

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ 8 MAI 1945-GUELMA

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
et des Sciences de la Terre et de l'Univers

Laboratoire de Biologie, Eau et Environnement

Département d'Écologie et Génie de l'Environnement



THÈSE :

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat 3^{ème} cycle en Sciences Biologiques

Option : Santé, Eau et Environnement

Caractérisation Hydrochimique et Bactériologique des Eaux Souterraines de L'aquifère Superficiel de la Plaine de Tamlouka (Nord-Est Algérien)

Présenté par :

GUEROUI Yacine

Devant le jury

Président:	M. HOUHAMDI	Prof	Université de Guelma
Directeur de thèse:	A. MAOUI	M.C.A	Université de Guelma
Examineur:	E. F. DERRADJI	Prof	Université d'Annaba
Examineur:	Z. BRANES	Prof	Université d'Annaba
Examinatrice:	L. SOUKI	M.C.A	Université de Guelma
Examineur:	S. LABAR	M.C.A	Université d'El-Tarf

Année Universitaire 2014/2015

Remerciements

Cette thèse est le fruit de labeur de quatre années successives au cours desquelles j'ai rencontré des personnes qui par leur aide et leurs encouragements m'ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions, aussi bien en Algérie qu'au Maroc.

Toute ma gratitude à Monsieur Ammar MAOUI, Maître de conférence (A) de la Faculté des Sciences et de la Technologie à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma qui m'avez fait l'honneur d'accepter de diriger cette thèse et qui a contribué à son aboutissement. Vous avez guidé et éclairé, par vos précieux conseils, la réalisation de ce travail. Veuillez trouver, ici, l'expression de ma reconnaissance, de mon profond respect et de ma vive gratitude.

Je remercie tout particulièrement les professeurs et maîtres de conférences qui ont accepté de faire partie du jury de soutenance: Monsieur M. HOUHAMDI, professeur à l'Université de Guelma qui a bien voulu présider le jury et Monsieur E. F. DERRADJI, professeur à l'Université d'Annaba de m'avoir fait l'honneur de juger ce travail. Mes vifs remerciements vont à Monsieur Z. BRANES professeur à l'Université d'Annaba, Dr. L. SOUIKI, maître de conférences (A) à l'Université de Guelma et Monsieur S. LABAR maître de conférences (A) à l'Université d'El-Tarf qui ont bien voulu me faire l'honneur d'examiner ce travail.

Je remercie très sincèrement Mlle. Kawtar FIKRI BEN BRAHIM et Monsieur Lahcen BENAABIDATE, professeurs de la faculté des Sciences et Techniques de Fès qui m'ont reçu au cours d'un stage effectué à l'Université de Sidi Mohamed Ben Abdellah qui a été l'occasion de m'apprendre des initiations à la biologie moléculaire.

Je voudrais également remercier Monsieur Mohammed MOSTAKIM, pour l'aide et l'encouragement qu'il m'a accordé durant mon stage et pour leur grande qualité humaine et professionnelle qui m'a été d'un grand concours.

Que Monsieur L. Ghrieb trouve ici mes vifs remerciements pour leur aide et leur encouragement durant ce travail.

Je tiens à remercier aussi Taqiyeddine BENSOUILAH, Ahmed Samer TOUATI et Ahcen TOUATI pour leur aide, leur soutien et leur amitié qui auront été un réconfort quotidien.

Je suis très reconnaissant à tous mes collègues de la formation doctorale : Santé, Eau et Environnement, tout l'effectif de la direction de santé de la wilaya de Guelma ainsi que tous les membres de la commune de Tamlouka pour leur accueil, leur sympathie ainsi que leur assistance.

RÉSUMÉ

Les eaux souterraines possèdent une importance capitale dans la plupart des régions du monde ; elles représentent environ 99 % d'eau douce sur terre. Cependant, cette ressource de bonne qualité, se trouve actuellement menacée par diverses sources de pollution ponctuelles et diffuses.

L'Algérie se trouve parmi les pays les plus pauvres en réserves hydriques superficiels ajouté à cela la pollution des eaux et l'exploitation irrationnelle des ressources souterraines. La plaine de Tamlouka est une zone à vocation agricole située à l'Est Algérien ; elle appartient à la région des hautes plaines constantinoises. Dans cette région, les eaux souterraines représentent la principale source d'eau. Le développement industriel et surtout agricole, associé à l'essor démographique réduit de plus en plus la qualité et le potentiel de ces réserves.

Pour une bonne gestion de ces eaux, nous devons saisir le mode de fonctionnement des aquifères. Donc ; l'objectif de notre étude est de déterminer et connaître l'origine du faciès chimique des eaux, son évolution spatio-temporelle, avoir une idée générale sur la qualité chimique et bactériologique de ces eaux dans l'unique but de déceler leurs impacts sur l'environnement et sur la santé humaine. A cette fin, des analyses saisonnières ont été réalisées sur une période d'une année en faisant recours à diverses méthodes et techniques normalisées.

A travers les résultats obtenus, nous avons pu déterminer les facteurs influençant le chimisme des eaux en particulier la dissolution des évaporites, qui a été prouvé par la modélisation thermodynamique. L'étude de la variation spatio-temporelle des différents éléments chimiques a montré une forte minéralisation ainsi que des valeurs élevées des nitrates au Sud et au centre de la plaine. Les résultats des analyses bactériologiques indiquent une contamination fécale des eaux de la région; signalées par les fortes concentrations en coliformes fécaux et streptocoques fécaux. Donc ; pour une meilleure évaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines, un contrôle régulier de la qualité de l'eau doit être mené dans ce domaine.

Mots clés : Tamlouka, plaine, eaux souterraines, hydrochimie, bactériologie, minéralisation, pollution.

ABSTRACT

Groundwaters have a dominant importance in most parts of the world; they represent about 99 % of fresh water on earth. However, this resource of good quality is currently under threat from several sources of punctual and broadcast pollution.

Algeria is among a poorest country in superficial water reserves added to that the pollution and the excessive exploitation of groundwater resources. The Tamlouka plain is an agricultural area located in the Eastern part of Algeria; it belongs to the Constantine high plains. In this region, groundwater is the main source of water. Industrial and mainly agricultural development, associated to the population growth reduced the quality and the potential of these reserves.

For a good management of these waters, we must recognize the performance mode of aquifers. So; the aim of this study is to know and to determine the origin of the chemical types of water, its spatial and temporal evolution, and to have a general idea about the chemical and bacteriological quality of the water for the aim of identifying their impact on the environment and human health. For this purpose, seasonal analyzes were performed over a period of one year by the use of various standardized methods and tools.

Through the results, we were able to determine the factors affecting the chemistry of water particularly the dissolution of evaporates, which was proven by thermodynamic modeling. The study of the spatial and temporal variation of different chemical elements, showed a high values of mineralization and nitrates in the South and the center of the plain. The bacteriological results expose to us a fecal contamination of the region water; reported by high concentrations of fecal Coliform and fecal Streptococci. So; for better quantitative and qualitative assessment of groundwater resources, regular monitoring of water quality should be conducted in this area.

Key words: Tamlouka, plain, groundwater, hydrochemistry, bacteriology, mineralization pollution.

ملخص

تعتبر المياه الجوفية ذات أهمية قصوى في معظم أنحاء العالم؛ إذ أنها تمثل حوالي 99% من المياه العذبة على مستوى الأرض. على الرغم من أن هذا المورد الطبيعي ذو نوعية جيدة، فهو حاليا معرض الى التهديد من مصادر مختلفة للتلوث.

تعتبر الجزائر من بين الدول الأكثر فقرا في احتياطات المياه السطحية إضافة إلى تلوث المياه والاستغلال غير العقلاني للموارد الجوفية. يعتبر سهل تاملوكة منطقة ذات طابع زراعي تقع في شرق الجزائر، و تنتمي إلى منطقة المرتفعات القسنطينية. في هذه المنطقة، تعتبر المياه الجوفية هي المصدر الرئيسي للمياه. التطور الصناعي و الزراعي بالإضافة الى النمو الديموغرافي خفض اكثر فاكثرا من جودة واحتياطات هذه المياه.

لأجل إدارة سليمة لهذه المياه، يجب علينا معرفة كافة الخصائص المتعلقة بالطبقة الجوفية للمياه. اذن الهدف من هذه الدراسة هو تحديد و معرفة أصل الانواع الكيميائية للمياه، تطورها في المكان و الزمان، اضافة الى ذلك الحصول على فكرة عامة عن الجودة الكيميائية و البكتريولوجية لهذه المياه من اجل تحديد تأثيرها على البيئة و صحة الإنسان. لهذه الغاية، أنجزنا تحاليل موسمية لمدة سنة واحدة تم من خلالها الاستعانة بطرق وأدوات علمية معتمدة.

من خلال النتائج المتحصل عليها، استطعنا تحديد العوامل المؤثرة في كيمياء المياه، خاصة تحلل المكونات المتبخرة، والتي تم إثباتها من خلال نموذج الترموديناميكية. دراسة التحولات الزمانية والمكانية لمختلف العناصر الكيميائية أظهرت تنامي الملوحة الكيميائية بالإضافة الى تسجيل نسبة عالية من النترات في جنوب ووسط سهل تاملوكة. نتائج التحليل البكتريولوجي تبين لنا مدى التلوث البرازي في المنطقة؛ مع وجود تركيز عالي من بكتيريا القولون و بكتيريا المكورات السبحية البرازية. من اجل تقييم كمي ونوعي أفضل للموارد الجوفية، ينبغي إجراء مراقبة منتظمة لنوعية المياه في هذه المنطقة.

كلمات دلالية: تاملوكة، سهل، المياه الجوفية، الكيمياء المائية، بكتريولوجيا، ملوحة، التلوث.

LISTE DES TABLEAUX

N°		Page
Tableau 01	Station climatologiques utilisés dans l'étude du climat de la région	20
Tableau 02	Températures moyennes mensuelles en °C (1990-2013)	20
Tableau 03	Nombre de jours mensuels interannuel de gelée (1990-2013)	22
Tableau 04	Nombre de jours mensuels interannuel de neige (1990-2013)	23
Tableau 05	Evaporation moyenne mensuelle en mm (1990-2013)	24
Tableau 06	Vitesse moyenne des vents (m/s) (1990-2013)	25
Tableau 07	Moyenne mensuelle de l'humidité relative (1990 - 2013)	26
Tableau 08	Précipitation moyenne mensuelle	27
Tableau 09	Répartition saisonnière des précipitations	30
Tableau 10	Fréquences expérimentales au non dépassement	32
Tableau 11	Test χ^2	34
Tableau 12	Calcul de l'ETR par la formule de Turc (annuel)	37
Tableau 13	Bilan d'eau par la méthode C.W Thornthwaite à la station d'Oum El Bouaghi (1990-2013)	38
Tableau 14	Bilan d'eau par la méthode C.W Thornthwaite à la station de Guelma (1990- 2013)	38
Tableau 15	Ruissellement par la formule de Tixeront-Berkaloff	40
Tableau 16	Bilan hydrologique	41
Tableau 17	Corrélation entre la géologie et les résultats géophysiques	47
Tableau 18	Valeurs de transmissivité par différentes méthodes de la nappe profonde	60
Tableau 19	Valeurs de transmissivité et de coefficient d'emménagement dans les puits	61
Tableau 20	Norme de potabilité de l'eau	69
Tableau 21	Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de plaine de Tamlouka	70
Tableau 22	Compagnes d'échantillonnage dans la zone d'étude	71
Tableau 23	variation des éléments majeurs des eaux de la plaine de Tamlouka (2013-2013)	83
Tableau 24	Inertie dans les 5 premières composantes principales	84
Tableau 25	Matrice de corrélation des 100 observations	85

Tableau 26	Corrélation entre variable et poids factoriels	86
Tableau 27	Contribution des variables selon les axes factoriels	87
Tableau 28	Statistiques des indices de saturations	91
Tableau 29	Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du SAR	106
Tableau 30	Norme de potabilité de l'eau	111
Tableau 31	Résultats des analyses bactériologiques des eaux souterraines de plaine de Tamlouka	111
Tableau 32	Mélange réactionnel pour la PCR	122
Tableau 33	Origine de la pollution fécale selon le rapport CF/SF	133
Tableau 34	Détermination du rapport coliformes fécaux/streptocoques fécaux	134
Tableau 35	Résultats de l'identification par la galerie API 20E	136
Tableau 36	Résultats de l'identification par la galerie API 20 NE	137
Tableau 37	Résultats de l'identification par la galerie API Staph	137
Tableau 38	Pourcentage d'homologie de L'ARNr 16S de nos isolats avec celle de la base de donné (Gen Bank)	139
Tableau 39	Analogie entre les neurones biologiques et artificiels	142
Tableau 40	L'erreur RMS dans différents réseaux de neurone	150
Tableau 41	Paramètres statistiques de régression	150
Tableau 42	Classement des variables par analyse de sensibilité	151

LISTE DES FIGURES

N°		Page
Figure 01.a	Situation géographique de la wilaya de Guelma	3
Figure 01.b	Carte des limites administratives de la wilaya de Guelma	4
Figure 02	Carte de réseau hydrographique de la wilaya de Guelma	6
Figure 03	Carte de la situation géographique et limite de la commune de Tamlouka	8
Figure 04	Carte des formations forestières de la wilaya de Guelma	9
Figure 05	Carte géologique de la plaine de Tamlouka	10
Figure 06	Carte géologique du secteur Djebel DJAFFA	11
Figure 07	Représentation schématique de la série intermédiaire du Djebel DJAFFA	12
Figure 08	Tableau de corrélation des séries allochtones de type Sellaoua	15
Figure 09	Schéma structural simplifié (J.M. Vila, 1977)	18
Figure 10	Carte descriptive du relief de la plaine	19
Figure 11	Variation de la température moyenne mensuelle (1990-2013) pour les stations d'Oum El Bouaghi et Guelma	21
Figure 12	Températures moyennes interannuelles à la station d'Oum El Bouaghi (1990-2013)	21
Figure 13	Températures moyennes interannuelles à la station de Guelma (1990-2013)	22
Figure 14	Nombre de jours mensuelle interannuelle de gelée - Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013)	22
Figure 15	Nombre de jours mensuelle interannuelle de neige - Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013)	23
Figure 16	Variation de l'évaporation moyenne mensuelle – Station : Oum El Bouaghi, Guelma (1990-2013)	24
Figure 17	Vitesse moyenne mensuelle des vents - Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013)	25
Figure 18	Variations des moyennes mensuelles de l'humidité relative - Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013)	26
Figure 19	Variation des précipitations moyennes mensuelles	27

Figure 20	Coefficient de variation des précipitations moyennes mensuelles - Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013)	28
Figure 21	Variation interannuelle des précipitations pour les stations d'Oum El Bouaghi et Guelma (1990-2013)	29
Figure 22	Variation du coefficient pluviométrique - Stations de: Oum El Bouaghi, Guelma (1990-2013)	30
Figure 23	Répartition saisonnière des précipitations pour les stations d'Oum El Bouaghi, Guelma et Tamlouka	31
Figure 24	Ajustement des précipitations moyennes annuelles à une loi de Gauss – Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013)	33
Figure 25	Corrélation linéaire (station Oum El Bouaghi-Guelma)	36
Figure 26	Corrélation linéaire (station Oum El Bouaghi-Tamlouka)	36
Figure 27	Bilan d'eau par la méthode de Cw.Thornthwaite (station : Oum El Bouaghi)	39
Figure 28	Bilan d'eau par la méthode de Cw.Thornthwaite (station : Guelma)	39
Figure 29	Diagramme Ombrothermique - Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013)	42
Figure 30	Diagramme Ombrothermique - Station de Guelma (1990-2013)	42
Figure 31	Climagramme d'Emberger (Station : Oum El Bouaghi et Guelma)	44
Figure 32	Carte d'isorésistivités apparentes de la plaine de Tamlouka (AB = 100 m)	48
Figure 33	Carte d'isorésistivités apparentes de la plaine de Tamlouka (AB = 500 m)	49
Figure 34	Carte d'isorésistivités apparentes de la plaine de Tamlouka (AB = 1000 m)	50
Figure 35	Carte d'isorésistivités apparentes de la plaine de Tamlouka (AB = 2000 m)	51
Figure 36	Carte en isopaches « isosubstratum » de la plaine de Tamlouka	52
Figure 37	Coupe (AA') des forages	54
Figure 38	Coupe (BB') des forages	55
Figure 39	Carte piézométrique des basses eaux – Novembre 1991	57
Figure 40	Carte piézométrique des hautes eaux – Mai 1992	58
Figure 41	Carte hypsométrique de la zone d'étude	63

