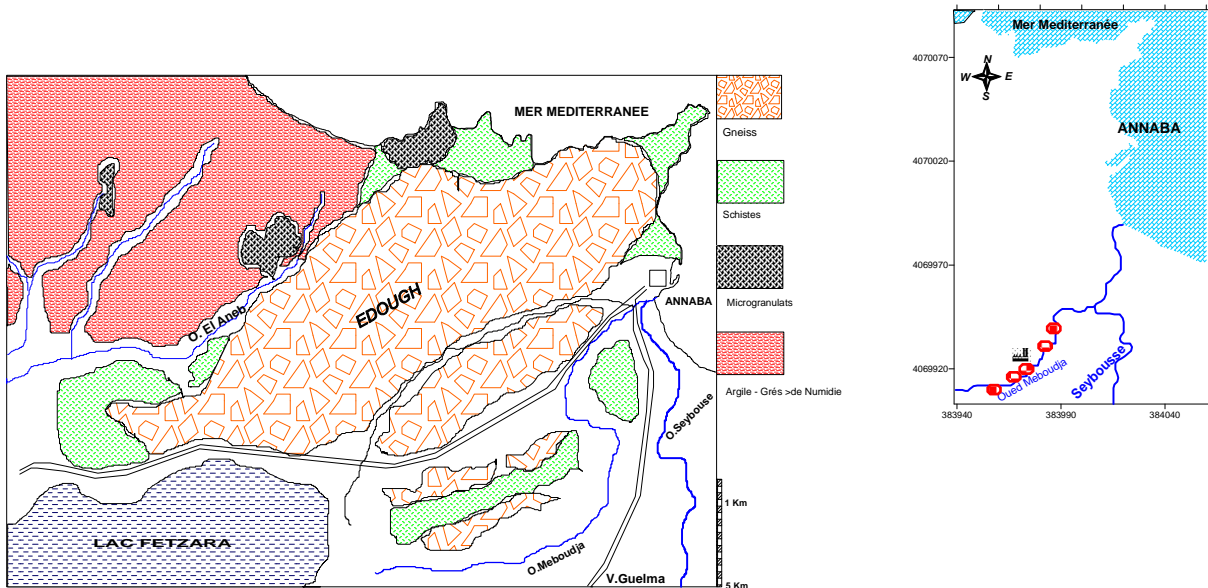


Figure 73. Croquis géologique de la région de Annaba.

II. Les métaux lourds et le sol :

Que deviennent les métaux dans le sol ? Leur sort dépend du métal et du sol étudié. Une partie est volatilisée (mercure). Une partie part avec le ruissellement. Une partie pénètre dans le sol. Un sol est un ensemble complexe, constitué de plusieurs fractions ou « phases ». La phase solide ne représente que la moitié du volume, le reste étant constitué d'eau et de gaz.

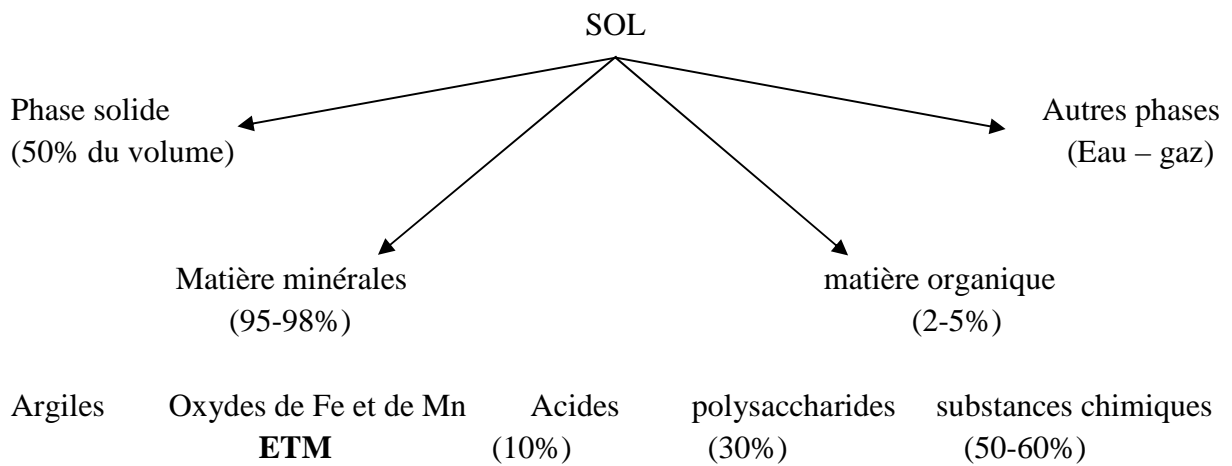


Figure 74. Différentes phases constituant un sol. (Anonyme.1996).

La variable déterminante est le degré de solubilité du métal. Si le métal est soluble, il va passer dans les nappes et/ou dans la plante ; s'il est insoluble, il va rester dans le sol. Cette connaissance est fondamentale car elle détermine à la fois le risque réel lié à la mobilisation dans l'eau et le remède éventuel : certaines plantes - type gazon d'Espagne ou certaines avoines- peuvent capter les métaux lourds et, par conséquent, constituer une voie de réhabilitation dans l'avenir si l'on arrive à développer des techniques adaptées.

La solubilité va dépendre de plusieurs facteurs :

- l'apport de matières fertilisantes, notamment de boues, est l'un des éléments de contrôle de la mobilité. La boue chaulée, avec apport de calcaire diminue la mobilité (sauf exception pour l'arsenic).
- l'origine de l'apport. Les éléments traces métalliques se diffusent plus ou moins facilement selon qu'il s'agit de rejets isolés ou s'ils proviennent de boues. Pour simplifier, les métaux lourds dans les boues restent dans celles ci, au moins pendant un certain délai.
- l'aération des sols. Un tassement des sols (lié au passage d'engins...) accroît la mobilité et la diffusion dans les eaux souterraines. Un sol aéré permet d'activer les composés de fer et de manganèse présents dans le sol. Ces composés, peu solubles, maintiennent et immobilisent les métaux.

III. Les relations entre les paramètres du sol et les concentrations en ETM :

Selon une étude de (Maas, S., et al.2010) la majorité des types de sols au sein de notre site d'étude, sont les «Technosols" (sols qui ont été profondément modifiés par les activités humaines), «Fluvisols » dans la plaine de la Seybouse, et "Arénosols" dans le massif de l'Edough « Technosols » : présentent un pH alcalin, des valeurs élevées de sable, et de faible CEC. « Fluvisols » : ont un pH alcalin et des valeurs élevées de l'argile et faible CEC.

« Arénosols » : sont caractérisées par acide à pH neutre, les valeurs élevées de sable et à faible CEC. Dans chaque type de sol, il est enregistré de faibles teneurs en CO. La distribution des tailles des particules dans chaque échantillon a montré une grande dispersion des échantillons entre les sols sableux et argileux (Fig. 75). Les premiers étaient principalement dans le nord de la région l'étude, et le second dans le sud. La zone d'échantillonnage montre un gradient nord-sud pour la teneur en argile, comme le montre la représentation du triangle de texture du sol et CEC (Fig. 75).

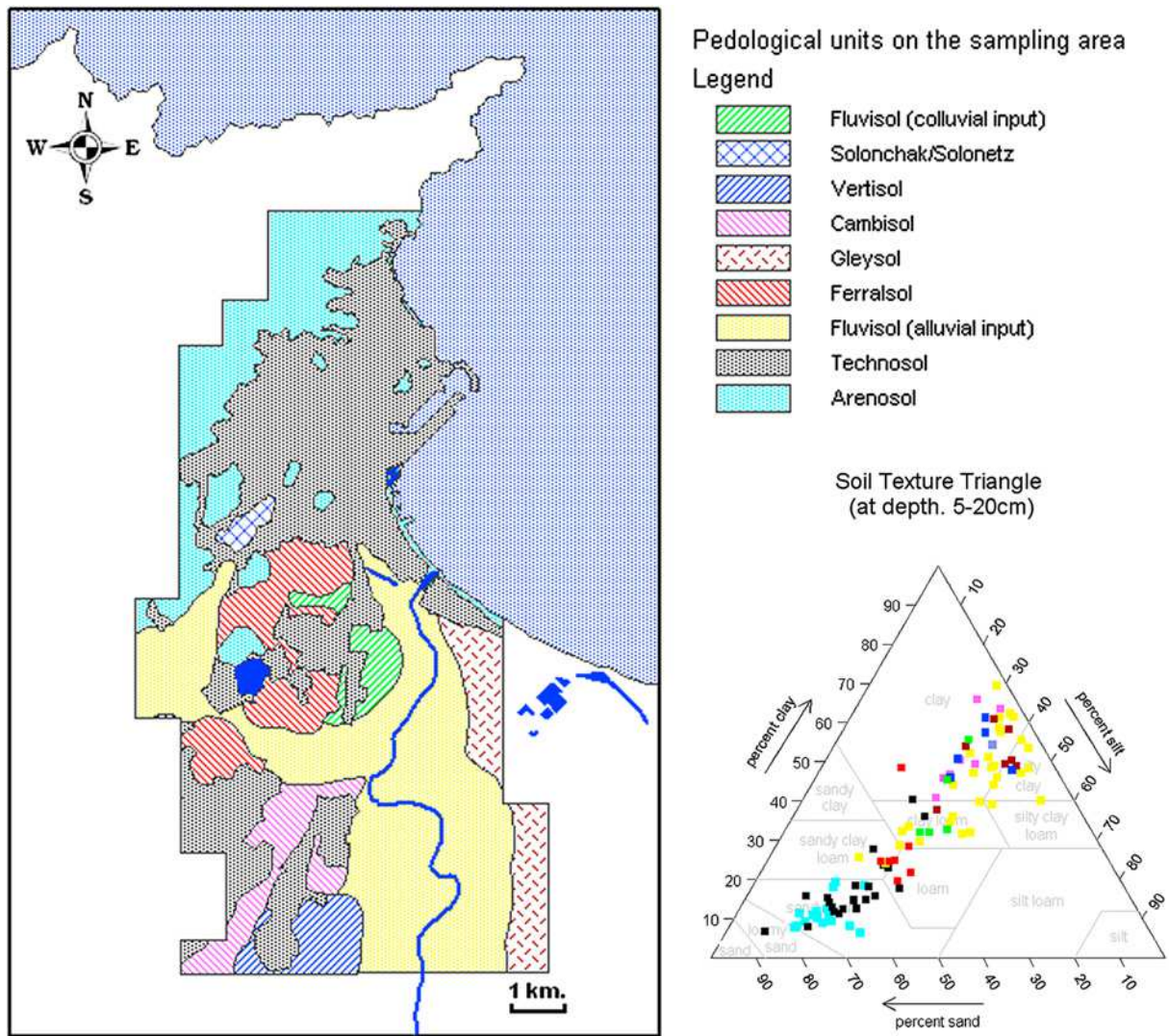


Figure 75. Carte de types de sol et représentation des échantillons en fonction de classes de texture USDA (Maas, S., 2010).

IV. Objectif et lieu d'étude :

L'objectif de ce travail est de comparer les résultats de trois méthodes

- 1) D.R.X (diffractométrie par rayons X) ;
 - 2) M.E.B (microscope à balayage électronique), et ;
 - 3) Extraction des E.T.M, établies de façon indépendante selon les approches susmentionnées.
- Les points d'échantillonnages sont distribués dans le lit de l'oued Meboudja.

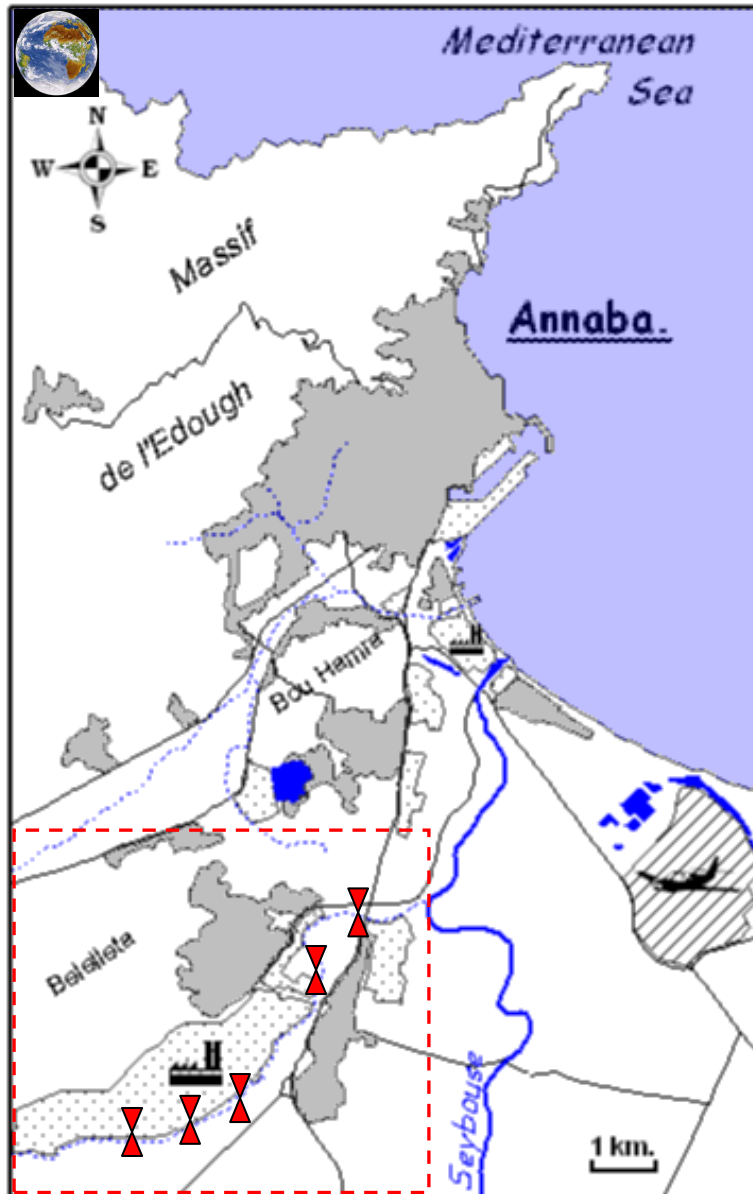


Figure 76. plan d'échantillonnage dans la plaine de la Meboudja - Maas, S modifiée -

V. Matériel et méthodes :

La première méthode est basée sur l'analyse par DRX des sédiments de ruisseau considérée ; comme représentatifs des matériaux présents à l'amont du point MO16 de prélèvement. Par ailleurs les 10 échantillons (de deux compagnes) de sédiments ont été prélevés en lit d'oued de Meboudja afin de les caractérisés.

Les préoccupations environnementales actuelles ont renouvelé l'intérêt d'une telle connaissance afin d'établir l'importance des contaminations éventuelles d'origine anthropiques (Baize et Tercé, 2002). Dans notre cas, on s'intéresse essentiellement aux sédiments dans un objectif de connaissance des transferts des éléments traces métalliques eaux - sédiments.

a) Nature et modalités de la préparation des prélèvements :

Deux séries de prélèvement ont été réalisées au mois de Janvier 2009 et Mars 2009. En accord avec notre objectif l'échantillon doit rendre compte d'une pollution récente et; en sédimentologie les métaux se fixent préférentiellement sur la fraction fine, inférieure à 63 μ m. Ainsi les sédiments fins fraîchement déposés en surface sont échantillonnés en plusieurs endroits afin d'être représentatifs de la station, à l'aide d'une cuillère en inox, à une profondeur inférieure à 5 cm, sur les berges et les endroits où le courant est faible. Environ 300g sont collectée dans des pots en polyéthylène préalablement rincés à l'acide nitrique (5N) et à l'eau distillée.

Au laboratoire, les échantillons sont conservés à (+ 4°C) jusqu'à leur traitement. Les sédiments prélevés sont transvasés dans des cristallisoirs et séchés dans une étuve à une température de 80°C pendant 48 heures. Après refroidissement, les échantillons sont broyés dans un mortier en porcelaine afin de les réduire en particules fines, puis tamisés avec un tamis en toile de nylon, à mailles de 60 μ m.

b) Principe et théorie :

Dès que les échantillons parviennent au laboratoire, les étapes suivantes doivent être effectuées :

- Numérotation des échantillons.
- Préparation des échantillons pour le séchage au four;
- Séchage des échantillons à l'air ambiant ou dans une étuve à 37 °C jusqu'à ce qu'ils soient secs (2 à 5 jours);
- Enlèvement des roches et des débris végétaux des échantillons sec, puis broyage et tamisage des échantillons à 63 μ m;
- Empotage des échantillons pour prélèvement de sous échantillons à des fins d'analyse.

c) Appareillage :

- Broyeur ou mortier.
- Étuve (facultatif).
- Tamis (à 63 μ m).
- Four à moufle.
- Bain de sable.

d) Conservation des échantillons :

Conserver les échantillons dans des contenants en plastique ou dans des fioles de 50 ml exempts de contamination.

Aucun agent de conservation n'est requis et les échantillons peuvent être conservés à la température ambiante. Le délai de conservation entre le prélèvement et l'analyse ne doit pas excéder 6 mois.

e) Préparations des échantillons :

- À la réception de l'échantillon, briser les grosses mottes de terre et sécher à l'air ambiant (ou à l'étuve à 37 °C) dans une pièce libre de poussière.
- Après séchage, enlever les roches et les débris végétaux et réduire les agrégats à l'aide d'un broyeur ou d'un mortier.
- Broyer et tamiser les échantillons à 63µm pour l'analyse de tous les éléments.

Note – Tous les instruments utilisés (broyeur, tamis, etc.) doivent être en acier inoxydable, nylon ou téflon afin d'éviter toute contamination lors de l'analyse d'éléments en faible quantité tels les oligo-éléments (éviter les tamis en laiton [Alliage de cuivre et de zinc], car il y a présence de cuivre).

VI. Étude aux rayons X

Cette méthode, essentielle dans l'identification des assemblages argileux complexes (i.e., cas des assemblages naturels dans les sols et les sédiments).

La diffraction des rayons X consiste à appliquer un rayonnement de la longueur d'onde des rayons X ($0.1 < \lambda < 10\text{nm}$) monochromatiques; sur un échantillon argileux. Le rayonnement pénètre le cristal, il y a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émissions de radiations dans toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phases vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté. La condition pour que les radiations soient en phase s'exprime par la loi de Bragg:

$$n \lambda = 2d \sin \theta$$

Où-

n: nombre entier correspondant à l'ordre de la diffraction.

λ : longueur d'onde du rayonnement utilisé.

d: espace basal, en angströms (Å).

θ : angle de diffraction.

Cette technique est basée sur la diffusion d'un faisceau de rayons x monochromatique par les plans réticulaires des cristaux contenus dans les poudres orientées des échantillons; (selon la loi précédente; de Bragg).

- Radiation du cuivre (=1,5418 Å).
- Haute tension 40 Kv et 45 Mv.
- Fentes de divergence automatique.
- Fente de diffusion 1°.
- Fente de réception 0,5 mm.

Les résultats de mesure obtenus se présentent sous forme de diffractogrammes (**voir graphes de la fig.77**) pour chaque échantillon traité.

- ◆ Les diffractogrammes sont traités par informatique.
- ◆ La valeur de « d » est obtenue par la loi de Bragg.
- ◆ Des abaques (Selected powder diffraction data for mineral, 1974) sont utilisées pour : l'interprétation des diffractogrammes obtenus.

Interprétation :

Après avoir calculé la valeur de « d » et aussi l'intensité de chaque pic nous avons comparé nos valeurs avec celle des abaques (Selected powder diffraction data for mineral, 1974), et nous avons constaté que la plus parts des pics représentent; le Quartz avec 93.28% et la calcite pour l'échantillon 18 (tableau.37).

Tableau.37- Résultats des analyses par D.R.X

N°	model I
Echant. 16	Quartz - Calcite
Echant. 17	Quartz – Calcite - Muscovite - Montmorillonite - Smectite
Echant. 18	Calcite - Quartz
Echant. 25	Quartz - Mica
Echant. 39	Quartz

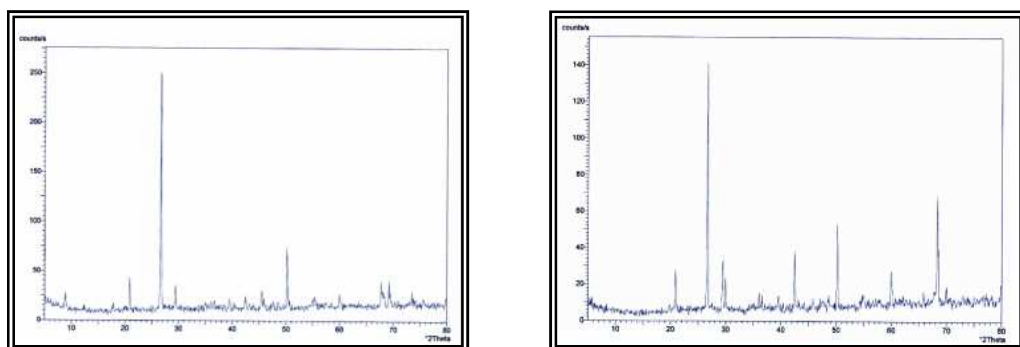


Figure 77. Diffractogrammes des échantillons MO16-MO17

VII. Étude par le M.E.B

Technique de mesure de la composition élémentaire au niveau des parties par milligramme, par formule empirique, l'état chimique et de l'état électronique des éléments qui existent au sein d'un matériau. Les spectres sont obtenues par irradiation d'un matériau avec un faisceau de rayons X tout en mesurant simultanément l'énergie cinétique et le nombre d'électrons qui s'échappent de la 0 à 10 nm supérieure du matériau en cours d'analyse. Elle nécessite un vide élevé ($P \sim 10^{-8}$ mbar) ou ultra-vide ($P < 10^{-9}$ mbar), avec laquelle les échantillons sont analysés à des pressions de quelques dizaines de millibar.

Le poids atomique (en %), dans chaque type de sédiment est représenté dans Tab.38

Tableau.38- Résultats des analyses par M.E.B

Element	Wt% (MO16)	Wt% (MO17)	Wt% (MO18)	Wt% (MO25)	Wt% (MO39)
CK	03.44	-	6.58	05.49	08.31
OK	10.86	20.99	20.89	19.08	13.96
MnL	01.02	00.00	0.00	00.00	00.00
CoL	00.43	01.00	0.00	00.14	00.37
NiL	00.00	00.00	0.00	00.00	00.00
CuL	00.04	00.00	-	00.06	00.00
AlK	08.23	11.96	7.87	06.61	11.32
SiK	25.93	27.42	30.66	31.47	23.90
PbM	01.18	00.50	0.88	01.03	02.40
CdL	00.37	00.41	0.34	00.00	00.58
KK	02.01	-	2.05	02.95	03.74
CaK	22.10	10.29	9.60	09.33	05.16
FeK	24.40	22.11	20.38	21.66	28.79
ZnL	-	00.00	-	-	-
NaK	-	00.36	-	-	-
MgK	-	01.13	0.68	01.50	00.84
MoL	-	01.00	-	-	-
KK	-	02.82	-	-	-
HgM	-	-	0.08	00.00	00.18
AgL	-	-	-	00.24	-
ZnL	-	-	-	00.44	00.44

Dans chaque type de sédiments, il est enregistré l'existence des niveaux des éléments métalliques comme le Co-Fe-Ni-Ag-Cd. La distribution des particules dans chaque échantillon montre qu'il ya une origine de l'apport des métaux traces en diffusion qui proviennent soit des rejets ou plus ou moins libérés de boues. Pour plus de simplicité, les métaux lourds dans les boues sont ceux visés, qui ont pu s'accumulés pendant un certain temps.