Figure 42	Réalisation du MNT Par la méthode d'Interpolation Inverse pondéré de la distance (Inverse Distance Weighting)	65
Figure 43	Réalisation de MNT Par la méthode Interpolation Bilinéaire (Rectangular interpolation)	65
Figure 44	Réalisation de MNT Par la méthode de triangulation irrégulière (TIN)	66
Figure 45	Carte de la répartition des échantillons dans la zone d'étude	72
Figure 46	Variation de la conductivité électrique	74
Figure 47	Variation du potentiel hydrogène pH	74
Figure 48	Variation de la température	75
Figure 49	Variation de l'oxygène dissous	76
Figure 50	Variation des éléments majeurs (cations et anions) dans la région d'étude	79
Figure 51	Variation des éléments nutritifs (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^-) dans la région d'étude	80
Figure 52	Variation du silicium et fluorure dans la région d'étude	81
Figure 53	Diagrammes de Piper des eaux de la plaine de Tamlouka (Année : 2012-2013)	82
Figure 54	Projection des variables sur le plan factoriel (1-2)	85
Figure 55	Projection des individus sur le plan factoriel (1-2)	87
Figure 56	Projection des variables sur le plan factoriel (1-3)	88
Figure 57	Variation de l'indice de saturation de la calcite et de la dolomite	92
Figure 58	Variation de l'indice de saturation du gypse et l'halite	92
Figure 59	Variation de l'indice de saturation du quartz et la Chalcédoine	93
Figure 60	Relation Sodium - Chlorure	94
Figure 61.a	Origine du sulfate	95
Figure 61.b	Origine du calcium	95
Figure 62	Variation du rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$	96
Figure 63	Variation du rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$	96
Figure 64	Variation du rapport Na^+/Cl^-	97
Figure 65	Variation de l'indice d'échange de base	98
Figure 66	Variation spatiale de la conductivité électrique (Avril2012-Mai 2013)	99

Figure 67	Variation spatiale du calcium (Avril2012-Mai 2013)	100
Figure 68	Variation spatiale du sodium (Avril2012-Mai 2013)	101
Figure 69	Variation spatiale des bicarbonates (Avril2012-Mai 2013)	102
Figure 70	Variation spatiale des chlorures (Avril2012-Mai 2013)	103
Figure 71	Variation spatiale des sulfates (Avril2012-Mai 2013)	104
Figure 72	Variation spatiale des nitrates (Avril2012-Mai 2013)	105
Figure 73	Diagramme de RICHARDS classification des eaux d'irrigation en fonction du SAR	107
Figure 74	Recherche et dénombrement des germes revivifiables	113
Figure 75	Recherche et dénombrement des coliformes	115
Figure 76	Recherche et dénombrement des Streptocoque fécaux	117
Figure 77	Recherche et dénombrement des Spores d'Anaérobies Sulfito-réductrices	119
Figure 78	Le Thermocycleur	122
Figure 79	Le générateur de courant qui assure la migration	124
Figure 80	Le Trans-illuminateur à UV	124
Figure 81	Le séquenceur « Applied Biosystems 3130 »	125
Figure 82	Variation spatiale de la flore totale à 22 °C	128
Figure 83	Variation spatiale de la flore totale à 37 °C	129
Figure 84	Variation spatiale des Coliformes totaux	130
Figure 85	Variation spatiale des Coliformes fécaux	131
Figure 86	Variation spatiale des Streptocoques fécaux	133
Figure 87	Variation spatiale des Anaérobies sulfito-réductrices	135
Figure 88	Electrophorèse en gel d'agarose des produits PCR	138
Figure 89	La séquence partielle de la souche bactérienne <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	139
Figure 90	Schéma d'un neurone artificiel	141
Figure 91	Schéma d'un neurone biologique	142
Figure 92	Illustration du réseau à 3 couches (MLP)	146
Figure 93	Fonction de transfert sigmoïde	148
Figure 94	Architecture du modèle RNA	149
Figure 95	Corrélation entre la conductivité simulée et mesurée	150

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Table des matières	
Introduction générale	1
Chapitre I : Cadre physique de la plaine de Tamlouka	
A- Description de la zone d'étude	3
1- Bref Aperçu sur la wilaya de Guelma	3
1-1. Situation géographique	3
1-2. Caractéristiques physiques	5
❖ Le climat	5
❖ Le relief	5
❖ Le réseau hydrographique	5
2- Présentation de la commune de Tamlouka	6
2-1. Localisation géographique	6
2-2. Aperçus historiques sur la commune de Tamlouka	7
2-3. Données socio-économiques	7
2-4. L'emploi	7
2-5. Cadre biotique	7
B- Géologie et géomorphologie	9
1- Généralité	9
2- Stratigraphie	10
2-1. Unité allochtone du Djebel DJAFFA	10
2-2. Unité des Sellaoua	13
2-2.1. Le crétacé inférieur	13
• Le Néocomien	13
• Le Barrémien	13
• L'Aptien	13
• L'Albien	13
2-2.2. Le crétacé supérieur	13
• Le Cénomani	13

• Le Turonien	13
• Le Sénonien inférieur	14
• Le Sénonien supérieur	14
2-3. La nappe Néritique constantinoise	14
2-4. La nappe tellienne	14
2-4.1. Le Sénonien inférieur	14
2-4.2. Le Sénonien supérieur	14
2-4.3. Le Paléocène	15
2-4.4. L'Eocène	15
2-5. La nappe Numidienne de Djebel ANSEL	15
2-6. Le remplissage Mio-Plio-Quaternaire	16
2-6.1. Le Mio-Pliocène	16
2-6.2. Le Quaternaire	16
3- Tectonique	16
4- Géomorphologie	17
4-1. La cuvette de Tamlouka	17
4-2. Les terrasses	17
4-3. Les marécages	17
4-4. Les collines	17
4-5. Les massifs de bordure	18
C- Climatologie	19
1- La température	20
2- La gelée	22
3- La neige	23
4- L'évaporation	24
5- Le vent	25
6- L'humidité relative	26
7- Les précipitations	26
7-1. Précipitation moyenne mensuelle	27
7-2. Précipitation moyenne annuelle	28
7-3. Répartition saisonnière des précipitations	30
7-4. Analyse statistique des précipitations	31
7-4-1. Ajustement des précipitations annuelles à une loi de Gauss	31

7-4-2. Application du test χ^2 de K. Pearson	33
* Calcul de la période de retour ou de récurrence théorique	34
7-4-3. la régression linéaire	35
8- Evapotranspiration	36
8-1. La formule de Turc (moyenne annuelle)	37
8-2. la méthode de l'eau de C.W.Thornthwaite	37
9- Estimation du ruissellement	40
10- Estimation de l'infiltration	40
11- Rythme climatique	41
11-1. Diagramme pluviothermique	41
11-2. Indice de De. Martonne	42
11-3. Climagramme d'EMBERGER	43
Conclusion	44
Chapitre II : Étude hydrogéologique	
A. Introduction	46
B- Apports de l'étude géophysique	46
C- Essais de corrélation entre la géologie et la géophysique	47
1- Les cartes d'isorésistivité apparente	47
1-1. Principe d'élaboration des cartes d'isorésistivité	47
1-2. Interprétation	47
D- Caractéristiques des aquifères de la région	53
1- La nappe aquifère du remplissage Mio-Plio-Quaternaire	53
2- La nappe profonde des calcaires	53
E- Etablissement des coupes hydrogéologiques	53
1- La coupe AA'	53
2- La coupe BB'	54
F- Hydrologie souterraine	55
1- Piézométrie	55
1-1. La carte piézométrique des basses eaux	56
1-2. La carte piézométrique des hautes eaux	56
2- Les zones d'alimentation des nappes	59
2-1. La nappe libre	59
2-2. La nappe profonde des calcaires	59

G- Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères	59
1- Pompage d'essai de la nappe profonde	60
2- Pompage d'essai de la nappe superficielle	60
H- Réalisation d'un modèle numérique de terrain (M.N.T)	61
1- Définition d'un M.N.T	62
2- Elaboration d'un M.N.T	62
3- Interpolation	63
3-1. Inverse pondéré de la distance (Inverse Distance Weighting)	64
3-2. Interpolation bilinéaire (Rectangular interpolation)	65
3-3. Interpolation par triangulation irrégulière (TIN)	66
Conclusion	67

Chapitre III : Étude hydrochimique

A. Introduction	68
B- Résultats des mesures et des analyses chimiques de l'eau	68
1- Prélèvements	70
2- Méthodes d'analyses	72
3- Analyse des résultats	73
3-1. La conductivité électrique	73
3-2. Potentiel hydrogène (pH)	74
3-3. Température T	74
3-4. L'oxygène dissous (O ₂)	75
3-5. Le calcium (Ca ²⁺)	76
3-6. Le magnésium (Mg ²⁺)	76
3-7. Les Chlorures (Cl ⁻) et le Sodium (Na ⁺)	77
3-8. Le Potassium (K ⁺)	77
3-9. Les Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	77
3-10. Les Sulfates (SO ₄ ²⁻)	78
3-11. Les nutriments	78
a- Les nitrates (NO ₃ ⁻)	78
b- Les nitrites (NO ₂ ⁻)	78
c- L'ammonium (NH ₄ ⁺)	80
d- L'ortho phosphate (PO ₄ ⁻)	80
3-12. Le Silicium (Si)	81

3-13. Le Fluorure (F ⁻)	81
4- Faciès chimiques des eaux	82
5- Analyse statistiques des données physico-chimiques	83
❖ L'analyse en composantes principales (ACP)	83
6-Thermodynamique	88
L'indice de saturation	89
La constante d'équilibre K _{éq}	90
7- Origine des éléments chimiques	93
7-1. Le couple Na ⁺ - Cl ⁻	93
7-2. Les éléments Ca ²⁺ - HCO ₃ ⁻ - SO ₄ ²⁻	94
8- Etude des rapports caractéristiques	95
8-1. Le rapport SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻	95
8-2. Le rapport Mg ²⁺ /Ca ²⁺	96
8-3. Le rapport Na ⁺ /Cl ⁻	97
9- Echanges de bases	97
10- La Cartographie hydrochimique	98
10-1. les résultats obtenus	99
10-1-1. Carte de la variation spatiale de la conductivité électrique	99
10-1-2. Carte de la variation spatiale du calcium	100
10-1-3. Carte de la variation spatiale du sodium	101
10-1-4. Carte de la variation spatiale des bicarbonates	102
10-1-5. Carte de la variation spatiale des chlorures	103
10-1-6. Carte de la variation spatiale des sulfates	103
10-1-7. Carte de la variation spatiale des nitrates	104
11- Aptitude des eaux a l'irrigation	105
Conclusion	108
Chapitre IV : Étude bactériologique	
A. Introduction	110
B- Résultats des analyses bactériologiques de l'eau	110
1- Prélèvements	111
2- Méthodes d'analyses	112
2-1. Recherche et dénombrement des germes revivifiables	112
2-2. Recherche et dénombrement des germes indicateurs de contamination fécale	114

2-2-1. Recherche et dénombrement des coliformes	114
2-2-2. Recherche et dénombrement des Streptocoques fécaux	116
2-2-3. Recherche et dénombrement des spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices	118
2-3. Recherche et isolement des germes pathogènes	118
a- L'identification	118
a-1. Caractères morphologiques	118
a-2. Identification biochimique	120
a-3. Identification moléculaire	121
a-3-1. Extraction de l'ADN génomique	121
a-3-2. PCR (Polymerase Chain Reaction)	121
a-3-3. Electrophorèse sur gel d'agarose	123
a-3-3-1. Préparation du gel	123
a-3-3-2. Dépôt des produits d'amplification	123
a-3-3-3. Migration	124
a-3-3-4. Visualisation	124
a-3-4. Séquençage des ADN amplifiés	125
a-3-4-1. Purification des produits de PCR	125
a-3-4-2. Lavage	125
a-3-4-3. Elution de l'ADN	126
a-3-4-4. Réaction de séquençage	126
a-3-5. Analyse informatique des séquences	127
3- Analyse des résultats	128
3-1. Dénombrement des germes totaux	128
3-2. Dénombrement des Coliformes totaux	130
3-3. Dénombrement des Coliformes fécaux	131
3-4. Dénombrement des Streptocoques fécaux	132
3-5. Le rapport coliformes fécaux/ streptocoques fécaux (CF/SF)	133
3-6. Dénombrement des bactéries anaérobies sulfito-réductrices	134
3-7. Identification des souches bactériennes	135
3-7-1. Résultats de l'identification biochimique	136
3-7-2. Résultats de l'identification moléculaire	137
Conclusion	140

Chapitre V : Modèle neuronal

A- Réseaux de neurones artificiels	141
1- Présentation de la méthode neuronale	141
2- Connexions entre les neurones	141
3- Application de la méthode Neuronale	144
3-1. Architecture du réseau	144
3-2. Critères de performance du modèle	144
4- Création du modèle	145
5- Calibrage et vérification du modèle	148
5-1. Détermination des modèles d'entrées	148
5-2. Résultats et discussion	149
Conclusion	151
Conclusion générale	152
Références Bibliographiques	154
Annexes	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'eau est un élément biologique important en tant que support de vie et facteur du développement des pays. Elle est considérée comme un vecteur privilégié de l'activité humaine.

Les eaux souterraines constituent une excellente source d'eau douce et le plus souvent une eau de bonne qualité. Cependant, leur exploitation représente un avantage économique estimable, pour le maintenir, il est nécessaire de prendre des mesures pérennes de protection de la qualité de cette richesse.

La pollution des eaux souterraines est un problème majeur auquel notre monde moderne est confronté. La notion de pollution est une notion relative, on entend par laquelle, la présence de plusieurs origines de polluants dans l'environnement généralement créés par l'homme. Cette pollution peut être évidente (hydrocarbures flottante sur la mer), comme elle peut être moins visible (les rejets agricoles, considérés comme source de pollution par les fertilisants et les pesticides) (El Morhit, 2009).

Actuellement l'Algérie se trouve confrontée au manque de réserves superficielles et à l'exploitation excessive des ressources souterraines ajouté à cela la pollution des eaux dans certaines régions (Djidel et Djorfi, 1992). Concernant notre région d'étude, la qualité de l'eau potable a provoqué un mécontentement général de la population ; pour cette raison elle n'a eu comme unique refuge que de s'alimenter des sources naturelles. En effet, l'essor démographique, industriel et surtout agricole de la dernière décennie a dégradé la qualité des eaux souterraines de l'aquifère de la plaine de Tamlouka.

Cette étude constitue une étape très importante qui accorde un intérêt particulier à la valorisation du potentiel hydraulique de la région. Afin d'apprécier la qualité réelle des eaux souterraines de l'aquifère et de comprendre l'influence des facteurs générateurs de pollution, un suivi des caractéristiques physicochimiques ainsi que bactériologique a été réalisé, fondé sur des approches relatives à l'hydrochimie, l'hydrodynamique, la cartographie, la microbiologie...etc.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Aussi, notre étude s'articulera en quatre parties principales :

- Dans la première partie de ce travail, nous présentons un résumé d'un ensemble de données disponibles sur la zone d'étude ; un aperçu géographique et géologique ainsi que l'étude des différents paramètres climatiques ont été détaillés.

- En seconde partie, l'étude hydrogéologique faisant appel à diverses méthodes et outils d'investigation où nous avons assemblé la géophysique, la piézométrie et les paramètres hydrodynamiques de la nappe. Ensuite, un modèle numérique du terrain sera présenté afin de tirer des informations sur les formes du relief tant que leur position.

- La troisième partie présente l'évolution spatio-temporelle des paramètres physicochimiques, dont l'interprétation des résultats s'est basée sur la détermination de la minéralisation globale des eaux de la région notamment leur faciès chimique. Ensuite, les résultats seront synthétisés par une analyse multivariée (ACP) afin de comprendre le fonctionnement de cet hydrosystème. De même, un suivi de l'évolution des teneurs en nitrates a été fait pour déceler une éventuelle contamination par cet ion.

- La quatrième partie de ce mémoire traite l'évolution spatio-temporelle de la flore bactériologique afin de suivre la dynamique des indicateurs de contamination fécale le long des campagnes d'échantillonnage. En effet, le risque microbiologique lié aux différents germes pathogènes présents dans les eaux souterraines de la zone d'étude sera traité par une identification biochimique ainsi que moléculaire de ces germes.

Les résultats bruts des paramètres physicochimiques et bactériologiques des différentes matrices analysées sont présentés en annexes, après la conclusion générale.