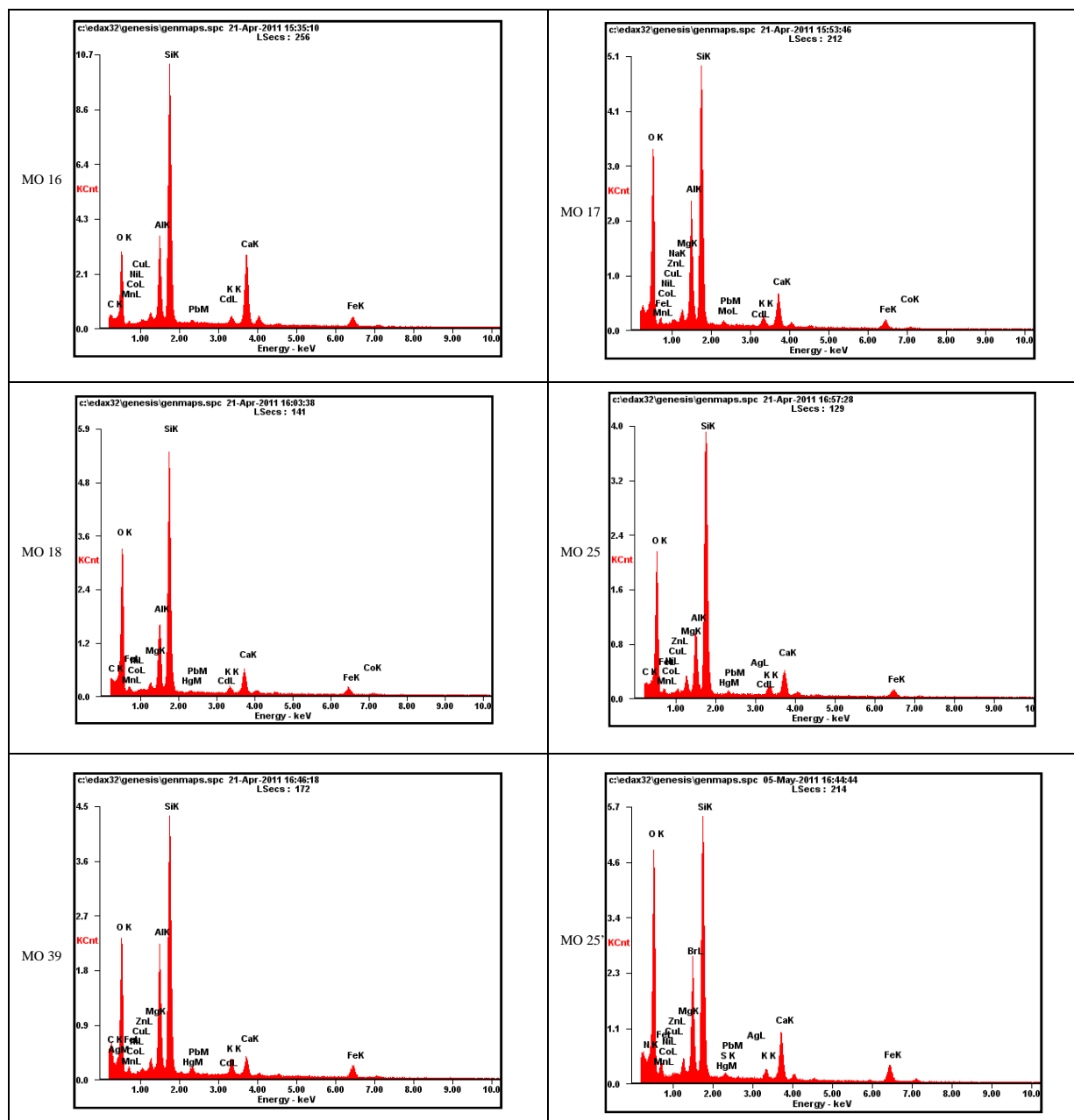


Figure 78. Étude par le M.E.B des teneurs Atomiques et Massiques.

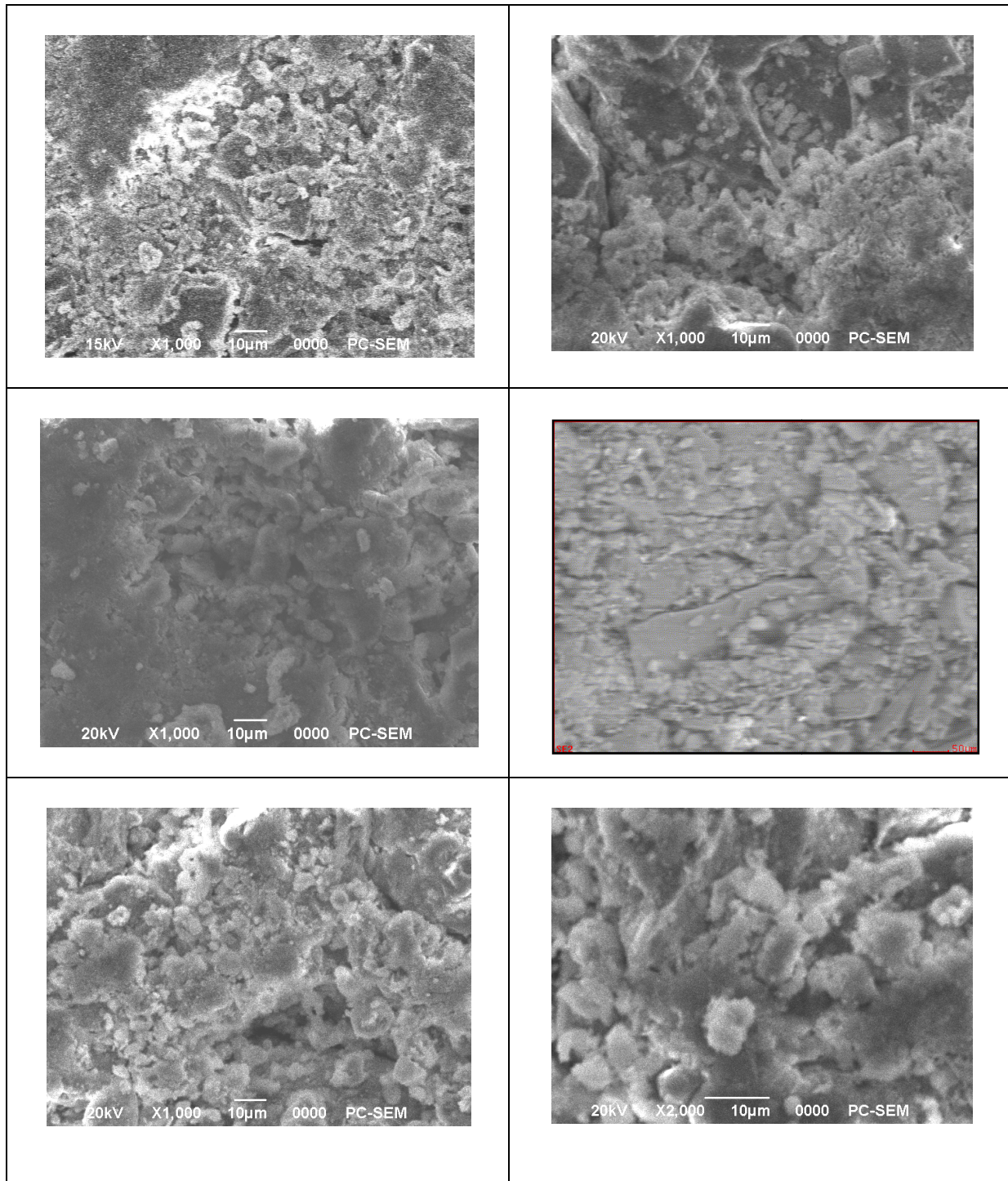


Figure 79. Photos des sédiments par le M.E.B.

VIII. Méthode d'extraction des ETM :

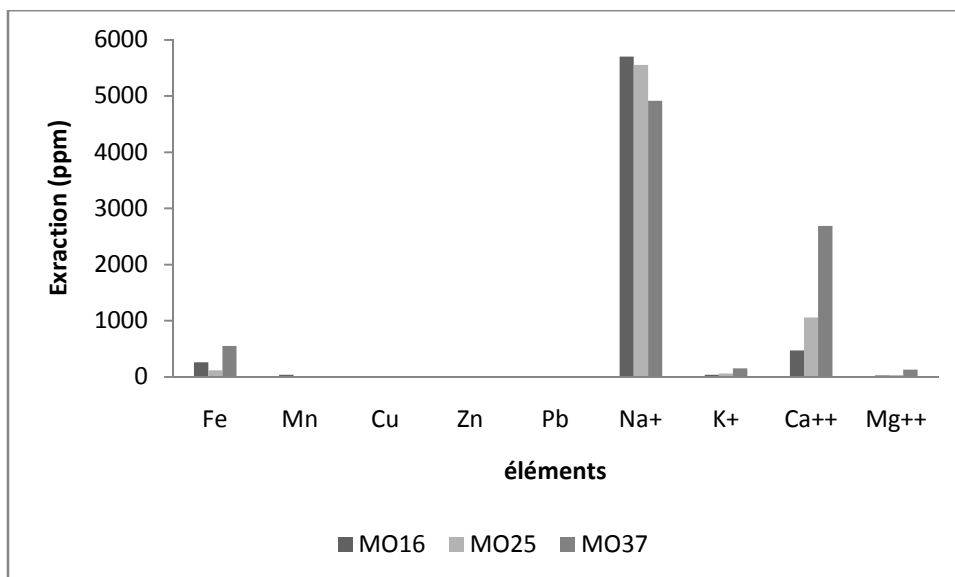
La troisième méthode est une combinaison de deux techniques d'extraction. C'est une minéralisation par calcination à 450°C en présence de nitrates d'ammonium, suivie d'une solubilisation des métaux par deux acides oxydants. L'acide nitrique (NO₃) et l'acide chlorhydrique (HCl).

Les techniques analytiques quantitatives appliquées aux échantillons de sol sont très diverses et variées. Cependant; avant l'analyse proprement dite, les éléments traces métalliques (ETM) doivent être extraits de leur trame organique pour être dissous dans un liquide tels que l'eau déminéralisée, et/ou différents acides (acide nitrique, acide chlorhydrique).

Entre trois méthodes (techniques) d'extraction des éléments traces métalliques; on a choisis celle qui est la plus reproductible qui sera appliquée aux échantillons de l'oued Meboudja, elle consiste en :

- Extraction qui combine une calcination sèche à 450°C, pendant deux heures suivie d'une mise en solution avec un acide dilué HCl 1N. (Voir référence*).

Les dosages du Fer (T) ; manganèse, du zinc, du plomb, du nickel, du chrome, du cuivre, et du cadmium sont effectués par spectrophotométrie d'absorption atomique à flamme (Perkin Elmer Analyst 3110).elle est en général, la technique analytique la plus utilisé par les laboratoires pour déterminer et quantifier de faibles teneurs en éléments traces métalliques (ETM).



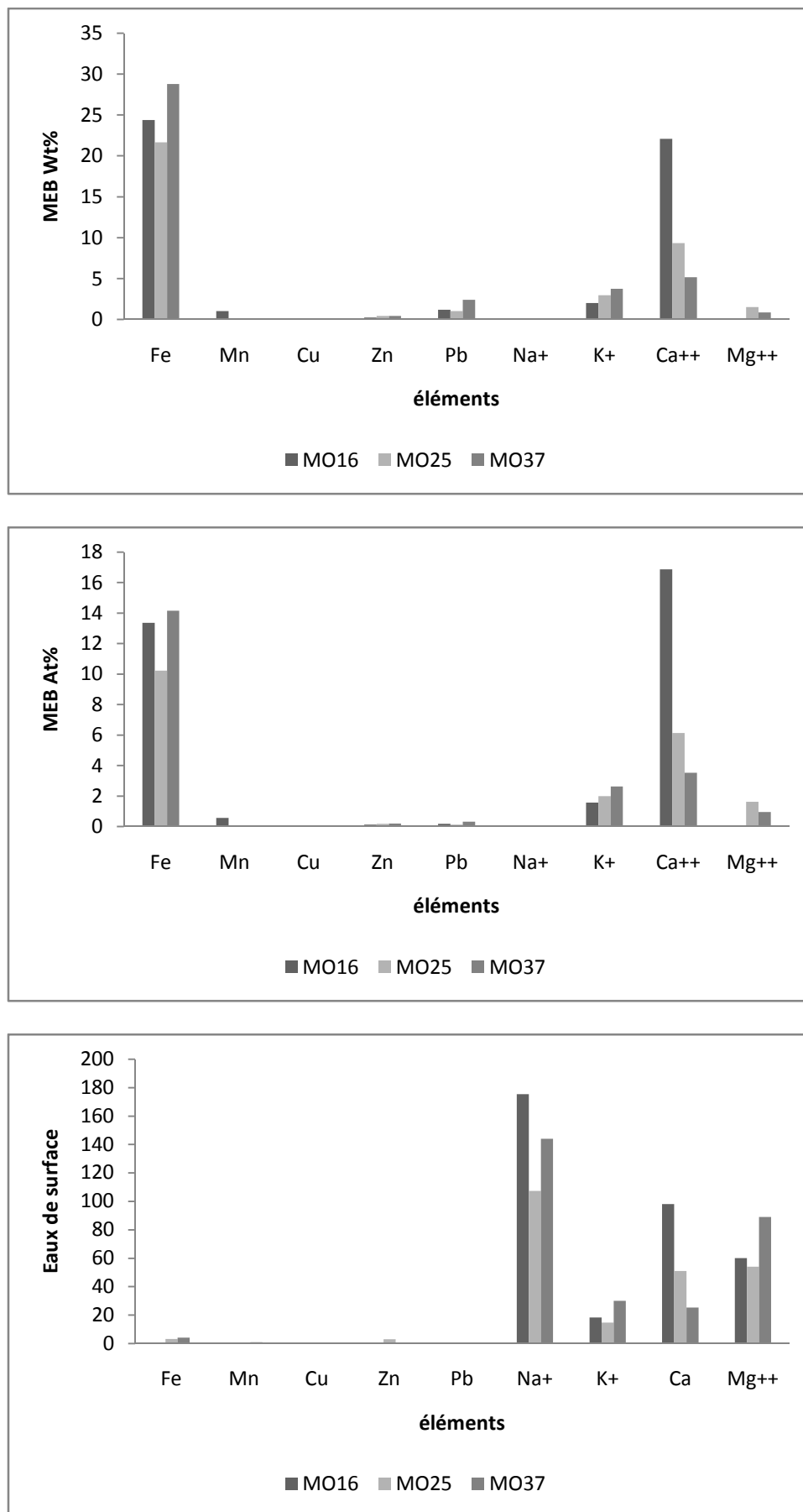


Figure 80. Comparaison entre différentes méthodes des échantillons MO.16.17.18 et des Eaux de surfaces.

Les résultats obtenus par les différentes techniques montrent qu'au niveau de l'oued Meboudja des fluctuations dans les teneurs des éléments majeurs comme (Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+) dont les valeurs sont respectivement : (0%, 5%, 20%, et 2%) donnés par le MEB, cette dernière a démontré l'existence des concentrations significatives en ETM par rapport au fond géochimique, ces résultats montrent que les rejets sont quantitativement plus significatifs au niveau de l'oued de Meboudja qui sont piégés dans les sédiments.

IX. Le pH-Eh :

C'est un paramètre qui nous permet de mesurer l'acidité, l'alcalinité ou la basicité d'une eau. (Gomella et Guerree, 1978 in Azzoug et Lamani, 2005).

La mesure du pH aura deux applications à considérer séparément : le suivi de la qualité des eaux, d'une part, et les études thermodynamiques des équilibres chimiques, d'autre part. La distinction majeure réside dans le niveau de justesse et de précision requis pour ces deux applications (Aminot et Kerouel, 2004).

En milieu côtier certains rejets industriels ou les apports d'eaux de ruissellement sont la cause de variation du pH qui s'avère être dans ce cas un indice de pollution, mais cette variation reste très localisée aussi bien dans le temps que dans l'espace et cela du fait du « pouvoir tampon » de l'eau de mer. (Aminot et Chaussepied ,1983).

Parmi les facteurs de solubilité du sol le pH ; le plus important est l'acidité du sol. En règle générale, un sol acide facilite la mobilisation. Un sol calcaire contribue à l'immobilisation de certains métaux (certains éléments réagissent différemment, notamment l'arsenic, plus mobile dans un sol calcaire). La maîtrise de l'acidité (mesurée par le pH) est un élément de contrôle de la mobilité des éléments traces métalliques.

Tableau.39- pH – Eh des sédiments

Echantillons N°	pH	Eh (mV)
16	9.28	-111
17	8.33	-46
18	8.82	-100
25	9.23	-106
39	8.86	-88
Compagne N° 01		
Nb 16	8.63	-74
Nb17	8.80	-87
Nb 18	8.25	-50
Nb 25(1)	8.61	-73
Nb 25 (2)	8.94	-91
Nb39	8.51	-66
Compagne N° 02		

Conclusion:

La composition chimique des sédiments prélevés doit être défini et situé en termes de contribution par rapport à l'arrière-plan géochimique, mais aussi par rapport à existant sur l'application de matériaux susceptibles de contenir des concentrations de métaux lourds.

Les conditions environnementales susceptibles d'être dissous éléments peuvent être toxiques par leur nature et leur concentration, si le métal est soluble, il va passer dans les eaux souterraines et / ou la plante; et il est insoluble, il restera dans le sol. Il doit être analysé en utilisant des expériences pour minimiser les risques.

Les techniques analytiques quantitatives appliquées aux échantillons de sédiments sont la DRX le MEB et l'extraction par les acides. Cependant; avant l'analyse proprement dite, les éléments traces métalliques (ETM) doivent être extraits de leur trame organique pour être dissous. Ces trois méthodes (techniques) ont déterminé l'existence des éléments traces métalliques; dans le lit de l'oued Meboudja, et la présence d'argile ou d'oxydes de fer et de manganèse va jouer le rôle de piège pour les contaminants métalliques.

Chapitre I : Etude des concentrations, des métaux lourds dans les sédiments

Références bibliographiques

- American public health association, american water works association and water pollution control federation, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater : 4500-P Phosphorus, and 4500-PI In-line UV/Persulfate digestion and flow injection analysis for total phosphorus, 21st Edition, 2005.
- Beauchamp (J.) - La pollution littorale. D.E.S.S. Qualité et Gestion de l'Eau, Univ. Picardie Jules Verne 2003. <http://www.upicardie.fr/beauchamp/cours.qge/pol-litt/pol-litt.htm>
- Bliefert (C.), Perraud (R.) - Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets. Paris, Bruxelles : De Boeck Univ., 2001, XVIII, 477 p.
- Boughriet, A., B. Ouddane, M. Wartel, C. Lalou, C. Cordier, L. Gengembre, and J.P. Sanchez (1996). *Con the oxidation of Mn and Fe in pollymetallic oxyde /oxyhydroxide crusts from Atlantic Ocean*. Deep-Sea research I, Vol.43, N°3, pp321-343, 1996. Elsevier Science Ltd.
- Caplat. C., 2001, Caractérisation géochimique de sédiments fins du littoral du Calvados (Baie de Seine) – Comparaison de matériaux portuaires contaminés à des matériaux non contaminés de la baie des Veys, Université de Caen, Th.Univ. Sciences de la Terre et de l'Univers, 182p.
- Charlatchka R., and P. Cambier. Influence of reducing conditions on solubility of trace metals in contaminated soils. submitted to Water, Air, and Soil Pollut., 1998
- Chiffolleau J.C. (coord), 2001, La contamination métallique, IFREMER, Région Haute Normandie, (Programme scientifique Seine- Aval), 8, 39p.
- El Mostafa Hassoune, Effets des rejets liquides domestiques et industriels sur la qualité des eaux souterraines au nord de la ville de Settat (Maroc), Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Vie, 2006, n°28, 61-71.
- F-Z Afri-Mehennaoui *et al*, Comparaison de trois techniques d'extraction pour la détermination des éléments traces métalliques dans les sédiments de l'oued Rhumel et son affluent l'oued Boumerzoug en zone urbaine, Science et technologie C- N° 21 juin (2004). Pp 20-38
- *Grumiaux. F, *et al* ; Teneurs métalliques et organiques dans les sédiments et effet sur la communauté benthique dans deux cours d'eau représentatifs de la région pas de Calais. Third international conference on the biochemistry of trace elements. R PROST Ed; INRA Paris (1997)
- Guasmi, I ; 2006 ; pollution des eaux de l'oued Medjerda par les nutriments. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n. 05, Juin 2006, pp.113-119 2006 Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface Larhyss/Journal
- KELLY, M. G., AND B. A. WHITTON. 1995. The trophic diatom index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of Applied Phycology* 7:433–444.
- Maas , S., R. Scheifler , M. Benslama, N. Crini , E. Lucot , Z. Brahmia , S. Benyacoub , and P. Giraudoux (2010). Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria. *Environmental Pollution Journal* , Elsevier Science Ltd.
- Novak *et al*, 1996, Measuring and analyzing urban tree cover 0169-2046/15.00 Published by Elsevier Science B.V. PII SO1 69-2046(96)00324-6
- Ouddane, B., E. Martin, A. Boughriet, J.C. Ficher, and M. Wartel (1997). Speciation of dissolved and particulate manganese in the Seine river estuary. *Marine chemistry*. Elsevier.
- Site : <http://www.lenntech.fr/data-perio/cr.htm#ixzz0eNBoM7WF>
- Pedro (G.), 1968. - Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. *Revue Géog. Phys. Géol. Dyn.* X, p. 457-470.
- T.H.Debièche ; 2005. Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle [Microforme] : application à la basse plaine de la Seybouse Nord-Est algérien
- Tomas François. Les mines et la région d'Annaba. In: *Revue de géographie de Lyon*. Vol. 45 n°1, 1970. pp. 31-59.
- U.S. Environmental Protection Agency. Health effects assessment for boron and compounds. Environmental Criteria and Assessment Office (1987).

Conclusion générale & recommandation

La ville de Annaba est constituée d'une vaste plaine bordée au Sud et à l'Ouest, d'un massif montagneux au Nord, et par la mer à l'Est. Sa topographie en forme de cuvette favorise la stagnation de l'air et la formation d'inversions de températures. La région d'étude qui fait partie de l'ensemble géologique du Tell Algérien Nord Oriental, présente des affleurements de terrains métamorphiques, des roches éruptives et des terrains sédimentaires qui bordent la plaine de Annaba. Le système aquifère d'Annaba est constitué de formations du Mio-plio Quaternaire comblant une zone d'effondrement.

Les principales sources génératrices de pollution et de nuisances sont les grands complexes industriels, décharges sauvages, activités immanentes aux transports, activités agricoles consommatrices d'engrais et de pesticides, et enfin l'assainissement (*H. Mebirouk ; 2007*).

Depuis quatre décennies, la mutation socio-économique de cette région a engendré un véritable bouleversement des groupements paysagers aussi bien dans leur nature que dans leur vocation. Ils comprennent : le tissu industriel comprenant plusieurs unités source d'une pollution multiforme (*D.Fadel & al, 2009*) ;

On peut dire que la région d'étude est parmi les régions les plus pluvieuses en Algérie. La plaine de Annaba est soumise à un climat méditerranéen caractérisé par deux saisons d'inégale durée:

Une froide à précipitations dominantes (122.58 mm en Décembre) et à basse température (11.1°C en Janvier).

Une autre chaude à précipitations ne dépassant pas 2.5 mm en Juillet, à haute température (25,84 °c en Août) (Station les Salines).

Le bilan hydrique de Thornthwaite a montré pour une ETR (481.4 mm) (Station Les Salines) il relève également que le déficit agricole commence au mois de Juin et se poursuit jusqu'au mois de Octobre. Par ailleurs, la reconstitution de la RFU débute en Novembre, et demeure jusqu'à la fin du mois de Mai où nous assistons à un épuisement du stock.

L'étude de l'évolution du niveau piézométrique nous a permis de mettre en évidence la relation qui existe entre l'oued et la nappe témoignant ainsi du drainage de La nappe par l'oued dans le secteur amont (région de Sidi amar) et le cas contraire dans le secteur par période.

L'étude hydrochimique réalisée nous a permis d'appréhender l'origine naturelle, industrielle, agricole ou urbaine du chimisme des eaux de surface et des eaux souterraines de la région d'étude.

Ainsi, la nappe superficielle est affectée par plusieurs processus de minéralisation et de pollution :

- le processus naturel est dû au lessivage des formations géologiques qui se traduit par une forte salinité.
- la pollution industrielle se traduit par la présence du Chrome, Plomb, Cuivre, Fer et Zinc qui sont rejetés par les différentes unités industrielles présentes dans les zones industrielles de Meboudja et de Pont Bouchet et surtout le complexe sidérurgique Arcelor Mittal steel.
- la pollution urbaine est mise en évidence grâce à la présence du PO_4 et NO_2 à des fortes concentrations.