Chapitre I : Cadre physique de la plaine de Tamlouka

A- Description de la zone d'étude

1- Bref Aperçu sur la wilaya de Guelma

1-1. Situation géographique

La Wilaya de Guelma, s'étend sur une superficie de 3.686,84 Km², située au Nord-Est Algérien. Elle constitue, du point de vue géographique, une zone de transition entre les pôles industriels du Nord (Annaba et Skikda) et les centres d'échanges au Sud (Oum El Bouaghi et Tébessa). Elle est localisée en plein cœur entre le Nord du pays, les hauts plateaux et le Sud (Fig. 01.a et Fig. 01.b) (A.N.D.I, 2013).

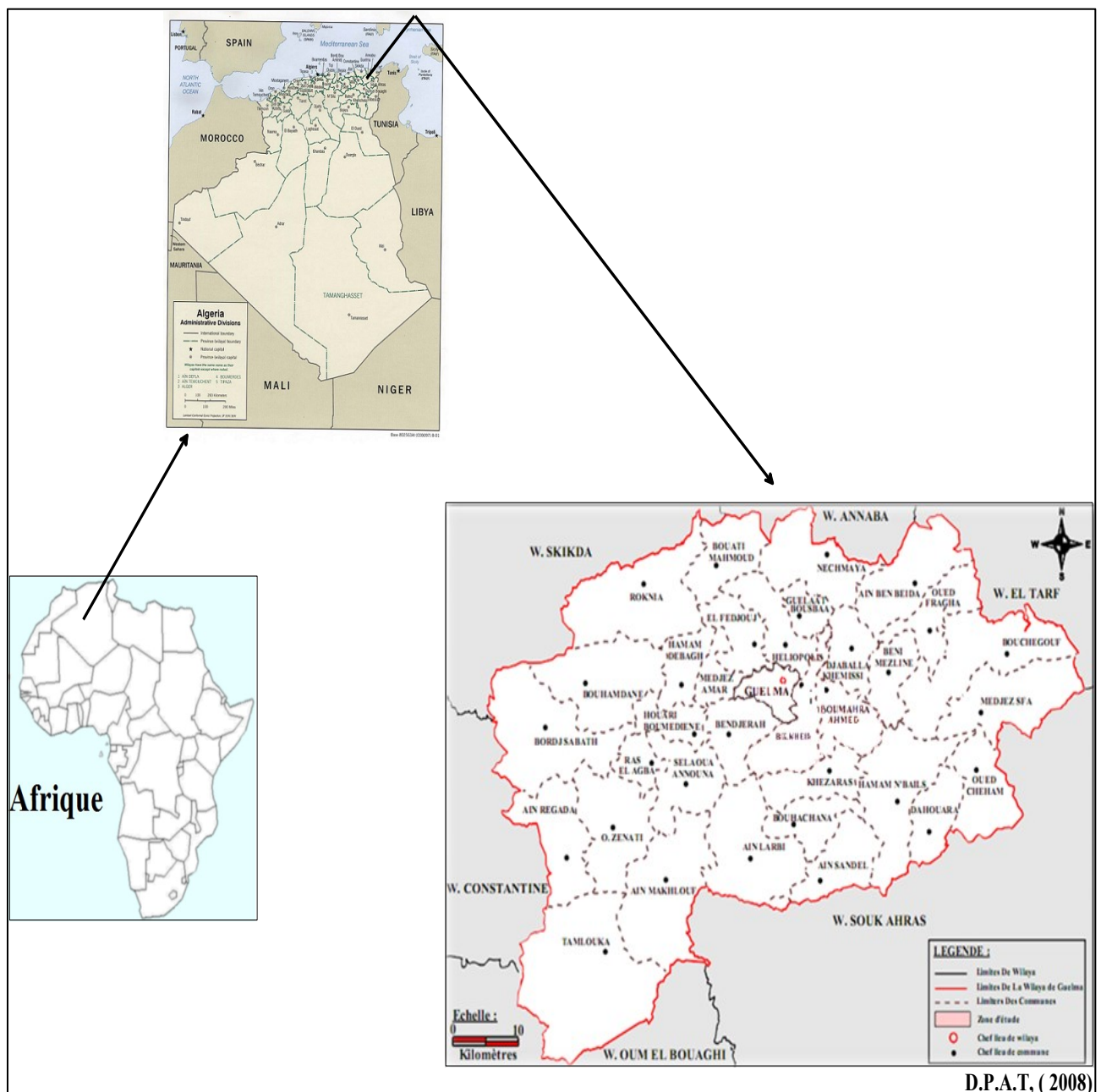


Figure 01.a: Situation géographique de la wilaya de Guelma.

Chapitre I : Cadre physique de la plaine de Tamlouka

Elle est limitée :

- Au Nord par la wilaya d'Annaba ;
- Au Nord-Est par la wilaya d'El Taref ;
- A l'Est par la wilaya de Souk Ahras;
- A l'Ouest par la wilaya de Constantine;
- Au Nord-Ouest par la wilaya de Skikda ;
- Au Sud par la wilaya Oum El-Bouaghi.

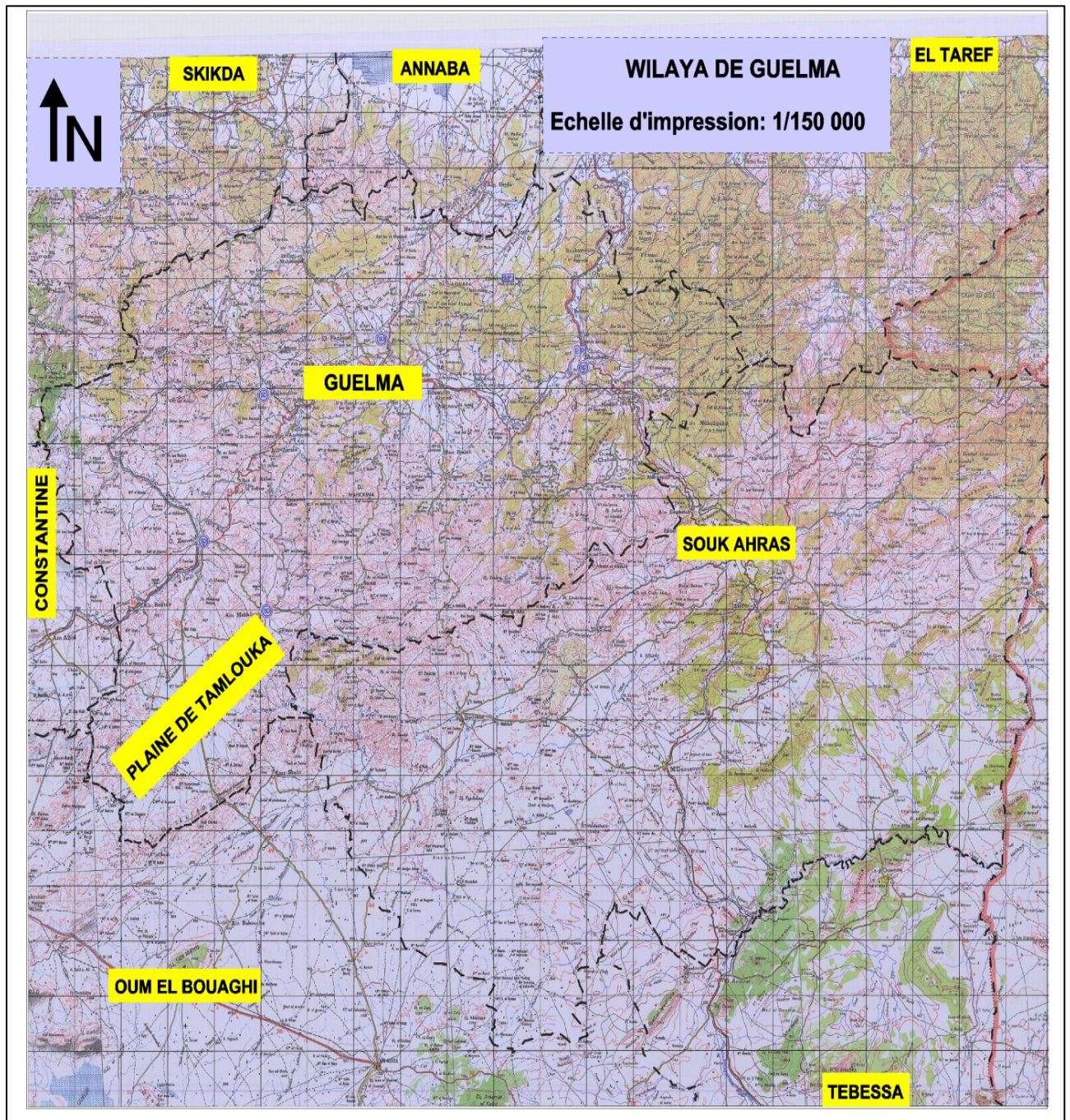


Figure 01.b: Carte des limites administratives de la wilaya de Guelma.

Elle est érigée comme wilaya en 1974, comprend 34 communes regroupées en 10 daïras. La population de la wilaya est estimée à 506.007 habitants avec une densité de 135 habitants par Km². La plupart de la population est jeune (< 15 ans) soit 34 % de la population totale (O.N.S, 2008).

1-2. Caractéristiques physiques

❖ Le climat

Le climat de la wilaya de Guelma est de type subhumide au centre et au Nord et semi-aride vers le Sud, caractérisé par un hiver doux et pluvieux et un été chaud avec une température oscille de 4° C en hiver à 35.4°C en été, soit 17,3°C de moyenne. Quant à la pluviométrie, elle varie de 400 à 500 mm/an au Sud et peut atteindre 1000 mm/an au Nord, soit 57 % de cette pluviométrie est enregistrée pendant la période humide allant d'Octobre à Mai (A.N.D.I, 2013).

❖ Le relief

L'aspect géographique de la Wilaya de Guelma se caractérise par un relief diversifié comprend une importante couverture forestière de 105.395 ha, soit un taux de 28,59 % de la superficie totale de la wilaya. Les montagnes constituent le relief le plus important, soit 37 % de la superficie de la wilaya dont les principales sont : Mahouna (1,411 m d'altitude), Houara (1.292 m d'altitude), Taya (1.208 m d'Altitude) et D'bagh 1.060 m d'Altitude). Le reste est composé par les plaines avec 27,22 %, les collines et les piémonts avec 26,29 % et plus autres types de relief constituant **8,67 %** (A.N.D.I, 2013).

❖ Le réseau hydrographique

Les principaux cours d'eau qui parcourent la wilaya sont (Fig. 02) :

Oued Seybouse : considéré comme le second Oued d'Algérie après l'Oued Chéelif, la Seybouse présente un axe de drainage d'un bassin versant d'une superficie de 6471 Km² (Debieche, 2002). Il prend sa source au point de rencontre entre oued Charef et Oued Bouhamdane au niveau de la commune de Medjez Amar en traversant la plaine de Guelma-Boucheouf. Leur apport total est estimé à 408 millions m³/an.

Oued Bouhamdane: provenant de l'Ouest de la wilaya au niveau de la commune de Bouhamdane avec un apport total estimé de 96 millions m³/an.

Oued Mellah: il provient du Sud-Est au niveau de la plaine de Tamlouka. Son apport total est apprécié de 151 millions m³/an.

Oued Charef : Prend sa source au Sud de la wilaya avec un apport total de 107 millions m³/an (Zouaïdia, 2006).

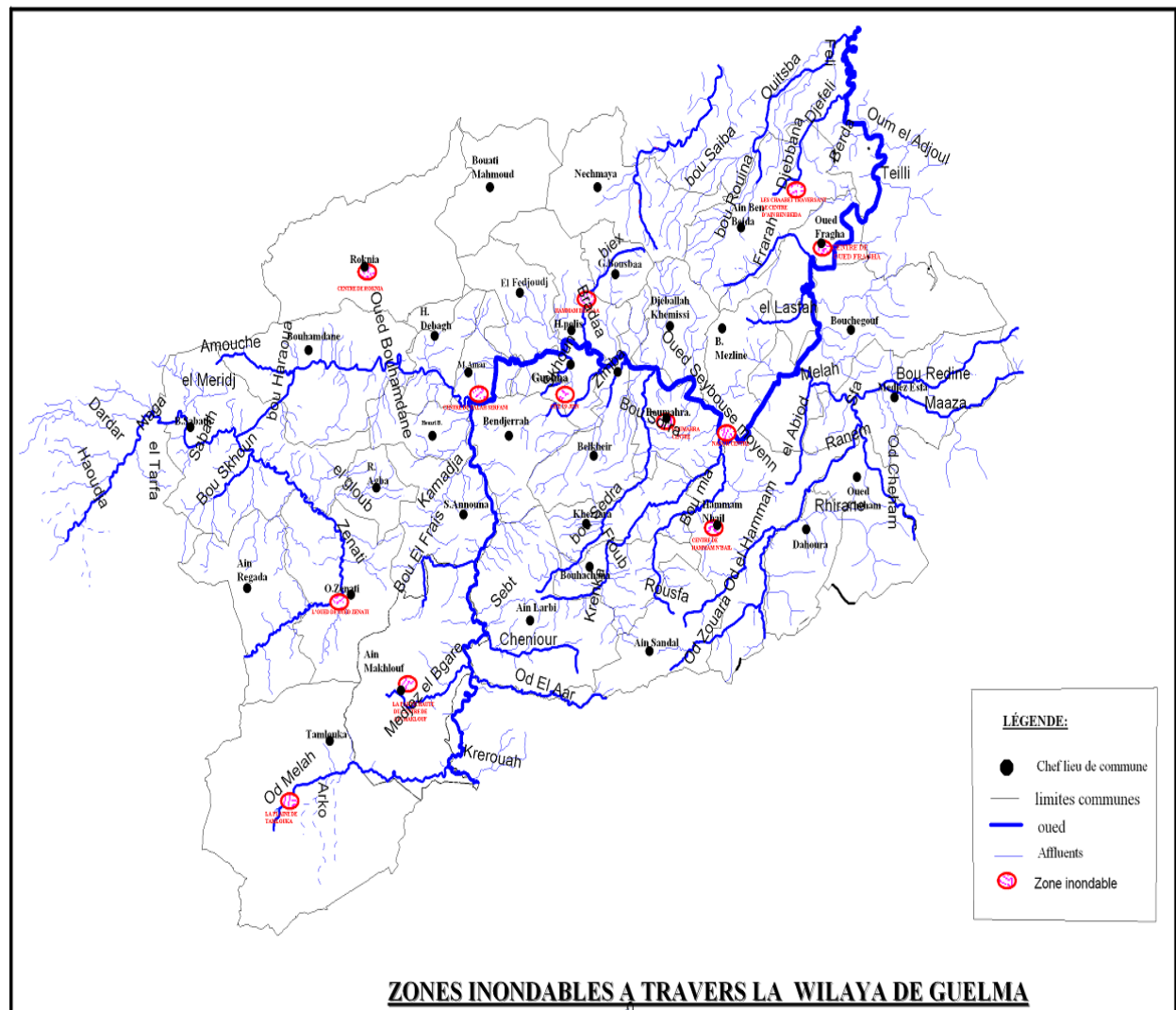


Figure 02 : Carte de réseau hydrographique de la wilaya de Guelma.

2- Présentation de la commune de Tamlouka

2-1. Localisation géographique

La plaine de Tamlouka est située au Sud-Ouest de la wilaya de Guelma à une altitude moyenne supérieure à 742 m. Elle se trouve à une distance de 60 Km du chef-lieu de la wilaya vers le Sud et 30 Km au Nord de la ville d'Oum El-Bouaghi avec une superficie estimée de 303 Km² soit 8,21 % de la superficie totale de la wilaya. Elle appartient à la région Est des hauts plateaux constantinois et se localise entre 7° - 7°15'E de longitude et entre 36°-36°12'N de latitude (Fig. 02) (Hemila & Kowalski, 2002).

La commune de Tamlouka est limitée par :

- Les communes de Oued Zenati et Ain Regada au Nord ;
- La wilaya d'Oum El-Bouaghi au Sud ;
- La commune de Ain Makhlouf à l'Est ;
- Par la wilaya de Constantine à l'Ouest (Fig. 03).

2-2. Aperçus historiques sur la commune de Tamlouka

La commune de Tamlouka est passée par trois appellations différentes, débutent avant 1830 où elle était connue sous la dénomination « Ain Mellouk ». Pendant la période coloniale, elle est devenue une agglomération en 1878, puis une commune en 1957 sous le nom « Montcalm » l'ancien colon français. A partir de l'indépendance, la zone est connue sous le nom de Tamlouka.