Les eaux superficielles sont également affectées par différents types de pollution : industrielle, urbaine et agricole du fait qu'elles constituent le premier récepteur des différents rejets. Cette contamination est marquée par les fortes teneurs en Fer, Chrome, Phosphates, Nitrites, Matières en suspension...etc.

L'utilisation des résultats du modèle mathématique Modflow. On constate en effet que la nappe peut à la fois alimenter l'oued dans le site étudié comme elle peut être drainée par le cours d'eau.

Cette constatation est importante car elle démontre que la charge polluante contenue dans le cours d'eau peut se retrouver dans certaines conditions dans les puits et forages destinés essentiellement pour alimenter le bétail.

La composition chimique des sédiments prélevés doit être défini et situé en termes de contribution par rapport à l'arrière-plan géochimique, mais aussi par rapport à l'existence sur l'application de matériaux susceptibles de contenir des concentrations de métaux lourds.

Les conditions environnementales susceptibles de dissoudre les éléments peuvent être toxiques par leur nature et leur concentration, si le métal est soluble, il va passer dans les eaux souterraines et / ou la plante; et il est insoluble, il restera piégé. Il doit être analysé en utilisant des expériences pour minimiser les risques.

L'affinité de quelques éléments traces peut être expliquée par association avec des éléments majeurs (sous certaines conditions, en particulier le pH du sol). Ainsi Cd^{2+} a un comportement

proche de Ca^{2+} . Ce qui en fait un des éléments en traces les plus mobiles (catégories A). Au contraire Cr^{3+} exhibe un comportement proche de Al^{3+} ou Fe^{3+} . Sa mobilité est donc réduite sauf en conditions complexantes ou réductrices (catégorie C). la plupart des autres éléments en traces (Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+}) se rapprochent de Mg^{2+} , ou Fe^{2+} et sont donc dotés d'une plus grande mobilité en milieu peu acide (catégorie B).

RECOMMANDATION

La qualité des eaux souterraines et superficielles ne cessent à se dégrader. Pour cette raison des mesures urgentes doivent être prises :

Pour les eaux

- L'amélioration du réseau d'assainissement des eaux usées domestiques et des rejets industriels.

- La diminution des sources de pollutions diffuses d'origine agricole.

L'instauration de périmètres de protection autour des captages permettant de mieux protéger les nappes et les sources d'eau destinées à la consommation humaine des pollutions diffuses.

- La sensibilisation des utilisateurs de l'eau à modérer leur consommation et à moins polluer : des taxes fondées sur le principe du "pollueur-payeur" ont été instituées et doivent être appliquées. Ce sont des taxes sur les prélèvements et les redevances de pollution.

- Le contrôle sur le terrain des travaux, des activités susceptibles de porter atteinte, par des prélèvements ou des rejets dans les milieux aquatiques, à l'équilibre de la gestion de la ressource en eau. C'est une des missions de la police des eaux.

- L'aménagement des terrains et des lieux de stockage des métaux pour qu'ils ne contribuent pas à la libération des ions métalliques (Fe^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , ...) lors de leur oxydation (7% des entreprises exercent cette activité).

ANNEXES

Évaluation du risque pour l'environnement des métaux lourds [Fe(T)-Mn⁺²] issus du milieu Industriel : cas de la plaine de la Meboudja, Nord-Est Algérien

Nabil BOUGHERIRA* et Azzedine HANI

*Faculté des Sciences de la Terre, Département de Géologie, Université de Annaba,
BP 12, 23000 Annaba, Algérie*

* Correspondance, courriel : nabilbough@gmail.com

Résumé

L'Algérie a mis en place un réseau industriel dense, concentrant des secteurs polluants et gros consommateurs d'eau et d'énergie. Ce tissu industriel a été implanté à proximité des sources d'eau (barrages, mer), ou des fleuves qui sont devenus des décharges pour des rejets liquides non contrôlés. La Meboudja est un des oueds les plus anthropisés de la plaine d'El Hadjar qui abrite une des plus fortes densités industrielles, agricoles et urbaines (localité d'Hjar diss, Derradji Rdjam ; El Hadjar ; et Sidi Amar). Des concentrations excessives de métaux lourds peuvent être introduites dans l'environnement, par exemple, par les déchets industriels (complexe sidérurgique d'El Hadjar, la zone industrielle de Meboudja et la zone industrielle de pont Bouchet).

Les apports en fer et en manganèse dans les eaux superficielles et souterraines de la plaine de Meboudja sont très variables en quantité mais aussi en qualité. Des teneurs élevées en fer « dissous » de 26.30 mg.l⁻¹ et en Manganèse dissous, 3.40mg.l⁻¹, ont été observées dans les eaux de l'oued Meboudja [1]. Ces teneurs ne peuvent être expliqués que par des émissions intenses en provenance des différents rejets situés dans la plaine.

Mots-clés : *métaux lourds, rejet liquide, déchets industriels, pollution, environnement, oued Meboudja, Nord-Est algérien*

Abstract

Evaluation of environmental risk of heavy metals [Fe (T)-Mn^{2 +}] from the industry: Case of plain Meboudja, North-eastern Algeria

Algeria has established a dense industrial network, focusing polluting sectors and major consumers of water and energy. This industrial base was established near water sources (dams, sea), or rivers have become dumping grounds for waste liquids uncontrolled. The Meboudja is one of the most rivers polluted by man of the plain of el Hajar: it houses one of the highest densities industrial, agricultural and urban (city of Hjar Diss, Derradji Rdjam; El Hajar, and Sidi Amar). Excessive levels of heavy metals may be introduced into the environment, for example, industrial waste (steel complex el Hajar, the industrial zone Meboudja, and the industrial area of bridge Bouchet).

The contributions of iron and manganese in surface water and groundwater in the plain Meboudja are very variable in quantity but also quality. Elevated levels of iron "dissolved" [a max 26.30mg.l⁻¹], is indeed what

is observed: increasing levels of dissolved manganese [3.40mg.l^{-1}] in the waters of the region [1] can be explained by emission intensity from different releases.

Keywords : *heavy metals, waste liquids, industrial waste, pollution, environment, most rivers Meboudja, North-eastern Algeria*

1. Introduction

Depuis plusieurs années déjà, les villes se caractérisent par un développement industriel à proximité des grandes agglomérations, une hausse du trafic automobile et une croissance démographique intense. Parallèlement à ce développement, la production des déchets divers (industriels ou ménagers), les rejets dans le milieu naturel ont vu leurs quantités augmenté et leurs qualités se dégradées provoquant des problèmes sanitaires et environnementaux préoccupants.

La surveillance de la pollution des eaux de surface et souterraine par les métaux lourds dans la plaine de la Meboudja, a commencé en 1999 [1] et s'est poursuivie en 2005 et en 2006 par une étude sur la caractérisation de la pollution des eaux en milieu industriel et urbain de la plaine d'El-Hadjar, réputée comme étant le pôle industriel le plus grand et le plus diversifié d'Afrique [2].

Le fer a été retrouvé à l'aval des points de rejets issus de l'usine Arcelor Métal et de différentes industries en saison sèche 1999 (26.30 mg.l^{-1}), une concentration supérieure à la limite de rejet (3.00 mg.l^{-1}) et la contamination par le fer avec 6.28 mg.l^{-1} pour l'année de 2005.

La contamination par le manganèse des eaux superficielles, semble s'aggraver aussi à l'aval du site, elle a été retrouvée en saison sèche 1999 (3.4 mg.l^{-1}) et en Octobre 2006 (1.00mg.l^{-1}). L'eau souterraine indique une concentration égale à la limite de rejet (1 mg.l^{-1}) pour le mois de Décembre 2006 (Mp29).

Les autres points de la plaine de l'Oued Meboudja présentent des teneurs en métaux lourds très variables. Ce travail représente le prolongement des travaux de thèses de Débièche [1,3,4].

2. Matériel et méthodes

2-1. Site étudié

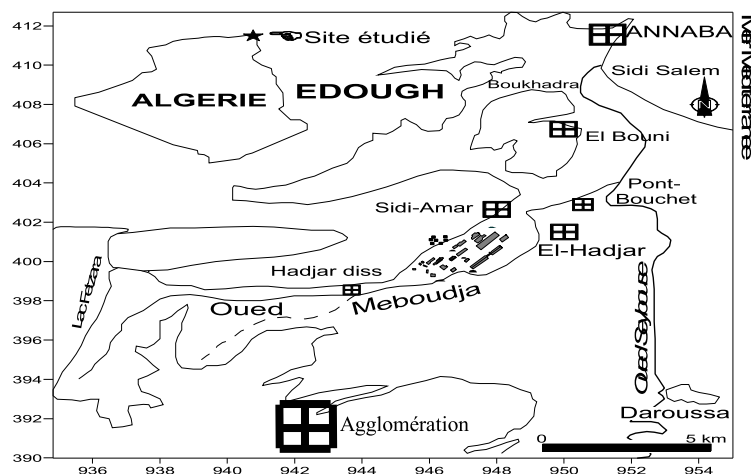


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude [6]

2-2. Méthodologie

Pour évaluer les concentrations en éléments traces métalliques (ETM) dans les eaux de l’oued Meboudja (représentées en 3 points) et sur 9 puits, on a effectué un suivi de l’évolution temporelle des ions chimiques, Fer (T) et Mn^{2+} , durant les années 1999, 2005, 2006, et 2007 (Janvier à Février).

Les paramètres physicochimiques, conductivité, température, pH et E_H , ont été mesurés sur le site à l’aide d’un conductivimètre type HANNA instruments Hi 8633 et un pH-mètre de marque Mettler Toledo MP 120.

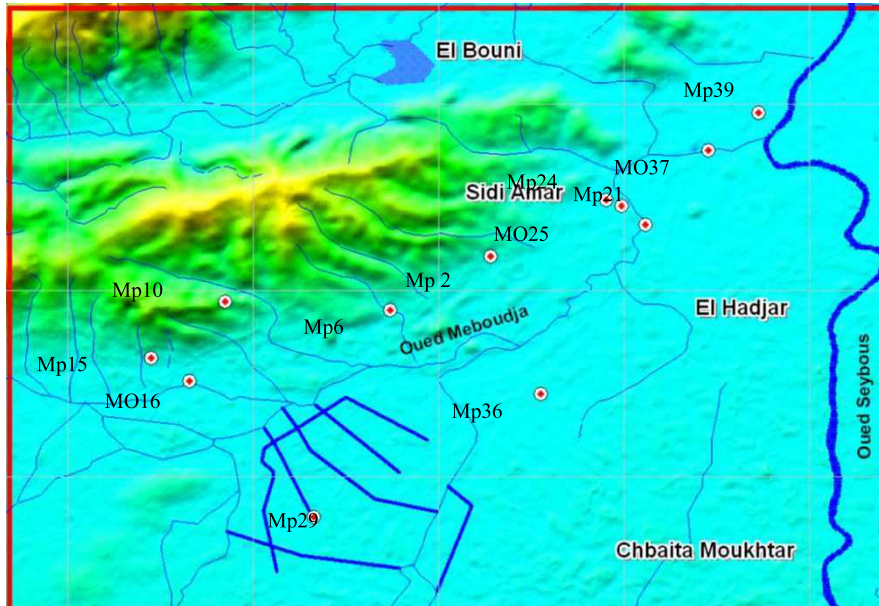


Figure 2 : Carte d’inventaire des points d’eau de la zone d’étude.

Douze campagnes d’échantillonnage ont été menées au cours de deux années consécutives, 2006 et 2007. L’eau de surface a été échantillonnée en différents sites couvrant une distance d’environ 8 km en amont (El Karma) de la ville d’El Hadjar, soit le point MO37 le point majeur de l’Oued Meboudja collectant les différents rejets (industriels et urbains) (**Figure 2**).

Des échantillons d’eau de référence ont aussi été prélevés à la station (MO16) située à 3 km en amont du point de rejet industriel afin d’identifier les conditions initiales des eaux réceptrices. Les échantillons d’eau de surface ont été prélevés à l’aide d’un tube préleveur en plastique d’un mètre de longueur attaché à un décimètre gradué.

3. Résultats

3-1. Statistiques élémentaires

Les résultats des analyses des métaux en traces particuliers et dissous au niveau de l’oued Meboudja, montrent que la variabilité temporelle et spatiale du Fer (Fer T) et du Manganèse (Mn^{2+}) présentent un caractère polluant et qui se manifeste par des concentrations très élevées atteignant 9.9 mg.L^{-1} pour le fer et 2.52 mg.L^{-1} pour le Manganèse.

Le suivi de ces deux éléments durant les campagnes de 1999, 2005 et 2006 permet d'élaborer les **Tableaux 1 et 2** des statistiques élémentaires.

Tableau 1 : Valeurs maximales, minimales, médianes et moyennes arithmétiques des teneurs en Fer (T) de 1999 à 2005, et 2006.

Fer T (mg.L ⁻¹)	Mp2	Mp6	Mp10	Mp15	MO16	Mp21	Mp24	MO25	Mp29	Mp36	MO37	Mp39
Moyenne	0,145	0,184	0,347	0,100	0,493	0,130	0,181	<u>3,082</u>	0,233	0,261	<u>3,971</u>	0,194
Max	0,286	0,296	0,835	0,100	1,170	0,256	0,652	15,600	0,500	0,700	26,300	0,407
Min	0,004	0,037	0,100	0,100	0,030	-	-	0,026	0,029	0,012	0,052	0,019
Écart type	Écart type	0,050	-	-	0,007	0,352	0,005	0,021	0,309	0,436	0,000	1,448

Tableau 2 : Valeurs maximales, minimales, médianes et moyennes arithmétiques des teneurs du Mn (T) de 1999 à 2005 et 2006.

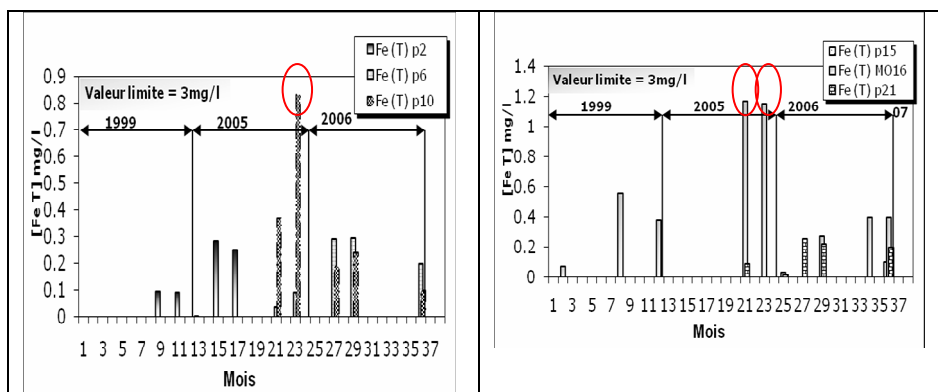
Mn (mg.L ⁻¹)	Mp2	Mp6	Mp10	Mp15	MO16	Mp21	Mp24	MO25	Mp29	Mp36	MO37	Mp39
Moyenne	0,025	-	-	0,005	0,323	0,003	0,015	0,379	0,354	0,100	0,816	0,133
Max	0,100	0,030	0,080	0,010	1,040	0,010	0,030	1,000	1,000	0,100	3,400	0,400
Min	0,004	0,037	-	-	0,020	-	-	0,060	-	0,100	0,050	-
Ecart type	0,050	-	-	0,007	0,352	0,005	0,021	0,309	0,436	0,000	1,448	0,231

Le **Tableau 1** montre de grandes valeurs de fer (T) avec un maximum de plus 26 mg.L⁻¹ pour le point 37 et supérieur à 3 mg.L⁻¹ pour le point 25 de l'Oued Meboudja. Les autres valeurs des eaux souterraines sont données dans le **Tableau 1**. Les statistiques élémentaires obtenus des analyses chimiques du Mn²⁺ des eaux superficielles et souterraines sont représentés dans le **Tableau 2**.

3-2. Évolution Temporelle

Les caractéristiques physico-chimiques influencent la spéciation des métaux tant particuliers que dissous et, par conséquent, leur biodisponibilité et leur toxicité [7-9]. La **Figure 3** permet de comparer les diagrammes d'évolution des teneurs en ETM.

La distribution des tailles des métaux traces est donc une caractéristique complémentaire de leur spéciation chimique et est importante pour comprendre leur devenir environnemental et leurs impacts sur les organismes aquatiques [10-12].



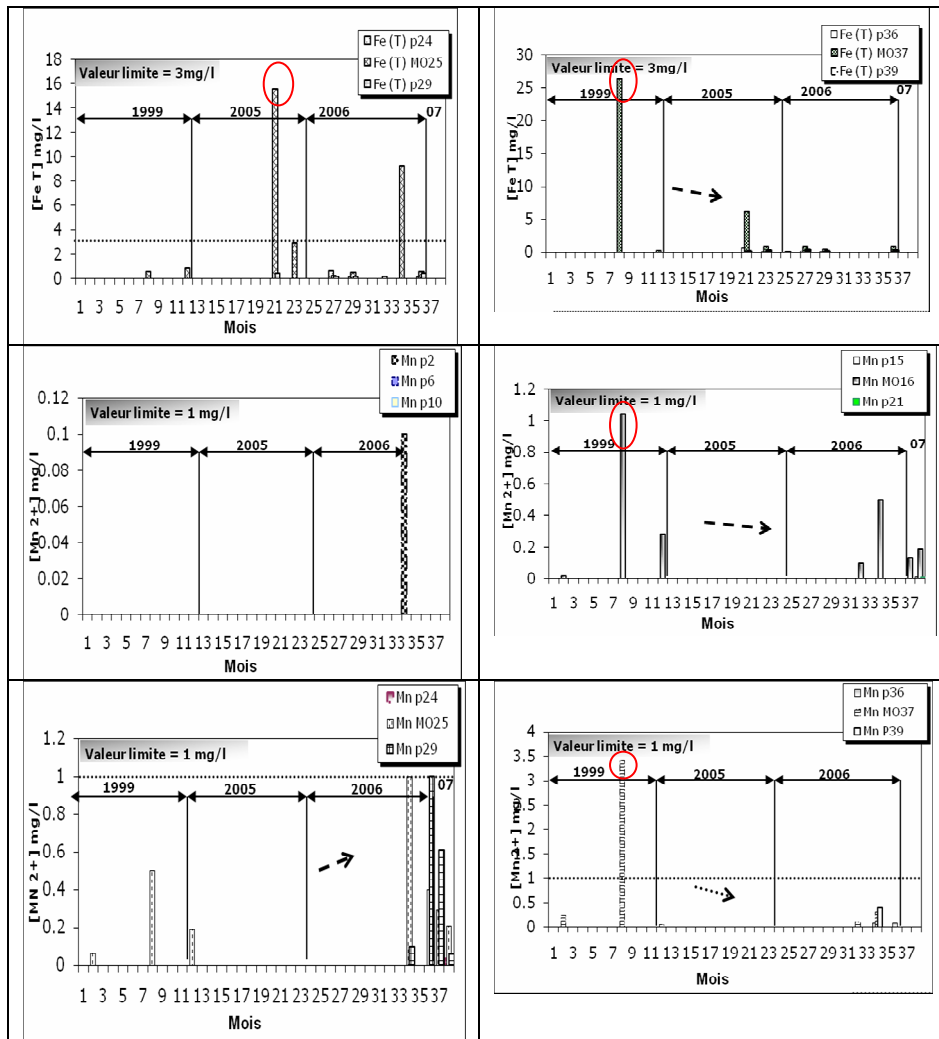


Figure 3 : Évolution temporelle des métaux en traces (Fer T et Mn²⁺).

3-2-1. Évolution temporelle du fer (T)

La présence de fer dans l'eau peut avoir diverses origines [1]:

- naturelle par le lessivage des terrains argileux,
- industrielle (métallurgiques, sidérurgiques).

Selon les diagrammes temporels des teneurs en fer pour la période 1999 à 2007, nous constaterons de faibles teneurs au niveau des eaux souterraines de la nappe superficielle qui restent globalement inférieures à la valeur limite des rejets. Il s'agit des points 2, 6, 10, 29, 15, 21, 39 et l'amont de l'oued Meboudja représenté par le point MO16. Cependant, la contamination par le fer est très élevée dépassant de loin la valeur limite, elles sont respectivement de 15.6 mg/l en septembre 2005 et 9.3 en octobre 2006 et 26.3 mg/l en Août 1999. Ces fortes valeurs sont observées notamment au niveau des points d'eau de l'Oued, MO 25 et MO 37, situés à l'aval. Pendant ces périodes les niveaux de l'oued et de la nappe se stabilisent avec apparition d'un régime d'étiage. L'amplitude des teneurs en fer au niveau de l'oued est beaucoup plus marquée que celle de la nappe, les faibles teneurs en fer sont expliquées par la dilution par les pluies hivernales.

3-2-2. Évolution temporelle du manganèse

Les concentrations en manganèse sont beaucoup plus élevées au niveau des eaux superficielles. Les figures montrent des valeurs égales à 1.04 mg/L (août 1999), 1 mg/L (octobre 2006) et même supérieures à la valeur limite de 3.4 mg/L (août 1999).

La présence du manganèse est liée à la métallurgie, l'industrie électrique et à l'industrie chimique. Sa présence dans l'eau de l'oued est liée aux rejets de l'usine sidérurgique [1].

En ce qui concerne les eaux souterraines, les fortes concentrations sont observées seulement au niveau du P29 avec 1mg/L (décembre 2006).

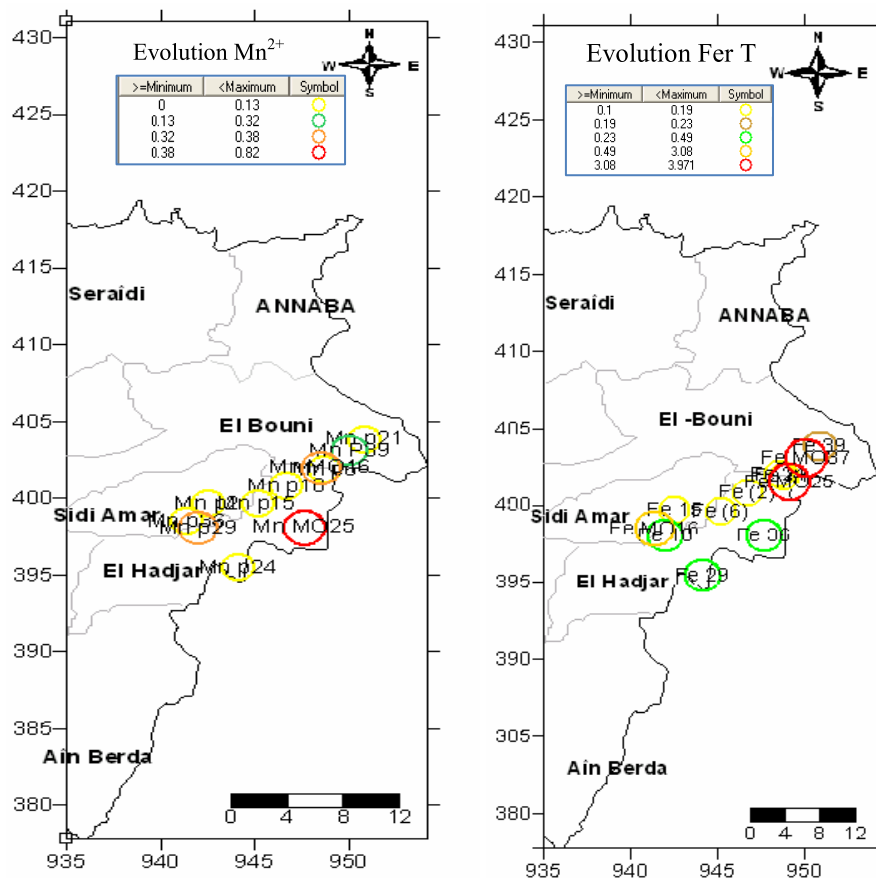


Figure 4 : Évolution spatiale moyenne des métaux en traces Fer T et Mn²⁺

4. Caractérisation hydrogéologique

Dans la zone d'étude (basse plaine de la Seybouse), la chimie des ressources en eau de surface et souterraines est souvent influencée par l'effet de la dissolution des formations géologiques et par les rejets industriels [1]. Nous allons essayer, dans ce travail, d'une part de faire le point sur la qualité des eaux et d'autre part d'identifier l'impact des rejets industriels et des agglomérations limitrophes sur les eaux superficielles et souterraines. Nous essayerons également d'identifier les interactions entre l'oued et la nappe et leurs rôles sur l'acquisition du contenu physico-chimique des eaux de la nappe.