2-3. Données socio-économiques

La plaine de Tamlouka est considérée comme une région à vocation agro-pastorale dont l'activité économique principale est la culture des céréales et l'élevage de bétail et volailles. La région possède une superficie agricole estimée de 25620 ha (12,74 % de la superficie de la wilaya de Guelma) dont 22927 ha est cultivée. L'industrie est presque inexistante sauf certaines installations à caractère locale notamment les carrières localisées à Ain Arko.

2-4. L'emploi

Selon les données de l'office national des statistiques (O.N.S, 2008), la commune de Tamlouka compte 18 894 habitants. La population est concentrée dans les principales agglomérations : Tamlouka, Ain Arko, Sellaoua, Belhafaf, Berahab et Bir El Setal. La répartition par secteurs d'activités économiques révèle que 18,5 % de la population active avec une dominance du secteur de commerce (80,9 %) et le reste pour le secteur de l'agriculture avec 19,1%.

2-5. Cadre biotique

La région de Tamlouka renferme des écosystèmes différents où on trouve une biodiversité expressive.

- Concernant la faune, elle est très diversifiée dans cet endroit. Pour les mammifères, on découvre l'existence de plusieurs bestioles tel que : Sanglier, Loups, Chacal, Renard, Lièvre et l'Hyène qui était observé par plusieurs personnes de la région. Pour les

oiseaux, on trouve plusieurs espèces : Cigogne blanche, Corbeau, Etourneau, Perdrix et les colombes.

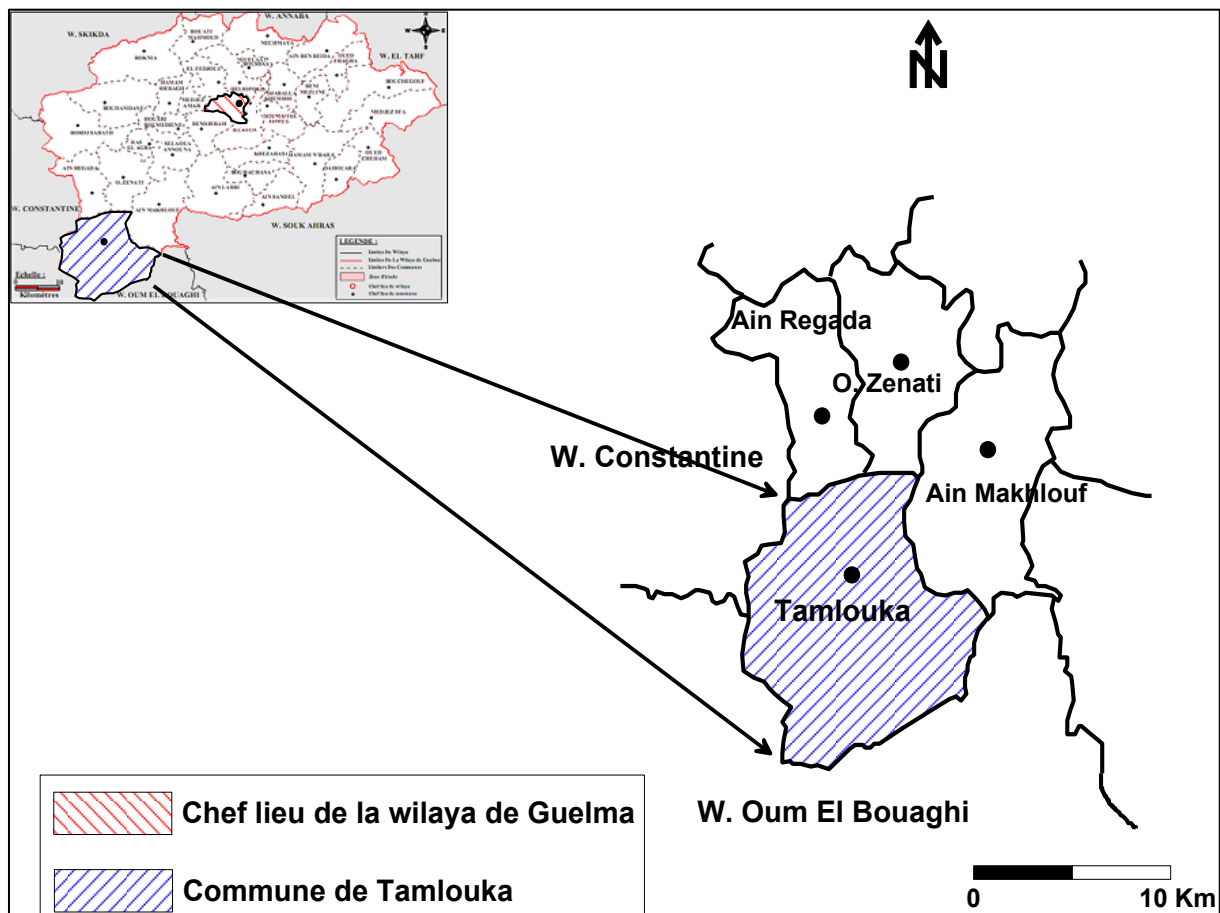


Figure 03: Carte de la situation géographique et limite de la commune de Tamlouka.

- Pour la flore, la couverture végétale est représentée par une dominance de populations forestières où on distingue deux zones principales créées en 1967 :
 - Le forêt d'El Kharouba située à l'Ouest de la commune et s'étend sur une superficie de 200 ha. Elle abrite des espèces floristiques représentées essentiellement par le Pin d'Alep.
 - Le forêt de Chebka située au Sud-Est de la commune et s'étend aussi sur une superficie de 200 ha. Elle abrite essentiellement le Pin d'Alep et le Cyprès (Fig. 04).

Récemment la direction des forêts de la wilaya de Guelma a créé d'autres zones au niveau de la région de DJAFFA et Chebka plantés par le Pin d'Alep et le Cyprès, sans oublier le programme de reboisement des terres en jachère par les arbres des oliviers pour confronter la menace croissante de la désertification.

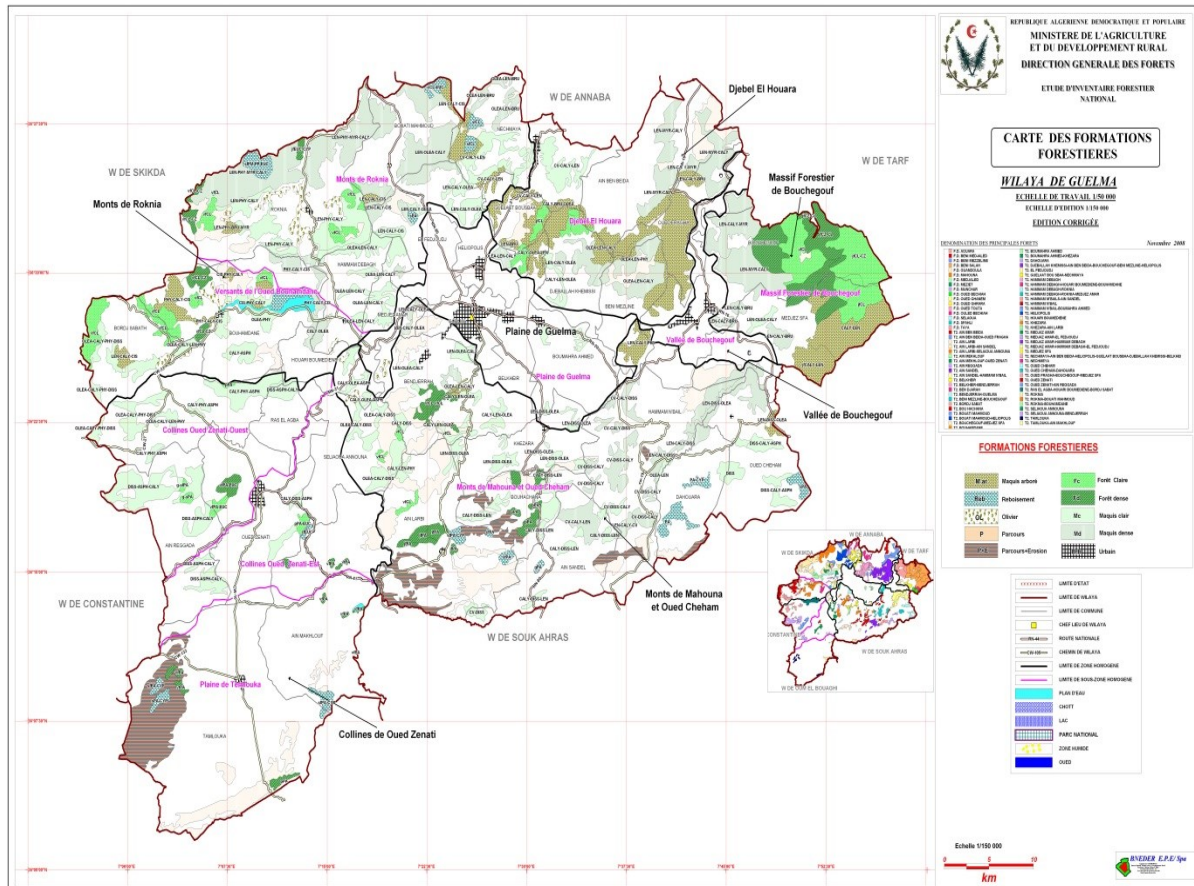


Figure 04 : Carte des formations forestières de la wilaya de Guelma (source : Direction Générale des Forêts, 2008).

B- Géologie et géomorphologie

1- Généralité

Le relief de la région de Tamoulka est constitué principalement par des plaines avec 80 % de la superficie totale, suivi par les montagnes 10 %, les collines 8 % et d'autres types avec 2 %. La géologie de la zone d'étude a été décrite par plusieurs auteurs : Gramont et Lombard 1966 ; Voute 1957 ; 1967 et Vila 1977a, 1977b, 1980. Elle comprend, le Plio-quaternaire qui présente une formation continentale composée essentiellement d'une croûte de calcaire, d'argile et de sable et de graviers de temps en temps. Dans cette région, trois domaines structuraux constituent les hauts plateaux: le sillon Sellaoua apparaît dans la partie orientale de la plaine et formé de la marne et légèrement du calcaire, le second domaine est la néritique qui apparaît dans la partie occidentale de la plaine par les monts de Djaffa, caractérisé par une alternance de calcaire, marne avec de l'argile et parfois le sable. Le troisième domaine occupe la partie Nord de la plaine et se compose de marnes et de calcaires marneux avec le silex de l'âge crétacé (Fig. 05).

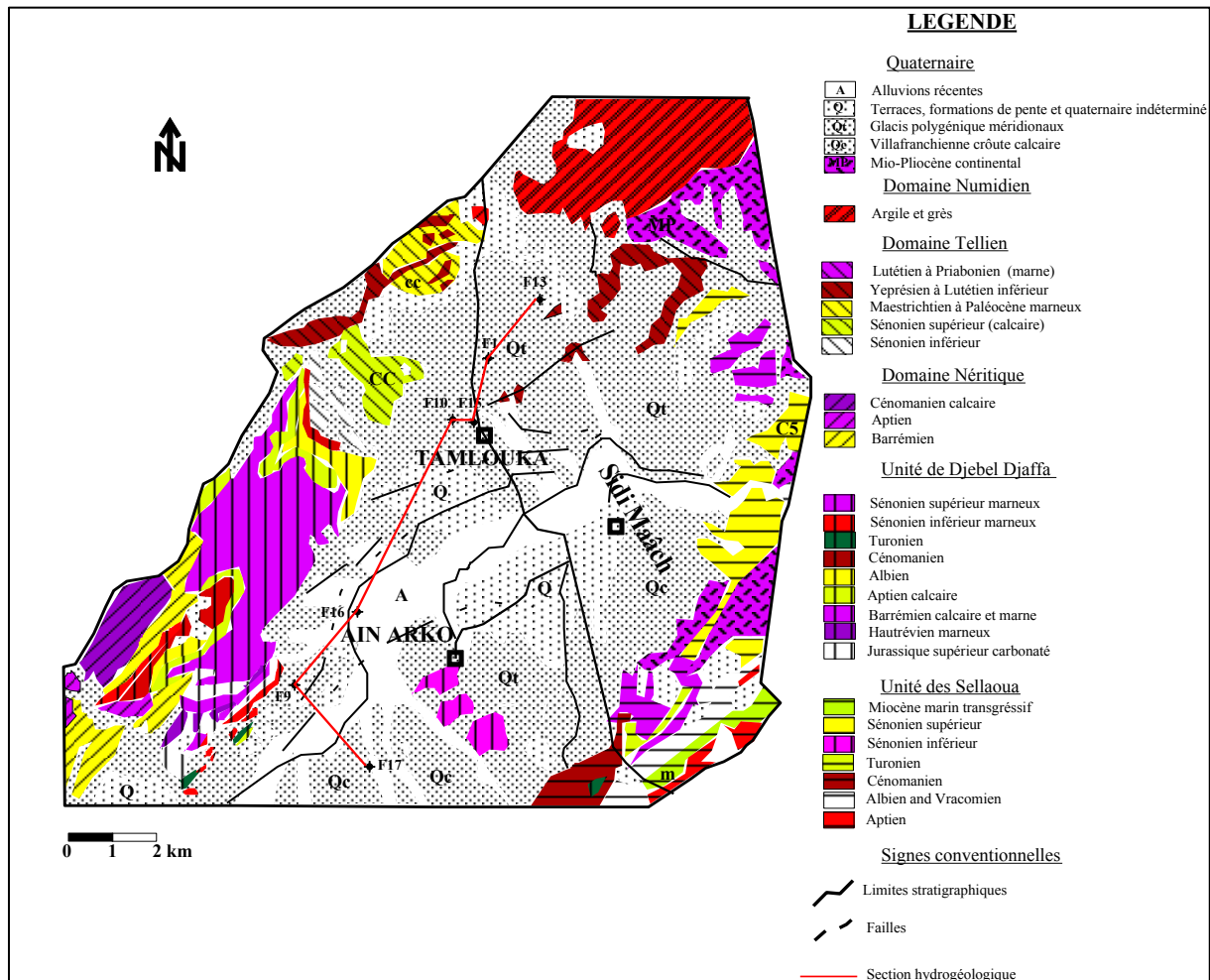


Figure 05: Carte géologique de la plaine de Tamlouka (d'après J.M. Vila, 1977 : extrait modifié).

2- Stratigraphie

Les principales unités lithologiques observées dans la plaine de Tamlouka sont les suivantes (Djidel et Djorfi, 1992) :

2-1. Unité allochtone du Djebel DJAFFA

L'unité de DJAFFA est située au bord du bassin de Tamlouka. Elle a été décrite par trois auteurs : Gramont M., J.P. Lombard (1966) et J.M. Vila (1980). Elle est caractérisée principalement par une alternance marno-calcaire d'épaisseur de 1000 m avec des passages argileux (Fig. 06, Fig. 07).