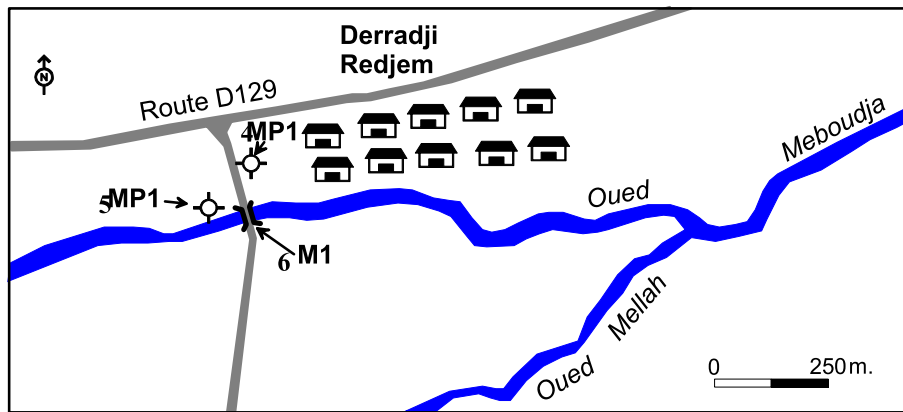


Figure 5 : Localisation des sites de prélèvement

Les évolutions des concentrations de ces ions chimiques ont été suivies de février 1999 à décembre 1999 et de janvier 2006 à décembre 2006 sur l'oued représenté par MO16 ou M1 et sur deux puits Mp14 ou Mp2 ; et Mp15 ou Mp1. Les graphes d'évolution des niveaux de l'oued et de la nappe ont été également reportés ainsi que les précipitations sur les **Figures 6 et 7**.

Nous constatons globalement une augmentation brutale des teneurs en fer, manganèse, Zinc et phosphate à partir du mois d'octobre consécutivement à une réalimentation de la nappe par l'oued et à un lessivage possible du sol.

Les teneurs en nitrates évoluent inversement au niveau piézométrique. Elles sont faibles pendant les périodes des hautes eaux (février et décembre) en raison de la dilution par les eaux de pluie et fortes pendant les périodes des basses eaux (juillet et août) sous l'action de l'évapotranspiration qui concentre ces ions.

Période n°1

Pendant la période des hautes eaux, les niveaux d'eau de la nappe et de l'oued sont élevés, suite aux fortes pluies du mois de janvier. L'écoulement est dirigé essentiellement de la nappe vers l'oued.

En 1999

Les eaux superficielles présentent de faibles teneurs en ammonium et en phosphates en raison de la dilution par l'infiltration des précipitations et de l'écoulement permanent de l'oued. Au niveau de la nappe, les teneurs en ammonium et en phosphate restent faibles. A l'opposé, les nitrates apparaissent avec des concentrations élevées de 34 à 83 mg.L⁻¹.

En 2006

Pour cette même période, on remarque que les eaux superficielles présentent ainsi qu'au niveau de l'oued, aussi de faibles teneurs en phosphates en raison de la dilution.

Période n°2 et n°3

L'évolution pendant la période des basses eaux est caractérisée par une diminution du niveau d'eau dans l'oued et dans la nappe avec le même sens d'écoulement (nappe vers oued) que précédemment.

En 1999

La chimie des eaux de l'oued présente une légère augmentation des teneurs en phosphate (1 et 7,4 mg.L⁻¹) et en ammonium (1,4 et 6 mg.L⁻¹), accompagnée par une augmentation du pH, des teneurs en nitrite, et en oxygène, pendant les mois de juillet et août, indiquant une oxydation de la forme ammonium.

L'apparition des conditions oxydantes dans l'eau induit le passage de la forme ammonium au nitrite, mais ce dernier n'atteint pas la forme des nitrates.

Au niveau de la nappe les teneurs en ammonium et en phosphate sont toujours faibles (0,1 à 0,3 mg.L⁻¹). Par contre les nitrates présentent une augmentation des teneurs, variant entre 60 et 110 mg.L⁻¹. Cette augmentation est liée au lessivage des terrains agricoles par les eaux d'irrigation.

En 2006

Les teneurs en phosphates sont plus fortes au niveau de l'oued avec 1.77 et 18.6 mg.L⁻¹.

Ces teneurs en phosphate restent faibles au niveau de la nappe, est oscillent entre 0.12 et 0.25 mg.L⁻¹ en raison de la dilution ; accompagnée par une augmentation du pH.

Période n°4

Le relèvement du niveau de l'oued au dessus de celui de nappe à partir du mois d'octobre a conduit à l'inversement du sens d'écoulement, l'oued alimente la nappe. Cette situation a eu pour conséquence une stagnation des eaux dans l'oued, une augmentation des apports en phosphate et en ammonium accompagnés par une augmentation de la turbidité de l'eau (due aux particules en suspension) sous l'effet de l'accumulation des rejets d'eaux usées.

En 1999

La chimie des eaux de l'oued se caractérise alors par une augmentation brutale de l'ammonium (28 à 54 mg.L⁻¹) et du phosphate (12,1 à 22,9 mg.L⁻¹) et une chute très significative des teneurs en oxygène (11,4 à 3,4 mg.L⁻¹), du pH (8,73 à 8,1) et en nitrite (1,716 à 0,132 mg.L⁻¹). Cette dernière peut s'expliquer par une augmentation de la population bactérienne, la consommation d'oxygène devient trop importante et son renouvellement n'est plus assuré par la photosynthèse ni par la diffusion de l'oxygène provenant de l'atmosphère dans l'eau [1].

Ces changements des conditions physico-chimiques ont produit une détérioration de certains types de végétaux [1] dans l'oued. La minéralisation de la matière organique des végétaux par les micro-organismes fait consommer l'oxygène et produire l'azote et le phosphate généralement sous la forme d'ions d'ammonium et d'orthophosphates, l'équation qui résume cette réaction est donnée ci-après :

Respiration



(Cette équation est basée sur la considération que la minéralisation de l'azote organique s'arrête aux sels ammoniacaux)

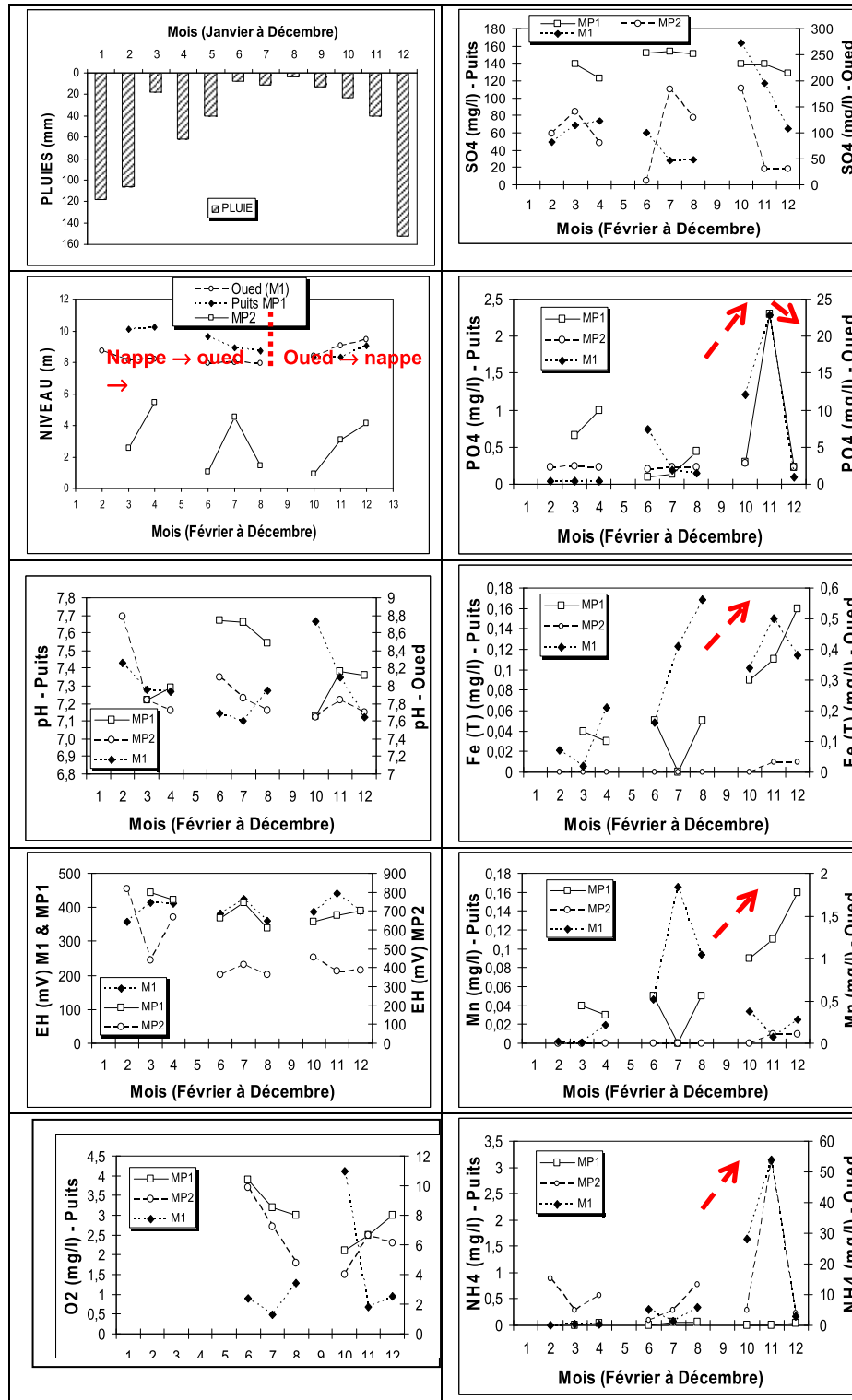
A partir de cette équation on constate que le phosphate et l'ammonium peuvent avoir une origine interne à la biomasse.

Cette évolution du contenu chimique des eaux de l'oued a entraîné un transit des eaux de l'oued vers la nappe et une contamination des deux puits par les ions phosphate, ammonium (au MP14 seulement), fer et manganèse qui montrent une hausse rapide des valeurs. L'importance des teneurs au niveau de puits MP14 par rapport au puits MP15 est due à l'effet du pompage au niveau du puits MP14 qui a créé un cône de dépression important et un appel des eaux superficielles vers le puits. A l'opposé, les nitrates (dans les deux puits) et les nitrites (au MP15) chutent brutalement.

Enfin, les fortes précipitations du mois de décembre ont provoqué une forte dilution et une réoxygénation du milieu (oued), ce qui a entraîné une baisse des teneurs en phosphate (0,91 mg.L⁻¹) et en ammonium (2,85 mg.L⁻¹) et une légère apparition des nitrates (4,1 mg.L⁻¹). La même réaction s'est produit au niveau de la plaine au mois de décembre, par une forte dilution des concentrations de l'ammonium (0 mg.L⁻¹), phosphate (0 mg.L⁻¹), nitrates (18 mg.L⁻¹)

En 2006

Les eaux de l'oued se caractérisent aussi par une augmentation brutale du phosphate ($1,77$ à $18,6 \text{ mg.L}^{-1}$) et des sulfates ($18,9$ à 61.54 mg.L^{-1}) et une chute très significative du pH ($8,28$ à 7.78) et en nitrite. La même constatation au niveau de l'Mp14, ou le phénomène de contamination en fer et en manganèse persiste, par effet du pompage. Les teneurs en phosphate baissent jusqu'à disparition au mois de décembre.