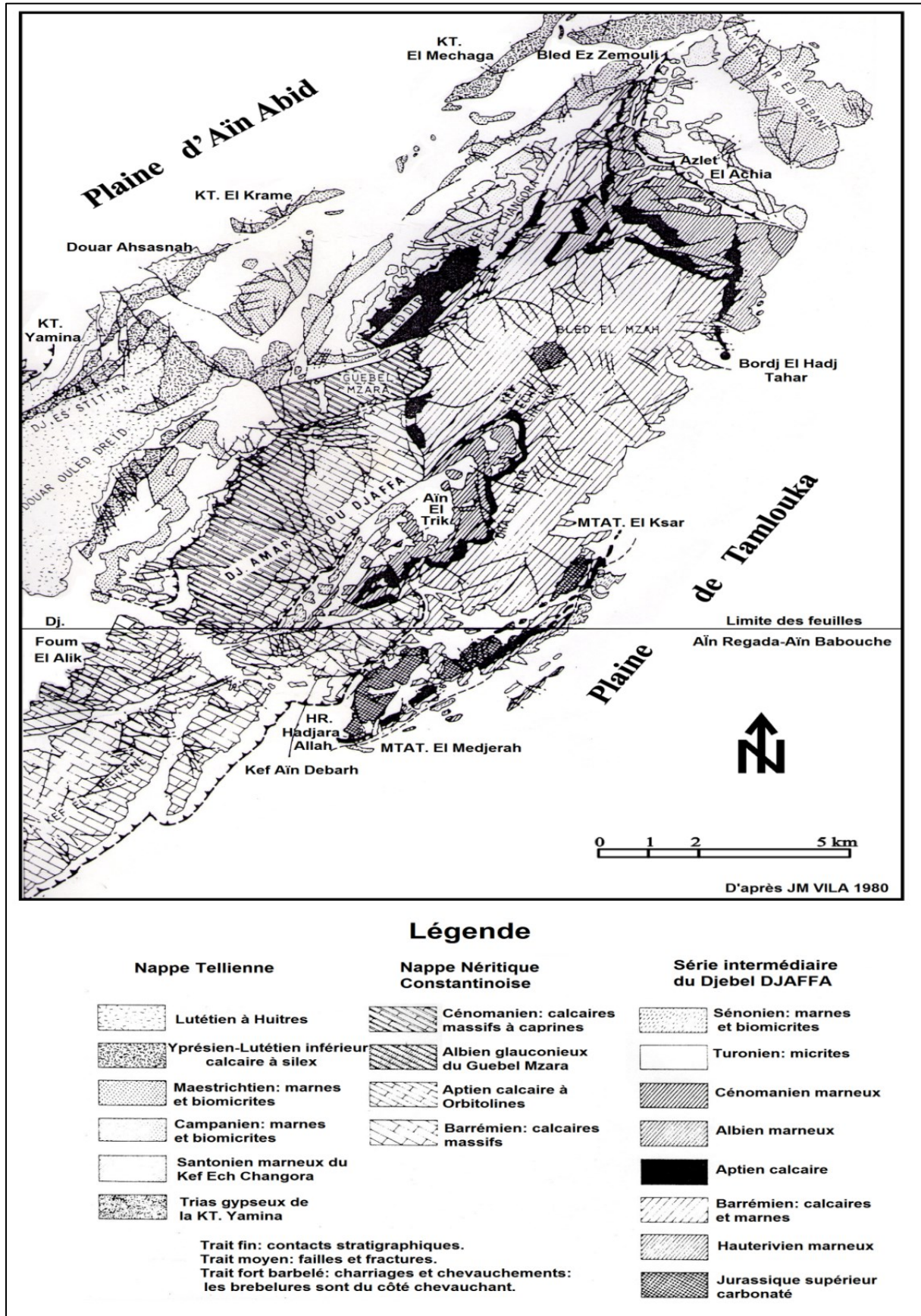


Figure 06 : Carte géologique du secteur Djebel DJAFFA.

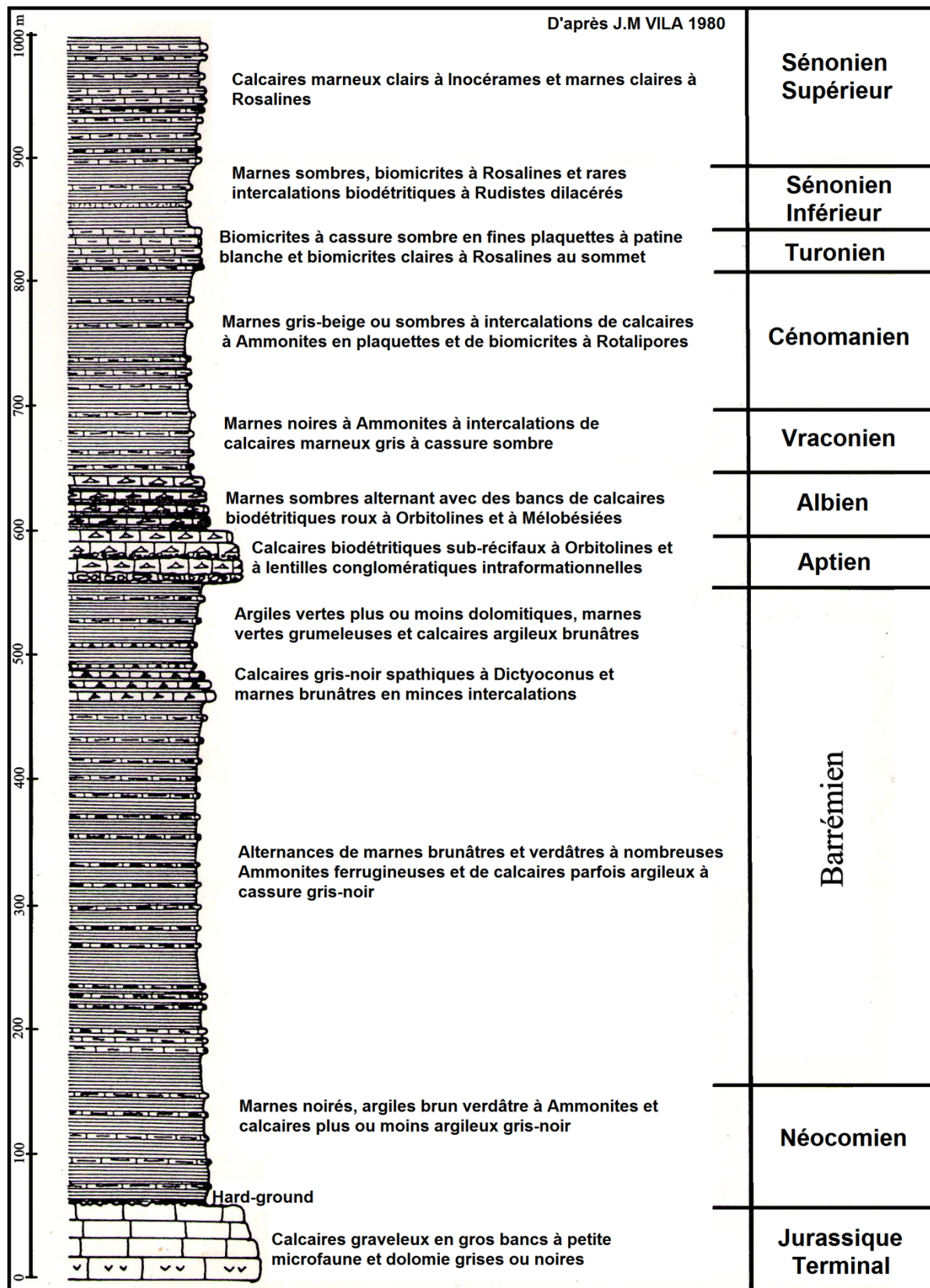


Figure 07 : Représentation schématique de la série intermédiaire du Djebel DJAFFA.

2-2. Unité des Sellaoua

Cette unité possède les mêmes affinités lithologiques que celles du Djebel DJAFFA en remarquant un abaissement relatif du calcaire (Fig. 08).

2-2.1. Le Crétacé inférieur

- **Le Néocomien**

Il se caractérise par une épaisseur de 250 m présentée par des alternances de marnes et schistes argileux avec les cadences des grès contenant des microfossiles du Valanginien.

- **Le Barrémien**

Avec une épaisseur de 180 m, la série est composée par des marnes et d'argiles gréseuses avec un niveau constant des calcaires lités joignant une agglutination calcaire.

- **L'Aptien**

Il se présente par une couche de 50 à 100 m de marnes de temps à autre gréseuses à ammonites ferrugineuses avec des niveaux de calcaires lités.

- **L'Albien**

Il se définit par une série marno-pélicite-gréseuse épaisse d'environ 150 à 400 m.

2-2.2. Le Crétacé supérieur

- **Le Cénomani**

L'épaisseur de la série est de 420 m, caractérisée par des faciès de marnes et marno-calcaires à ammonites. Au niveau du fossé central, le Cénomani terminal à faciès Chebka (calcaires en plaquettes) passe à des faciès calcaires grumeleux et marno-sableux avec ammonite ferrugineuse et éponge.

- **Le Turonien**

Il se présente sous deux formes : le Turonien inférieur et supérieur. Le premier est constitué par des calcaires lités avec des marnes. Il se caractérise par une épaisseur qui varie de 8 m au centre, de 30 m vers le Nord, et de 60 m sur la bordure méridionale.

Le Turonien supérieur se définit par une série d'épaisseur variant entre 20 à 150 m, formée par des marnes noduleuses à marnes granuleuses en remarquant des petits niveaux discontinus de calcaires glauconiens.

- **Le Sénonien inférieur**

Nous le rencontrons sous deux formes : le Coniacien qui est une série composée de marnes et de calcaires glauconieux généralement grumeleux où ils montrent des traces d'algues et des pistes de vers avec une épaisseur dépassant les 300 m. Le Santonien se caractérise par une épaisseur variante de 25 m au centre de la zone et entre 5 et 10 m au niveau de la bordure Sud-Est. Il est constitué de deux masses de calcaires grises et jaunes, séparées par des marnes. Au-dessus de la zone on découvre une série épaisse de 50 à 100 m composée de marnes grises verdâtres avec certaines insertions de calcaires.

- **Le Sénonien supérieur**

Il est caractérisé par deux structures : le Campanien qui se retrouve au niveau de la partie Sud-Ouest avec une succession régulière composée de marne épaisse de 70 m. Cette série de marne devient plus bleue chargée de pyrite, limonite et de gypse. Le Maestrichtien qui présente une série épaisse de 70 à 100 m formée par des marnes riches en inoceram.

2-3. La nappe Néritique constantinoise

Au niveau du Djebel DJAFFA la nappe Néritique est figurée sous les étages suivants :

- Le Barrémien supérieur épais d'environ 200 m, formé par un calcaire massif.
- L'Aptien, constitué d'une alternance de calcaire à orbitoline avec une épaisseur de 160 m.
- L'Albien glauconieux présente une épaisseur d'environ 20 m.
- Le Cénomaniens alternant de calcaire massif à caprines, épais de 200 m.

2-4. La nappe tellienne

Cette série est chevauchante sur la nappe Néritique de Djebel DJAFFA, elle comprend :

2-4.1. Le Sénonien inférieur

Avec une épaisseur de 100 m, il est représenté par des faciès marneux et marno-calcaires à ostréidés.

2-4.2. Le Sénonien supérieur

Cette série est arrangée en deux masses marno-calcaires successives séparés par des marnes grises. Elle possède une épaisseur d'environ 550 m.

2-4.3. Le Paléocène

Il existe deux théories concernant leur composition. Selon J.M. Vila il est constitué par des marnes noires contenant des boules jaunes et par des Silex et nodules de phosphate selon C. Voute. Il est épais de 170 m.

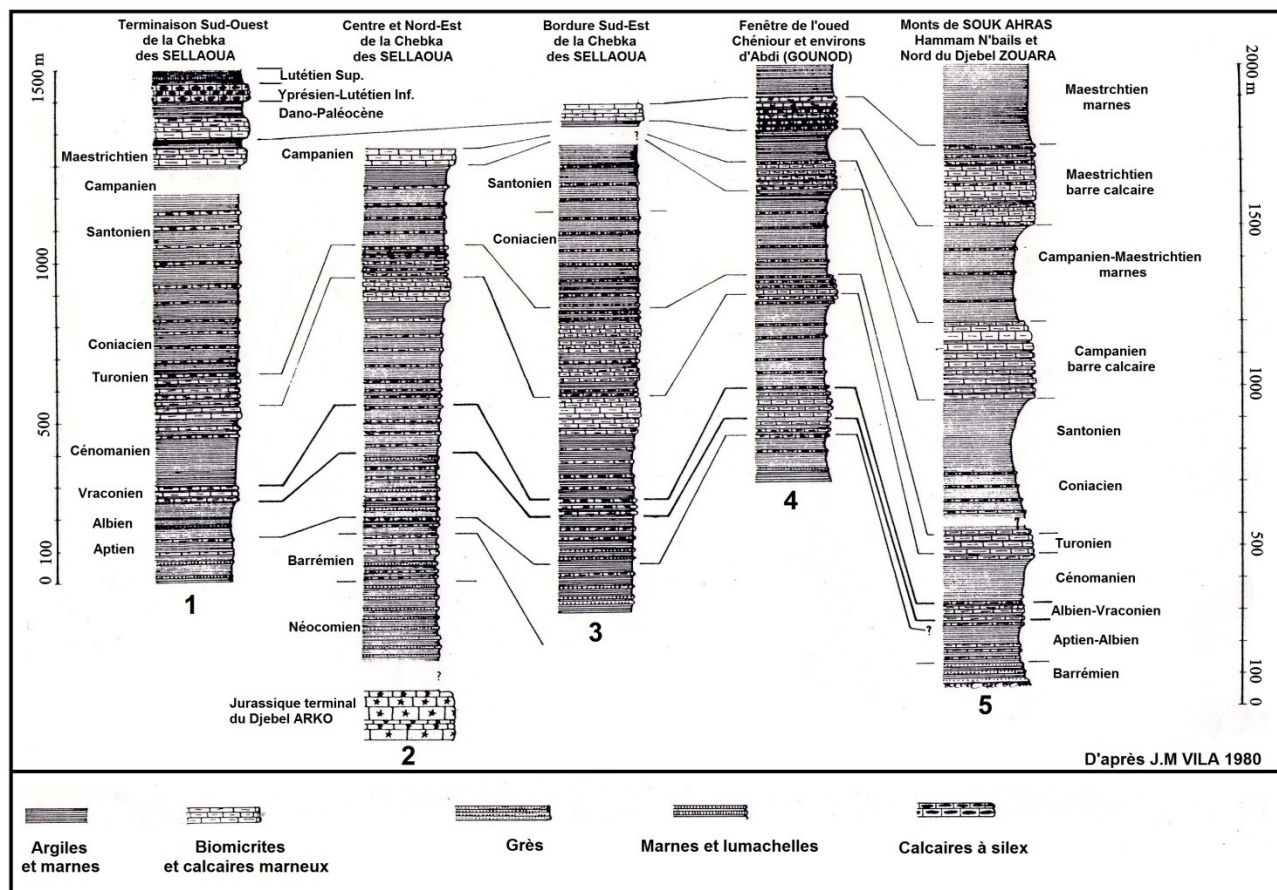


Figure 08 : Tableau de corrélation des séries allochtones de type Sellaoua.

2-4.4. L'Eocène

Il comprend trois limites : à la base une barre marno-calcaire noires à silex avec un niveau de 20 m riche en nummulites. Au sommet, il est composé de Lutétien supérieur plus ou moins épais riche en lumachelles à huîtres. L'ensemble de la série possède une épaisseur de 560 m.

2-5. La nappe Numidienne de Djebel ANSEL

Cette série est composée du bas en haut de trois structures :

- Des argiles sous-Numidiennes à Tubotomaculum.
- Des grès Numidiens.
- Des argiles et des marnes à selexites supra-Numidiennes.

L'ensemble de ces structures constitue une épaisse série datée à l'oligocène.

2-6. Le remplissage Mio-Plio-Quaternaire

2-6.1. Le Mio-Pliocène

D'après C. Voute (1957), les dépôts Mio-Pliocène peut atteindre une épaisseur de 500 m. Cette série présente un stade de sédimentation continentale effectuée après la réalisation de la construction allochtone fortement affecté par l'érosion.

2-6.2. Le Quaternaire

Il peut aller jusqu'à 100 m d'épaisseur, le quaternaire constitue une couverture naissante du bassin de Tamlouka. Il est composé d'une croûte de calcaire, d'argile rouge et brune sableuse et graveleuses.

3- Tectonique

Selon C. Voute, la plaine de Tamlouka présente une forme de cuvette allongée. Elle est bornée par le Djebel DJAFFA et la Chebka des Sellaoua qui possèdent une direction Nord- Est et Sud-Ouest (Fig. 09). Le Djebel DJAFFA constitue une grande coupole dont la structure est combinée par des failles et flexures longitudinales et par une faille transversale récente.

Le flanc Nord-Est est composé par une série épaisse de calcaires rigides morcelés en paliers monoclinaux par des fentes longitudinales. La zone centrale est occupée par un fossé.

Le flanc Sud-Est est représenté par une série marno-calcaire dévoilant des plis anticlinaux partiellement aigus. Ces derniers passent parfois à des petits Horsts limités par des zones longitudinales faillés et séparés par des larges synclinaux à fond relativement plat. D'après J.M. Vila, cette unité dévoile la présence d'une structure en pli couché vers le Sud-Est à cœur carbonaté d'âge jurassique supérieur, ce qui est affirmé par la réapparition à l'Est du jurassique isolé au centre de la plaine, notamment au niveau des collines de Ain Arko. Ces dernières sont considérées comme l'axe de l'anticlinal étendu en position chevauchante sur les marnes de l'unité des Sellaoua. Sur cette ensemble les unités Néritique et Tellienne parviennent à se chevaucher.

Au niveau du Djebel DJAFFA, le chevauchement est arrangé d'une forme très plate et détermine la belle Klippe du Kef Ain Debagh. Au Nord du Foum El Alik, à l'envers du Djebel DJAFFA, la nappe Tellienne est supportée par des calcaires massifs du Cénomaniens. A leur base, le Sénonien montre des structures disharmoniques remarquables, caractérisées par des plis couchés à vergence Sud et visibles au Nord du Kef Ech Changora.