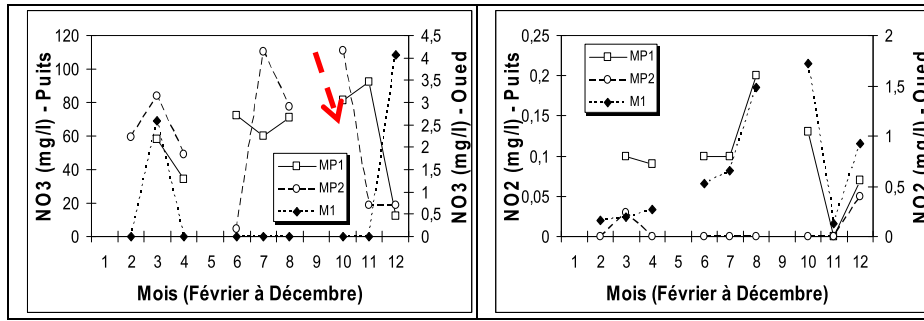
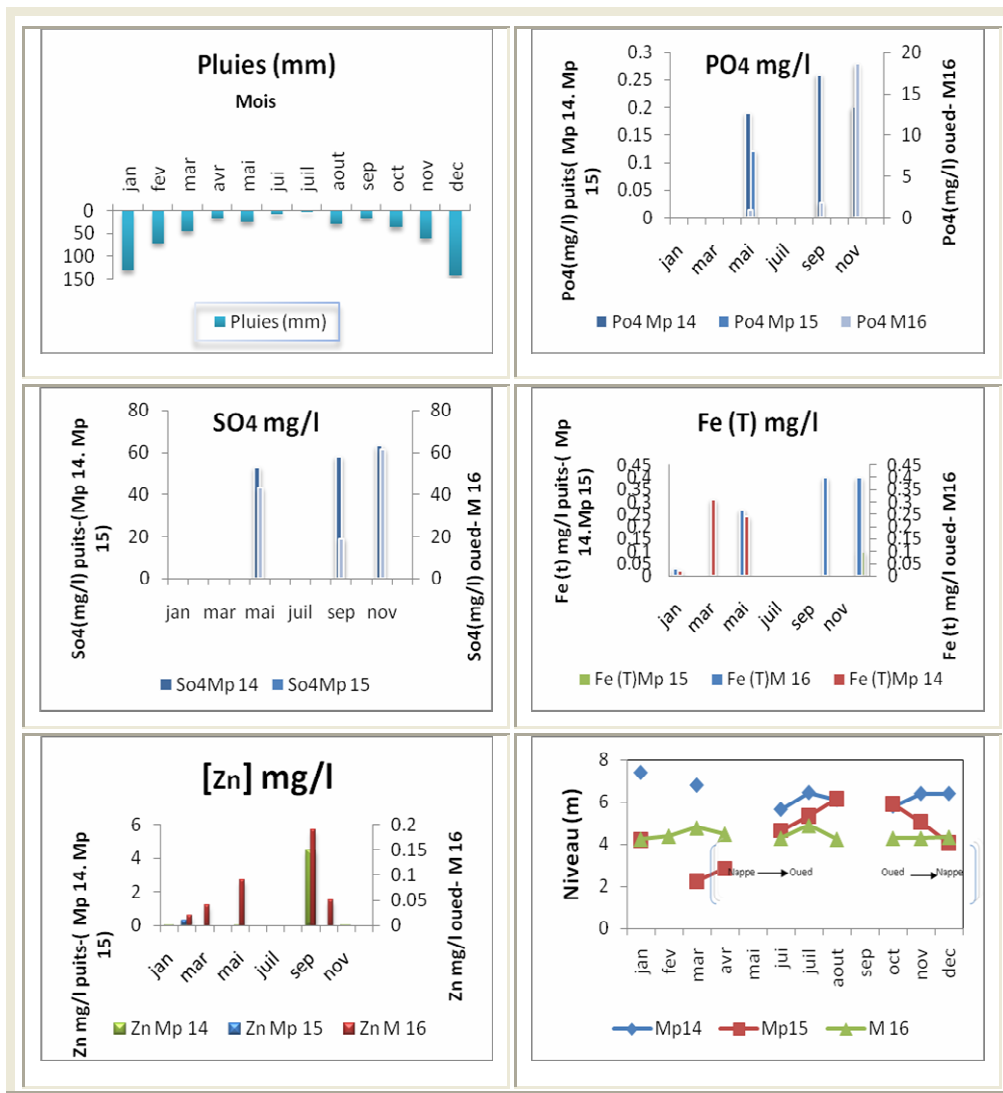


Figure 6 : Évolution des paramètres physico-chimiques dans les puits Mp14 (ou Mp2) et Mp15 (ou Mp1), situés à proximité de l'oued Meboudja M16 (ou M1) en 1999



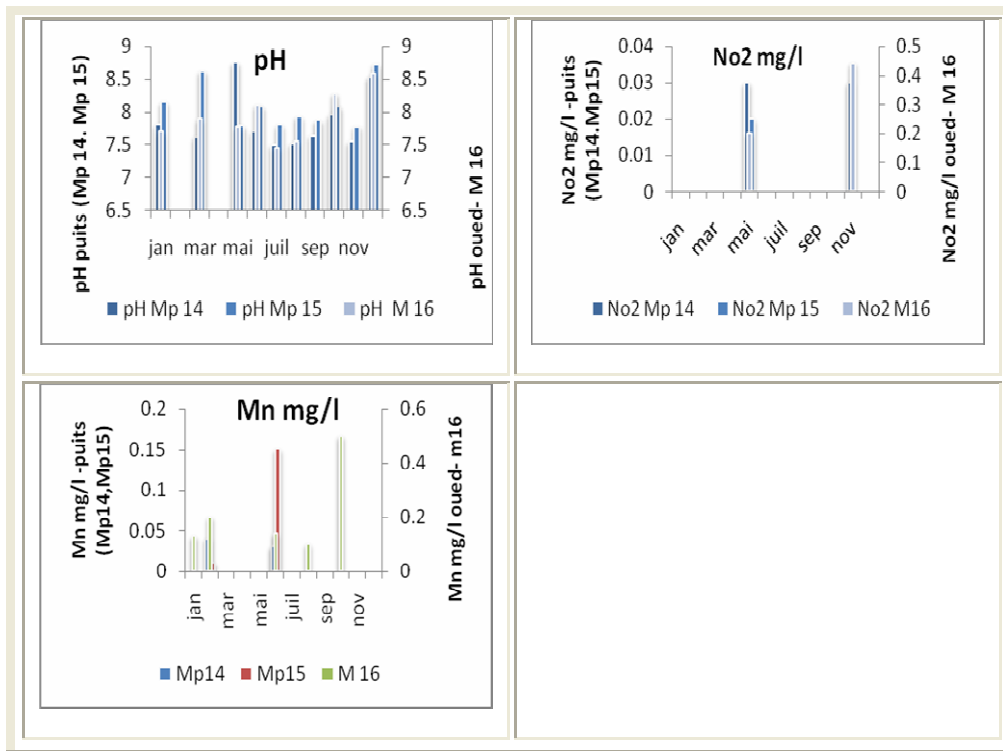


Figure 7 : Évolution des paramètres physico-chimiques dans les puits Mp14 et Mp15, situés à proximité de l'oued Meboudja M16 en 2006

5. Conclusion

L'eau constitue un élément fondamental en matière de pollution, puisque dans le cas des métaux, comme pour d'autres composants, celle-ci va favoriser de nombreuses réactions chimiques. L'eau de l'oued Meboudja contaminée par des éléments toxiques, transporte les métaux lourds, à un moment donné; elle converge et déverse dans l'oued Seybouse; ce dernier se débouche; plus au nord; vers la mer méditerranéenne, et les inserts dans les chaînes alimentaires (algues, poissons, etc.). Même si les métaux lourds sont le plus souvent présents à l'état de traces, ils n'en restent pas moins très dangereux, puisque leur toxicité se développe par bioaccumulation dans les organismes.

La contamination de l'environnement du site de l'oued Meboudja n'est pas uniquement liée au dépôt, mais provient en grande partie de l'environnement industriel. Une hypothèse alternative ne doit cependant pas être écartée. Elle consiste à prendre en considération le fait que l'oued se situe peut être, sur un dépôt fortement contaminé par les activités anciennes du complexe sidérurgique ; car avant 1985, l'usine a stockée, sans tri ni traitement, tous les sous-produits et déchets industriels liés à l'activité (laitier de haut fourneau rocheux et granulé, scories d'aciérie, déchets métalliques, déchets réfractaires, boues de laminoirs, mattes de zinc, déchets divers, etc.), mais aussi les ordures ménagères des cantines et des communes environnantes. Ce point serait à vérifier dans le cadre de nos recherches futures.

Références

- [1] - T. H. DEBIECHE, Évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse Nord-Est algérien. Th. Doct. Univ. de Franche-Comté, (2002) 199 p
- [2] - S. HAZOURLI, Caractérisation de la pollution des eaux résiduaires de la zone industrielle D'El-Hadjar, Annaba. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 06, Décembre (2007), pp. 45-55.
- [3] - W. HAMZAoui, Caractérisation de la pollution des eaux en milieu industriel et urbain. Cas de la plaine d'El-Hadjar (2007).
- [4] - N. BOUGHERIRA, Impact des rejets industriels du complexe sidérurgique sur les eaux superficielles et souterraines dans la plaine de Meboudja. Magister.Univ.Badji-Mokhtar Annaba, (2008) 93p.
- [5] - A. HANI, Analyse méthodologiques de la structure et des processus anthropiques : application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Th Doct. Es-Sciences, Univ. Annaba. 214p (2003).
- [6] - J. AVOINE, D. BOUST, et J.-F. GUILLAUD, Flux et comportement des contaminants dissous et particulaires dans l'estuaire de la Seine. Rap .5^e Cons. Int. Explor. Mer, 186, (1986) 392-411.
- [7] - O. BAGHDAD, M. ERIC, S. MOHAMED, J. C. FICHER, B. ABDAL, W. MICHEL, Dominique BOUST, H. DIDIER et R. MARIANNE, Le fer et le Manganèse dans l'estuaire de la seine, étude des échanges particulaire dissous. Identification et réactivité des phases porteuses (2007).
- [8] - D. BOUST, Contribution à l'étude de la réactivité des métaux traces au cours des cycles érosion – sédimentation dans l'estuaire de la Seine : redistribution dans les eaux interstitielles des sédiments anoxiques. Rapport Seine -Aval- Thème Dynamique des contaminants (1997).
- [9] - C. CLAUDE et Kh-H. SOPHAL, Recherche de métaux et de quelques micropolluants organiques dans l'eau du Lemman (1992).
- [10] - L. DJABRI, Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse. Origines géologique industrielle, agricole et urbaine. Th. Doct. Es-Sciences, Univ. Annaba, (1996) 261p.
- [11] - Dominique BOUST, C. F. JEAN, O. BAGHDAD, P. FABIENNE et W. MICHEL, Fer et Manganèse : réactivité et recyclages, (1999).
- [12] - F. BRECHIGNAC, et G. DEVILLE-CAVELIN, Fiche radionucléide. Fer 59 et environnement-IRSN (2002).
- [13] - ISGA/ANNABA, Identification des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du bassin versant englobant le crassier externe de l'usine ISPAT Annaba. 35p (2004).
- [14] - P. L. LOPEZ et E. P. GRAHAM., Determination of labile pool of manganese, iron, zinc, cobalt and copper in deficient soils by isotopic exchange. *6RLO 6FL*, 114 (1972) 296-299.
- [15] - J. S. MARSHALL et J. H. LE ROY, Iron, Manganese, Cobalt and Zinc Cycles in South Carolina Reservoir. Nelson DJ (Ed.) *5DGLRQXFOLGHV LQ (FRV\ VWHPV*, pp. 465-473. CONF-710501 (1973).
- [16] - VALERIE DEVALLOIS – 2^{ème} année de thèse modélisation des transferts des métaux trace dans les cours d'eau : échanges solide-liquide et diagenèse précoce, *Journées des thèses IRSN*, 1er- 4 octobre 2007.
- [17] - YACOUB ISSOLA, Concentration en métaux lourds des sédiments d'une lagune côtière tropicale: lagune de Fresco (Cote d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences 18: 1009-1018, ISSN, 1997-5902* (2009).
- [18] - ZAHID IDLAFKIH, et MICHEL MEYBECK, Comportement des métaux particuliers (Al, Fe, Me, Cd, Cu, Hg, Pb et Zn) dans la seine a poses en période de hautes eaux (1990-1995). *Freshwater Contamination (Proceedings of Rabat Symposium S4, April-May 1997). IAHS Publ. no. 243, 1997.*