4- Géomorphologie

L'aspect général de la plaine de Tamlouka présente des structures nettes liées à la tectonique et à l'accumulation des sédiments pendant le Mio-Pliocène et le quaternaire, sans oublier l'effet de l'érosion superficielle. Ces reliefs peuvent être divisés selon la forme et les caractéristiques en :

4-1. La cuvette de Tamlouka

C'est une large structure qui occupe la majeure partie du sous bassin versant d'Oued El Melah, qui fait partie du grand bassin versant « la Seybouse ». Au niveau de la base de la cuvette, on constate qu'elle est tectonisée et karstique donnant un arrangement de calcaire fissuré auquel se forme la nappe karstique. Les horizons supérieurs sont constitués par les sédiments du Mio-Pliocène et quaternaire formés des argiles sableuses. Au niveau de cet ensemble, on trouve la nappe libre.

4-2. Les terrasses

La plaine de Tamlouka est traversée par des cours d'eau dont la majeure partie est entourée par des formations alluvionnaires d'une puissance variable de 5 à 15 m avec une infiltration très importante. Ces alluvions sont constituées principalement des argiles, de sable, de galets et de graviers. Pendant la majeure partie de l'année, les cours d'eau sont à sec.

4-3. Les marécages

La plaine de Tamlouka possède quelques zones marécageuses surtout au niveau du centre. Pendant la période hivernale, la nappe libre devient trop pleine ce qui provoque l'apparition des marécages.

4-4. Les collines

Elles se trouvent en plein centre de la plaine, au niveau d'Ain Arko (850 m). Elles sont formées de calcaire similaire à celui du Djebel DJAFFA apparaît au niveau du calcaire Jurassique.

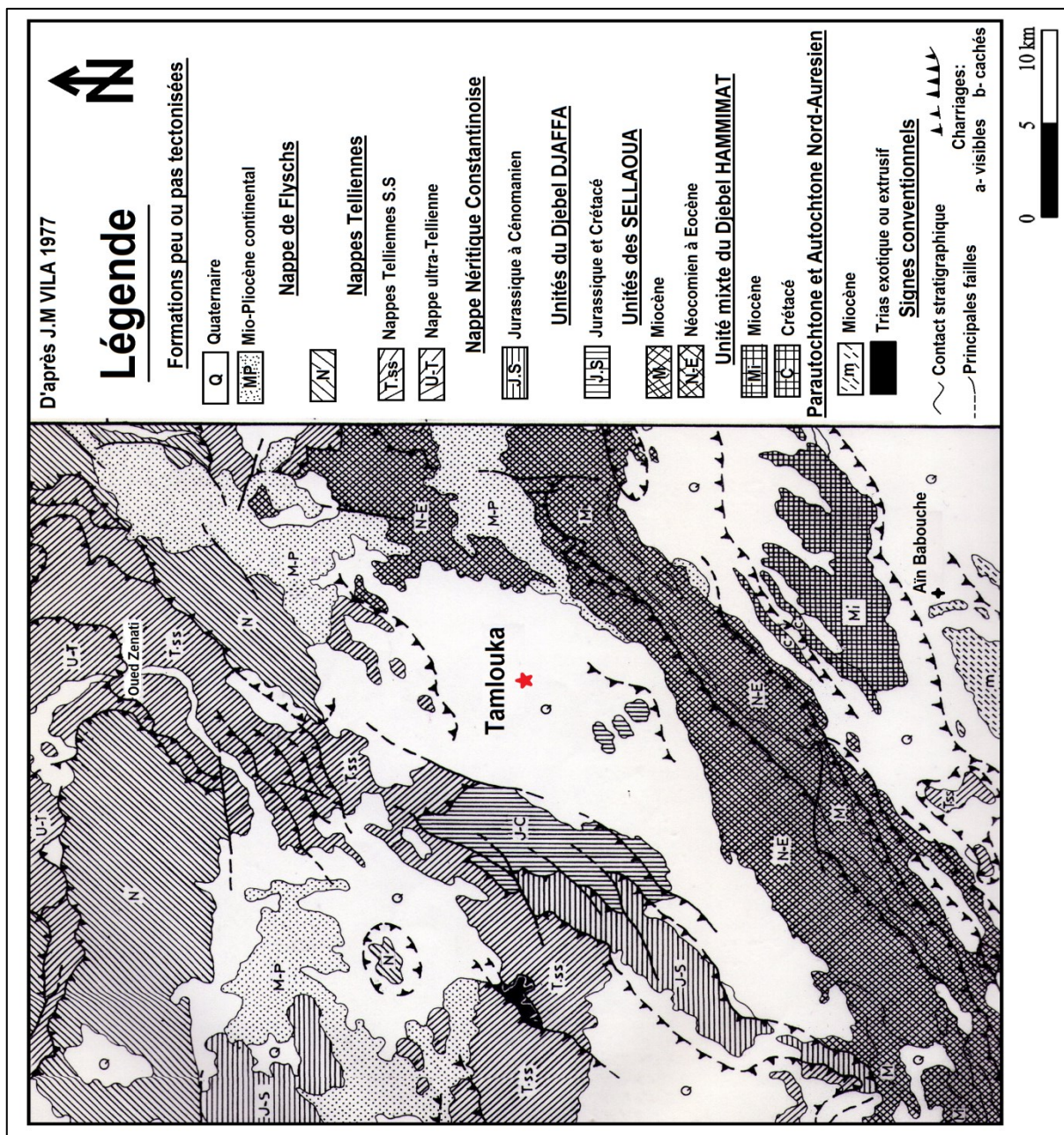


Figure 09 : Schéma structural simplifié (J.M. Vila, 1977).

4-5. Les massifs de bordure

La plaine de Tamlouka est limitée par (Fig. 10) :

- Djebel DJAFFA à l'Ouest, avec un point éminent de 1200 m. Il représente une grande fissuration constituée essentiellement par des calcaires et des marnes.
- La Chebka des Sellaoua au Sud, avec des sommets qui peuvent dépasser 1000 m d'altitude. Elle est formée par des grès rouges au niveau de leur partie superficielle.
- Par Djebel Ansel au Nord, avec une composition de grès Numidien et une couverture Mio-Pliocène continentale.

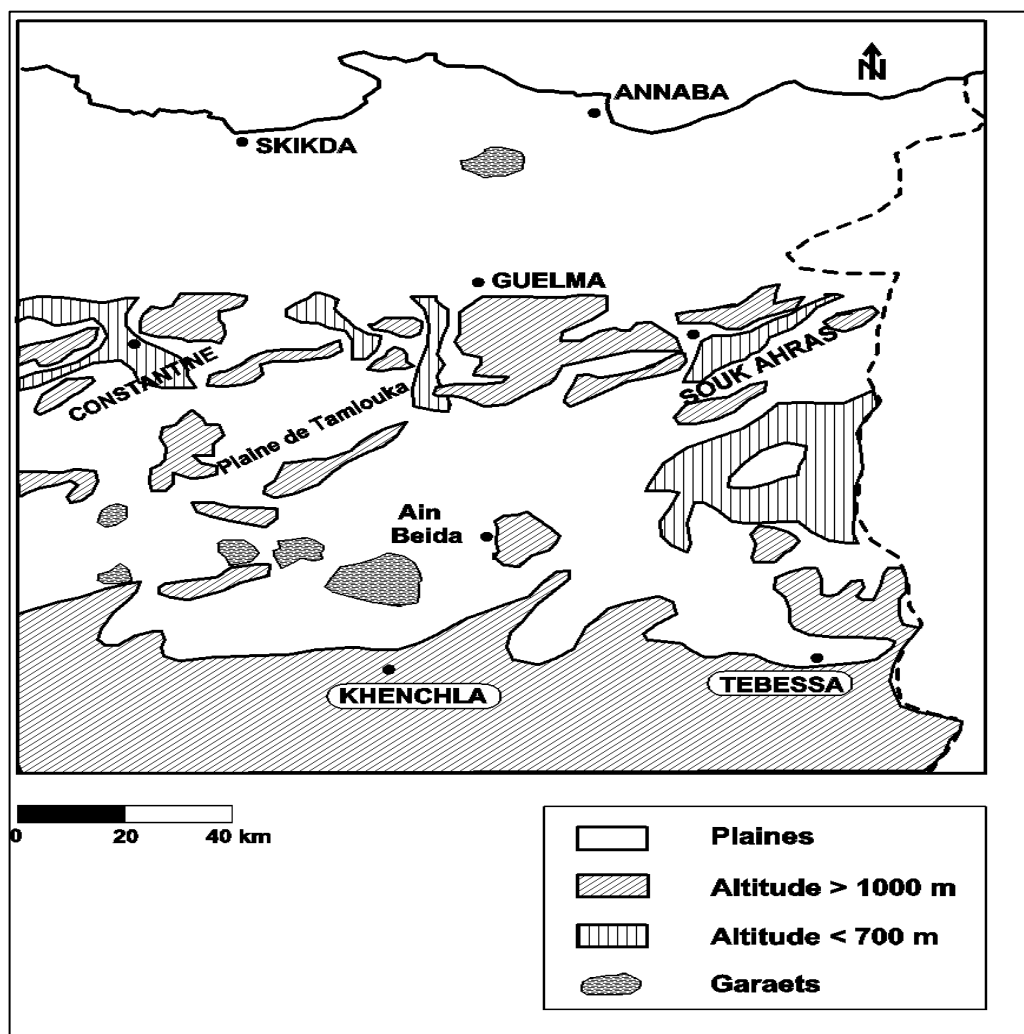


Figure 10 : Carte descriptive du relief de la plaine.

C- Climatologie

Les facteurs climatiques jouent un rôle important vis-à-vis les eaux souterraines où le bilan hydrologique d'une région dépend d'abord de son climat suivi de sa topographie et de sa géologie. Le climat de la région de Tamlouka est de type continental semi-aride, caractérisé par une variation saisonnière bien marquée. Il se manifeste par une longue période estivale sèche et chaude et une saison hivernale humide et froide. Notre zone d'étude ne comporte qu'une seule station qui ne dispose que d'un seul paramètre de pluviométrie. Pour comprendre le climat de la région on s'est référer sur deux stations météorologiques équipés pour calculer le bilan hydrique ; celle de Guelma et de Oum El Bouaghi.

Tableau 01: Station climatologiques utilisés dans l'étude du climat de la région.

Station	Coordonnées			Paramètres mesurés	Période d'observation
	Latitude	Longitude	Altitude (m)		
Guelma	36°27'23,75" N	7°28'44,91" E	223	Précipitation température évaporation	1990-2013
Oum El Bouaghi	35°51'36,80" N	7°07'49,30" E	888	Précipitation température évaporation vitesse vent humidité	1990-2013
Tamlouka	36°12'14,69" N	7°07'17,35" E	812	Précipitation	2011-2013

1- La température

La température constitue un facteur climatique très important, elle joue un rôle dominant dans l'estimation de l'évapotranspiration. En plus, la température influe aussi sur d'autres paramètres tels que l'enneigement et sa durée ainsi que la répartition de la végétation (Louamri, 2013). La période observée s'étend de 1990 à 2013. Les données du tableau 02 et les figures 11, 12 et 13 montrent :

- À l'échelle mensuelle, la température moyenne est élevée pendant la période sèche allant du mois de Juin à Septembre avec un maximum de l'ordre 26,23°C (station d'Oum El Bouaghi) et 29,63°C (station de Guelma) enregistré au mois de Juillet. Par contre, la période hivernale (Décembre à Février) est caractérisée par des valeurs plus basses varient de 6 à 10 °C avec un minimum pouvant atteindre 6,47 et 8,88 °C pour les stations d'Oum El Bouaghi et Guelma, observé au mois de Janvier.

Tableau 02 : Températures moyennes mensuelles en °C (1990-2013).

Station	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Oum El Bouaghi	6,47	6,9	10,16	12,87	17,51	23,1	26,23	25,88	21,67	17,17	10,89	7,25
Guelma	8,88	9,52	13,23	16,4	21,07	25,92	29,63	29,56	24,75	20,17	14,05	10,03

Source : O.N.M Oum El Bouaghi, Guelma (2013).

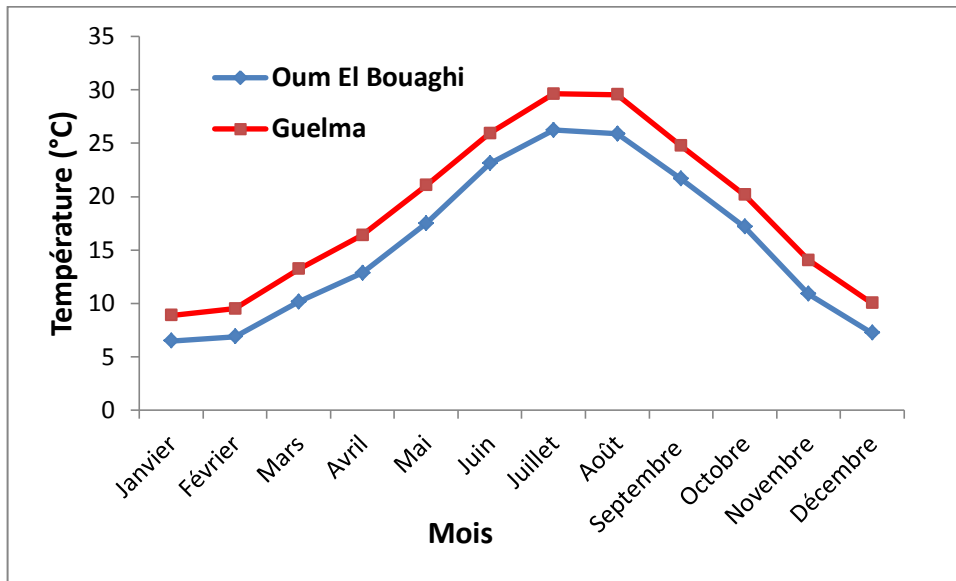


Figure 11 : Variation de la température moyenne mensuelle (1990-2013) pour les stations d'Oum El Bouaghi et Guelma.

- À l'échelle annuelle : les températures observées montrent une fluctuation thermique oscillent de 14,19 à 16,6 °C (station d'Oum El Bouaghi) et de 16,35 à 21,88 °C (station de Guelma). La moyenne annuelle est de l'ordre de 15,51 °C et 18,60 °C respectivement.

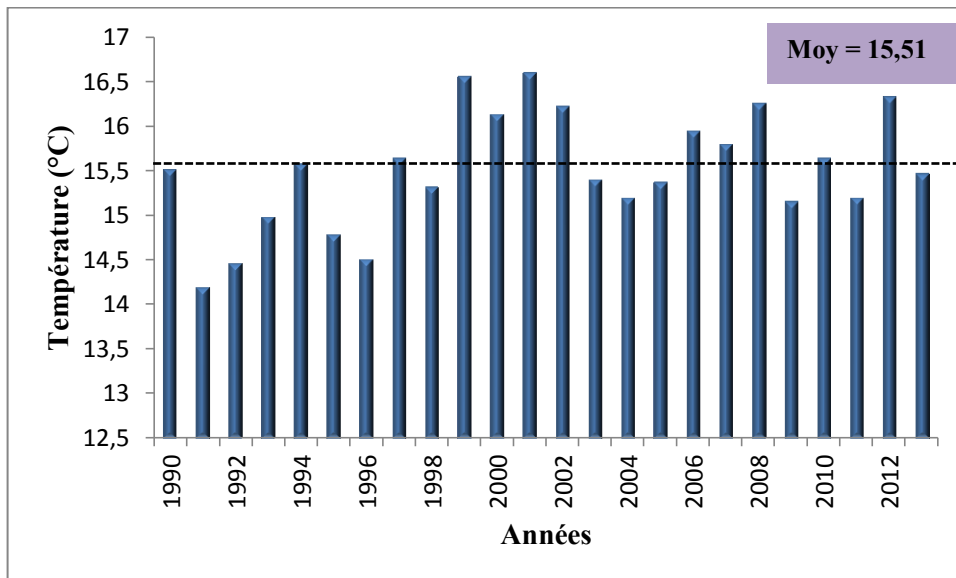


Figure 12 : Températures moyennes interannuelles à la station d'Oum El Bouaghi (1990-2013).

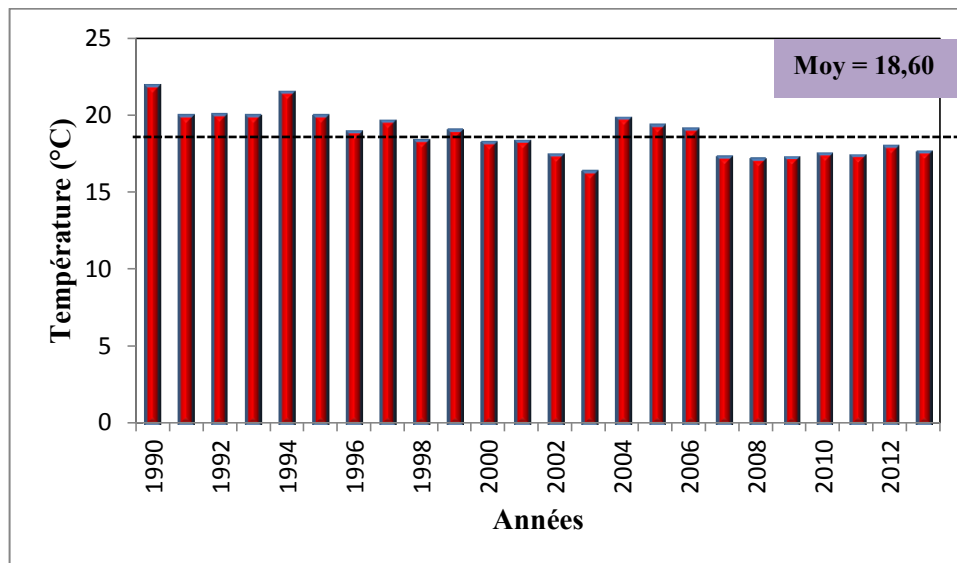


Figure 13 : Températures moyennes interannuelles à la station de Guelma (1990-2013).

2- La gelée

D’après Seltzer (1946), la gelée est un phénomène météorologique qui agit d’une façon négative sur la structure du sol (empêchement de l’aération). Le risque de la gelée blanche débute et demeure à un minimum moyen de température inférieur à 10 °C. Pour réaliser notre travail, nous nous sommes basé sur les données recueillies à la station d’Oum El Bouaghi.

Tableau 03 : Nombre de jours mensuels interannuel de gelée (1990-2013).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juit	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Gelée (jours)	12,2	8,66	4,04	0,7	0,04	0	0	0	0	0	2,45	7,83

Source :O.N.M Oum El Bouaghi (2013).

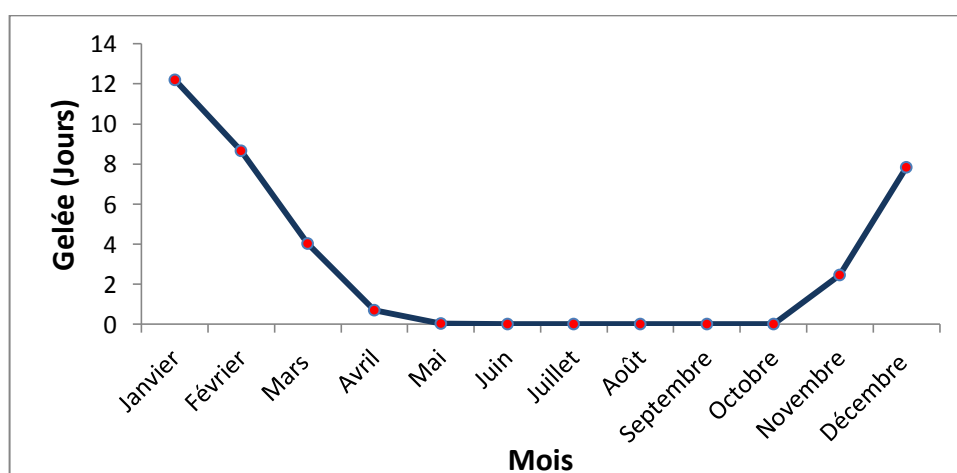


Figure 14: Nombre de jours mensuelle interannuelle de gelée - Station d’Oum El Bouaghi (1990-2013).

L'analyse des données du tableau 03 et la figure 14 montrent une absence totale de gelée blanche entre les mois du Juin à Octobre. Par contre les périodes allant du Janvier à Mai et de Novembre à Décembre se distinguent par des gelées avec un maximum de 12,2 jours obtenu au mois de Janvier. La moyenne annuelle est de 36 jours par an.

3- La neige

Selon les données de la station d'Oum El Bouaghi (1990-2013), la région a aperçu des jours enneigés pendant les périodes allant du mois de Janvier à Avril et de Novembre à Décembre avec un maximum de jours enneigées en Février avec 2.41 jours. Les données du tableau 04 et la figure 15 montrent une absence totale de la neige entre le mois du Mai et Octobre, ce qui correspond à une moyenne annuelle de 0,53 jour d'enneigement par an.

Tableau 04 : Nombre de jours mensuels interannuel de neige (1990-2013).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juit	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Neige (jours)	1,66	2,41	0,75	0,29	0	0	0	0	0	0	0,16	1,16

Source :O.N.M Oum El Bouaghi (2013).

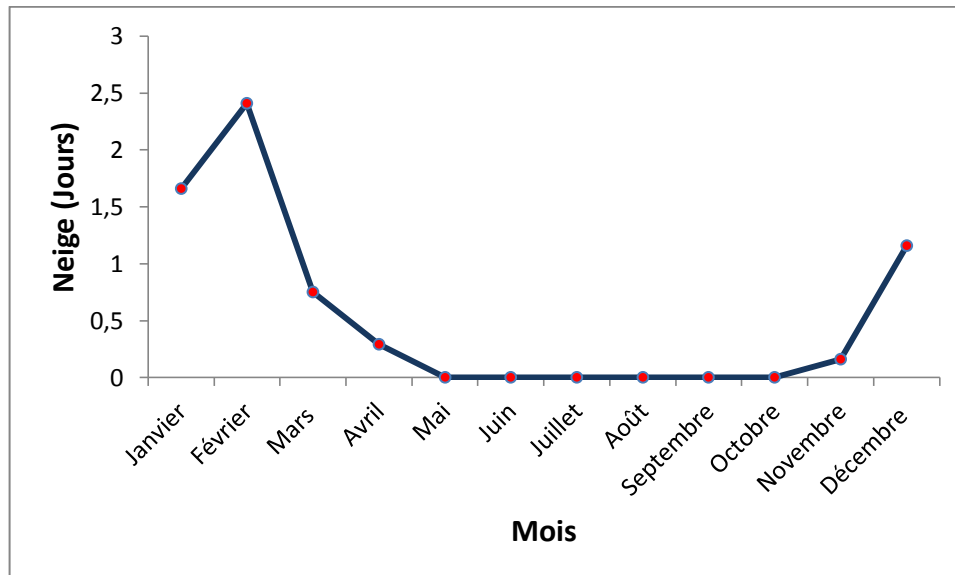


Figure 15: Nombre de jours mensuelle interannuelle de neige - Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013).

4- L'évaporation

L'évaporation se définit par la conversion de l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur quel que soit le facteur mis en jeu (vent, humidité,...etc.). Les données de l'évaporation mensuelle interannuelle sont des valeurs moyennes mensuelles mesurées au niveau de la station d'Oum El Bouaghi et la station de Guelma. Ces valeurs sont consignées dans le tableau 05, leur répartition est illustrée dans la figure 16. Ces derniers montrent une variation saisonnière bien notée avec une évaporation minimale de l'ordre 59,08 mm (station d'Oum El Bouaghi) et 35,42 mm (station de Guelma), observée au mois de Janvier (la période hivernale). Cependant, l'évaporation maximale est marquée pendant la période sèche avec une valeur de 303,87 mm (station d'Oum El Bouaghi) et 255,61 mm (station de Guelma) au mois de Juillet. L'évaporation moyenne annuelle est de l'ordre de 149,86 mm (station d'Oum El Bouaghi) et 116,65 mm (station de Guelma).

Tableau 05 : Evaporation moyenne mensuelle en mm (1990-2013).

Station	Jan	Fev	Mar	Avr	Mar	Jui	Juit	Août	Sep	Oct	N	Dec
Oum El Bouaghi	59,08	72,37	103,5	117,79	165,25	245,37	303,87	278,25	178	132,79	79,58	62,52
Guelma	35,42	40,34	66,78	84,6	131,99	199,33	255,61	239,36	149,21	101,19	57,66	38,31

Source :O.N.M Oum El Bouaghi, Guelma (2013).

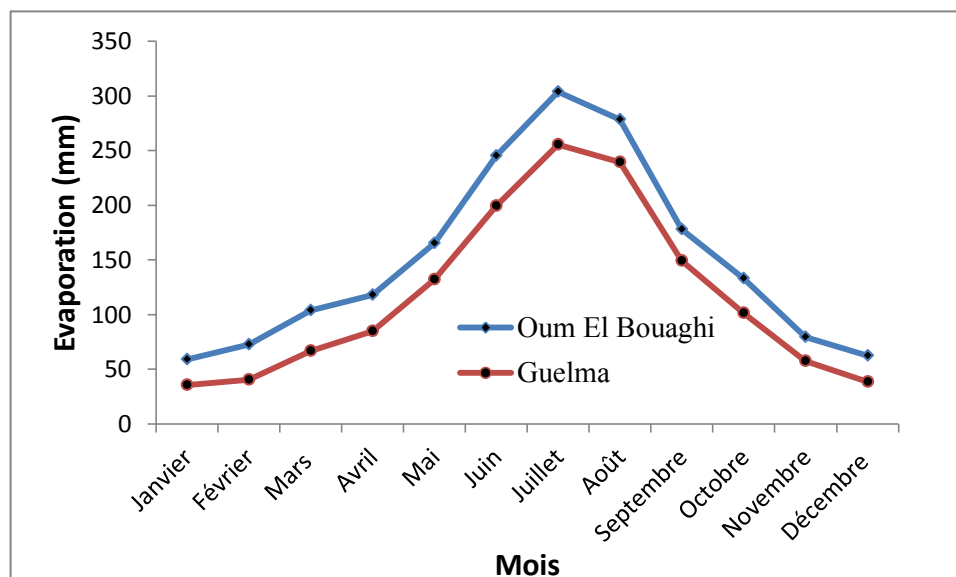


Figure 16 : Variation de l'évaporation moyenne mensuelle – Station : Oum El Bouaghi, Guelma (1990-2013).

5- Le vent

Le vent est un élément important dans la détermination du régime pluvieux, de l'évaporation et par conséquent du climat. Il joue un rôle déterminant de l'érosion, de transport et d'accumulation, ainsi que l'ensablement. Le tableau 06 et la figure 17 donnent un aperçu sur la vitesse des vents calculés au niveau de la station d'Oum El Bouaghi. Sur la région d'étude, il domine pendant la saison hivernale des vents froids humides ou secs de direction Nord- Ouest, tandis que la saison sèche domine des vents chauds et secs de directions Sud-Est et Sud- Sud-Ouest. La variation saisonnière de la vitesse du vent durant la période d'observation est assez constante avec une valeur maximale de 2,43 m/s observée pendant le mois d'Avril, alors que la valeur minimale 1,86 m/s est enregistrée au mois d'Octobre. Il est à signaler que le Sirocco se manifeste particulièrement aux mois de Juillet et Août de façon épisodiques augmentant la température.

Tableau 06 : Vitesse moyenne des vents (m/s) (1990-2013).

Station	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juit	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Oum El Bouaghi	1,92	2,21	2,17	2,43	2,2	2,25	2,23	2,13	2,33	1,86	2,07	2,20

Source :O.N.M Oum El Bouaghi (2013).

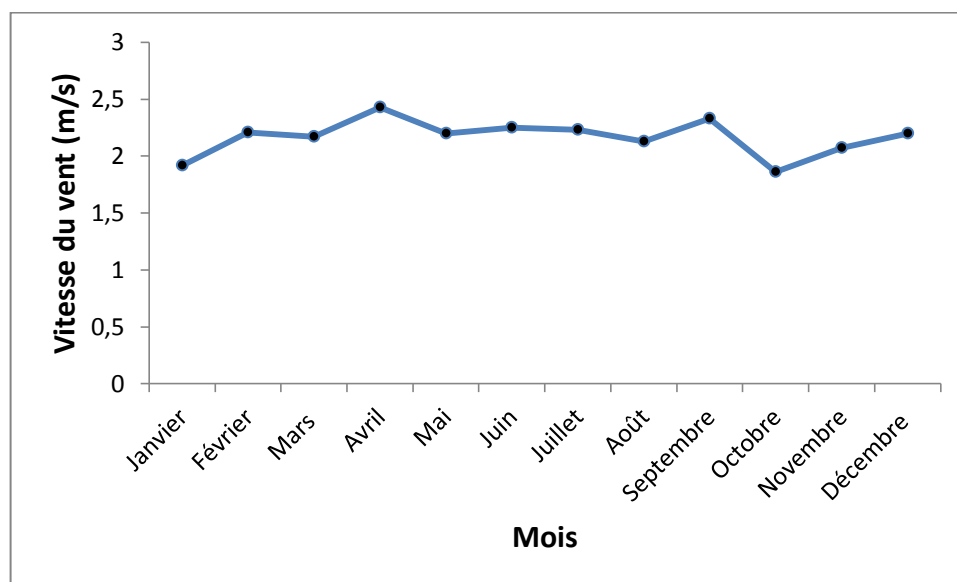


Figure 17 : Vitesse moyenne mensuelle des vents - Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013).

6- L'humidité relative

L'humidité relative, appelée aussi le degré hygrométrique est une caractéristique quantitative de l'humidité de l'air, mesure le rapport en pourcentage de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air à la pression de vapeur saturante qu'elle y aurait si elle se trouvait à l'état de saturation à la même température (Mostarih, 2006). Elle représente un facteur important conditionnant l'évaporation. Les résultats (tableau 07 et figure 18) montrent que l'amplitude des variations de l'humidité relative est très peu importante durant la saison froide avec un maximum de 78,87 % atteint au mois de Décembre. Par contre, elle diminue pendant la saison sèche et atteint une valeur minimale de 46,45 % au mois de Juillet.

Tableau 07 : Moyenne mensuelle de l'humidité relative (1990 - 2013).

Station	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juit	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Oum El Bouaghi	76,95	72,79	68,29	68,5	62,58	52,79	46,45	49,83	61,37	66,54	74,29	78,87

Source :O.N.M Oum El Bouaghi (2013).

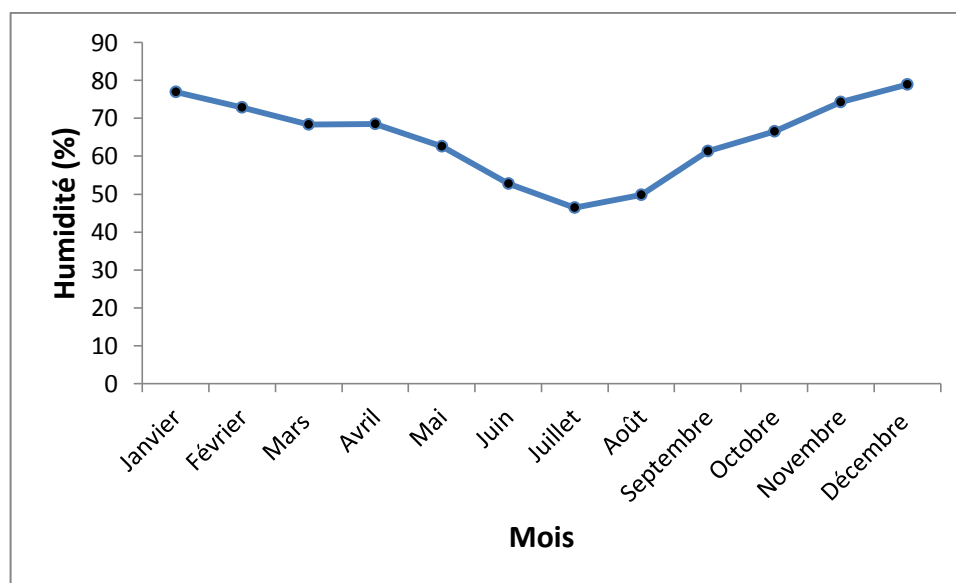


Figure 18 : Variations des moyennes mensuelles de l'humidité relative - Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013).

7- Les précipitations

Les précipitations désignent tout type d'eau qui tombe sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle), ainsi que les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux qui sont les bassins

versants, comme elles constituent un paramètre hydro-climatologique d'une grande importance dans leur fonctionnement (Bounouira, 2007).

7-1. Précipitation moyenne mensuelle

La répartition mensuelle des précipitations au cours de l'année influe aussitôt sur le régime des écoulements et les apports des nappes. Le tableau 08 et la figure 19 révèlent que le mois de Décembre est le plus pluvieux avec un maximum de 88,36 mm obtenu à la station de Guelma, par contre le mois de Juillet est considéré comme le plus sec avec un minimum de 2,2 mm enregistré à la station de Tamlouka.

Tableau 08 : Précipitation moyenne mensuelle.

Station	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juit	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Oum El Bouaghi	40,77	29,45	31,8	37,67	49,29	19,6	11,65	25,37	41,95	26,65	36,38	36,1
Guelma	80,99	68,27	60,82	55,52	50,09	17,18	4,28	12,65	39,78	41,47	70,16	88,36
Tamlouka	31,33	82,66	35,83	39,66	35,33	20,66	2,2	23,66	12,66	66	28,83	21,16

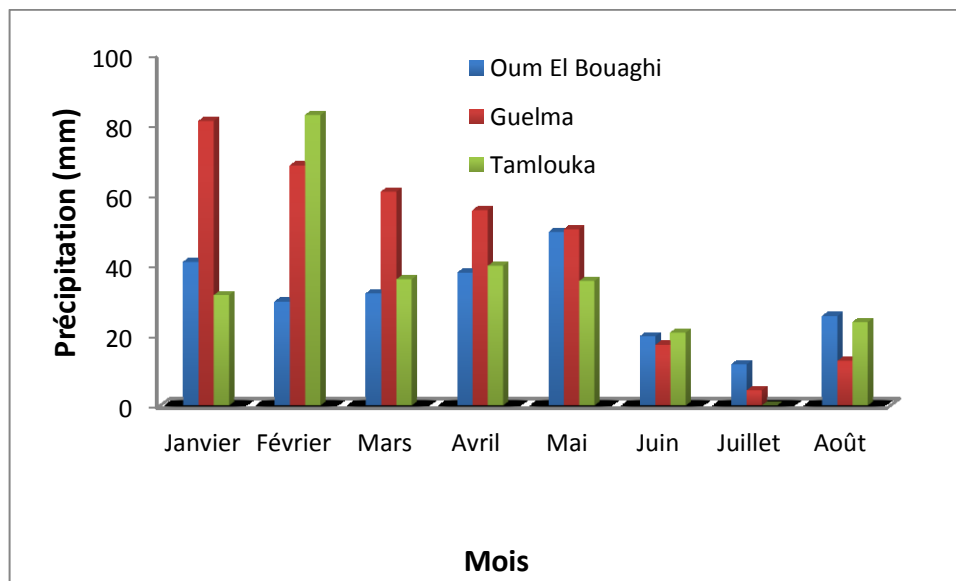


Figure 19 : Variation des précipitations moyennes mensuelles.

Le coefficient de variation représente le rapport de l'écart type sur la moyenne des précipitations enregistrées. Il mesure la dispersion relative d'une série.

$$C_v = \frac{\sigma_x}{\bar{x}}$$

Avec :

C_v : Coefficient de variation.

σ_x : Écart –type de la série donnée.

\bar{X} : Pluviométrie moyenne pour une période de n année.

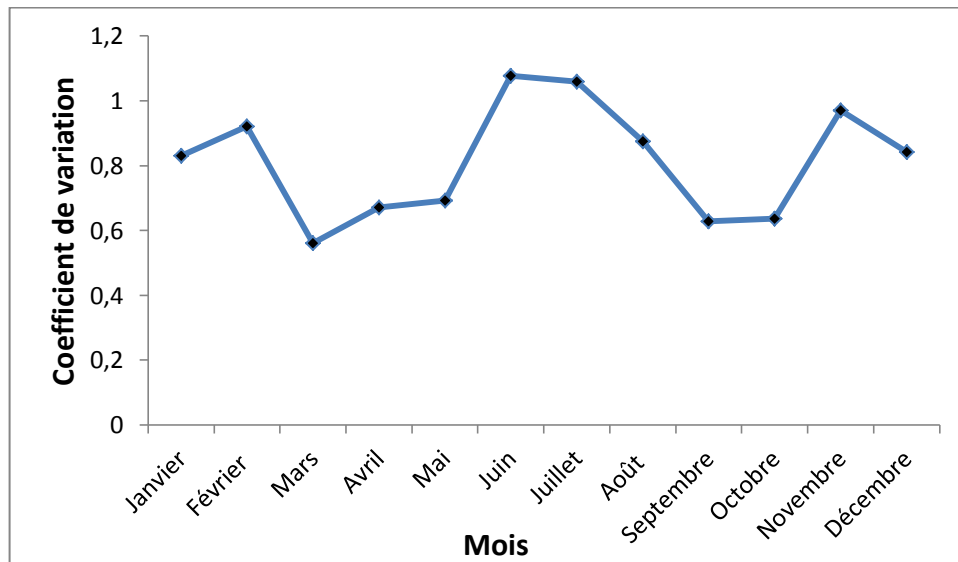


Figure 20: Coefficient de variation des précipitations moyennes mensuelles - Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013).

D'après la figure 20, la série de données la plus longue est celle de la station d'Oum El Bouaghi. Le calcul de coefficient de variation montre des valeurs plus fortes pour la saison sèche (Juin et Juillet) avec un maximum de 1,07 obtenu au mois de Juin. Cette fluctuation peut être expliquée par la faiblesse des précipitations estivales. La valeur la plus faible est enregistrée au mois de Mars dont le coefficient de variation atteint 0,56. Cette valeur obtenue peut être justifiée par l'homogénéité des précipitations.

7-2. Précipitation moyenne annuelle

L'analyse de la courbe des variations inter annuelles des précipitations des stations d'Oum El Bouaghi et Guelma pendant la période 1990-2013 (Fig. 21), montre que les années 2004 et 2003 sont les plus pluvieuses avec un maximum atteint 955,8 mm/an obtenu à Guelma, alors que les années 1994 et 2008 sont considérées comme les plus sèches avec une valeur minimale de 185,2 mm/an atteint à Oum El Bouaghi, sachant que la moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 386,72 mm/an pour la station d'Oum El Bouaghi et de 589,62 mm/an pour la station de Guelma.

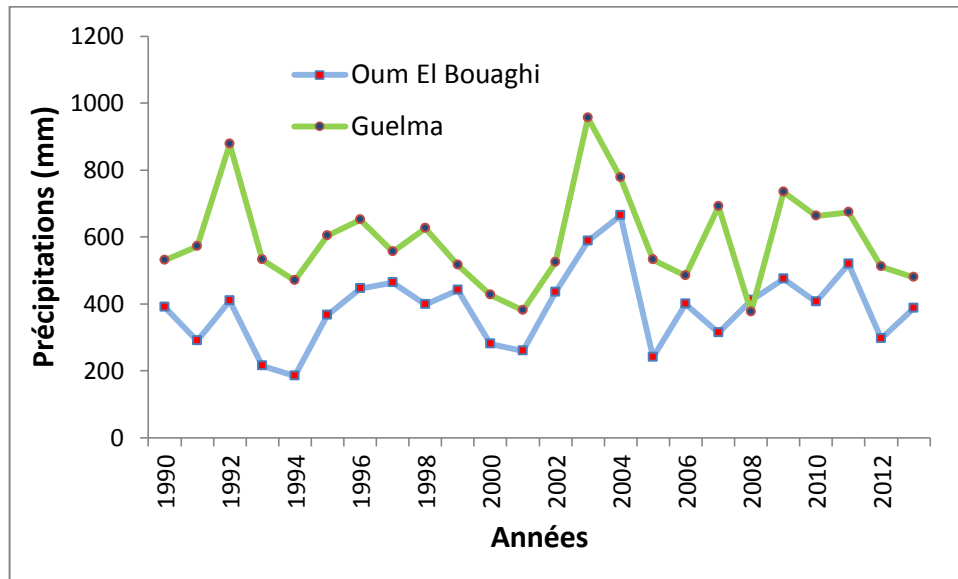


Figure 21: Variation interannuelle des précipitations pour les stations d’Oum El Bouaghi et Guelma (1990-2013).

Le coefficient pluviométrique représente le rapport de la pluviométrie d’une année à la pluviométrie moyenne pour une station donnée. Plus ce coefficient est grand ($H > 1$) plus l’année correspondante est excédentaire (Maoui, 2007). Mathématiquement, il se traduit par l’équation :

$$H = \frac{H_i}{\bar{H}}$$

Avec :

H : Coefficient pluviométrique.

H_i : Pluviométrie de l’année donnée.

\bar{H} : Pluviométrie moyenne pour une période de n année.

L’observation de la figure 22 a confirmé que les années 2004 et 2003 sont les années excédentaires avec un coefficient pluviométrique $H = 1,74$ pour la station d’Oum El Bouaghi et $H = 2,17$ pour la station de Guelma, alors que les années 1994 et 2008 sont les plus déficitaires où le coefficient pluviométrique $H < 1$.

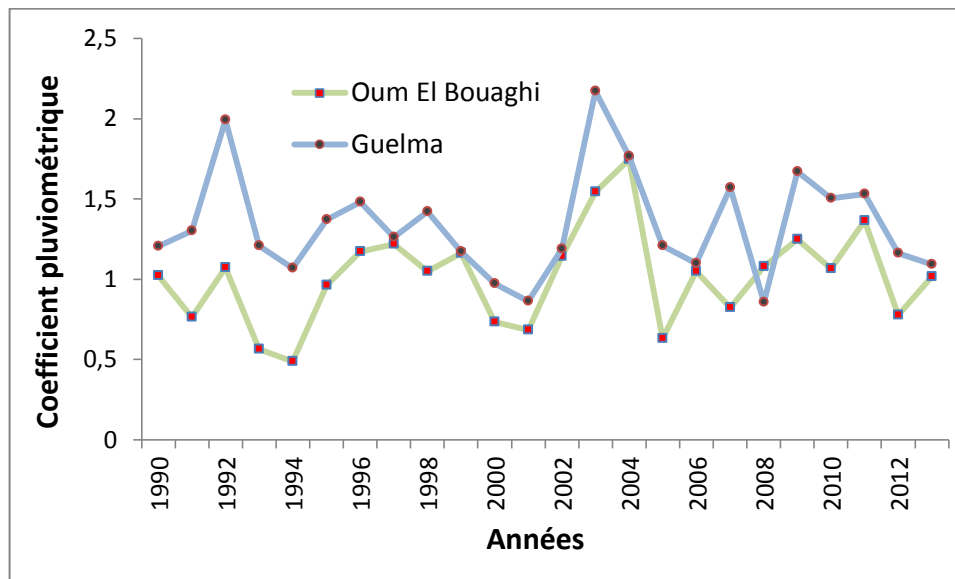


Figure 22 : Variation du coefficient pluviométrique - Stations de: Oum El Bouaghi, Guelma (1990-2013).

7-3. Répartition saisonnière des précipitations

La subdivision des pluies de l'année pour chaque saison est faite suivant les saisons agricoles (Automne : (Sep, Oct, Nov), Hiver : (Déc, Jan Fév), Printemps : (Mar, Avr, Mai), Été : (Jui Juill, Aou). On observant le tableau 09 et la figure 23, nous voyons que les deux saisons printanière et hivernale sont les plus pluvieuses avec des précipitations de l'ordre de 225,08 mm soit 58,2 %, 404,04 mm soit 68,52 % et 245,97 mm soit 62,74 % des pluies annuelles pour les stations d'Oum El Bouaghi, Guelma et Tamlouka respectivement. On note que la saison estivale est la plus sèche pour les trois stations avec un minimum de 34,11 mm soit 5,78 % obtenu à la station de Guelma.

Tableau 09 : Répartition saisonnière des précipitations.

Saisons		Automne		Hiver		Printemps		Été	
Stations	Période	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Oum El Bouaghi	90/2013	104,98	27,14	106,32	27,49	118,76	30,70	56,62	14,64
Guelma	90/2013	151,41	25,67	237,61	40,29	166,43	28,22	34,11	5,78
Tamlouka	2011/2013	107,49	27,42	135,15	34,47	110,82	28,27	38,52	9,82

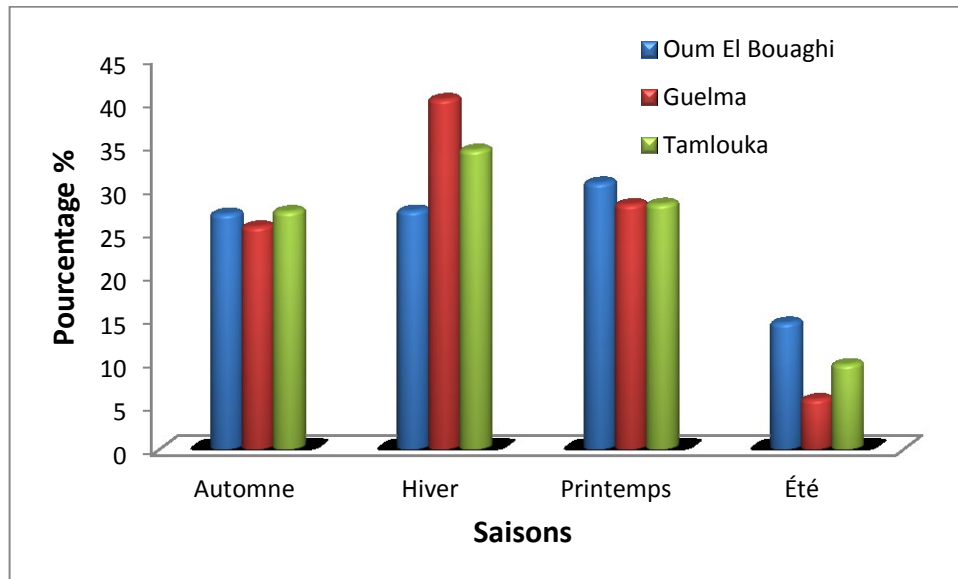


Figure 23: Répartition saisonnière des précipitations pour les stations d'Oum El Bouaghi, Guelma et Tamlouka.

7-4. Analyse statistique des précipitations

7-4-1. Ajustement des précipitations annuelles à une loi de Gauss

Pour mieux comprendre l'irrégularité des précipitations annuelles qui joue un rôle important sur les écoulements, nous avons procédé à l'ajustement des pluies annuelles à une loi Normale ou loi de Gauss. Pour cela on a pris l'exemple de la station d'Oum El Bouaghi sur une série de 23 ans (1990-2013).

La loi normale de Gauss admet pour fonction de répartition

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{1}{2}u^2} du \quad \text{où} \quad u = \frac{H - \bar{H}}{\sigma_H}$$

Avec :

H : Pluviométrie de l'année considérée.

$F(x)$: La probabilité pour que la variable aléatoire H soit inférieure à \bar{H} .

σ_H : Écart-type de l'échantillon considéré.

\bar{H} : Pluviométrie moyenne pour une période de n années.

Pour procéder à la vérification graphique de la bonne adéquation de la loi de Gauss, il faut au préalable évaluer les fréquences expérimentales des différentes observations. Les valeurs de l'échantillon sont rangées par ordre croissant et la fréquence expérimentale au non dépassement sera estimée par la relation suivante :

$$F(H_i \%) = \frac{i - 0,5}{n}$$

Avec :

i : numéro du rang

n : taille de l'échantillon.

La figure 24 et le tableau 10 présentent la disposition des 23 points des modules pluviométriques en face de leurs fréquences expérimentales.

Tableau 10 : Fréquences expérimentales au non dépassement

Année	i (rang)	Hi (mm)	F (Hi)%	Année	i (rang)	Hi (mm)	F (Hi)%
1994	1	185,20	2,17	2006	13	399,50	54,34
1993	2	214,3	6,52	2010	14	405,70	58,69
2005	3	239,90	10,86	1992	15	409	63,04
2001	4	260	15,21	2008	16	410,90	67,39
2000	5	280	19,56	2002	17	434,50	71,73
1991	6	290,6	23,91	1999	18	442	76,08
2012	7	296,10	28,26	1996	19	446	80,43
2007	8	313,70	32,60	1997	20	464	84,78
1995	9	366,50	36,95	2011	21	519,60	89,13
2013	10	386,80	41,30	2003	22	588,50	93,47
1990	11	389,70	45,65	2004	23	665	97,82
1998	12	399	50				

Les caractéristiques empiriques de l'échantillon sont :

- La moyenne $\bar{H} = \frac{\sum H_i}{n} = 386,72 \text{ mm}$
- L'écart type $\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum (H_i - \bar{H})^2}{n - 1}} = 114,72 \text{ mm}$
- La variance $\sigma^2 = 13162,123$
- Le coefficient de variation = 0,29

Le coefficient de variation est inférieur à 0.5, l'échantillon possède une distribution normale, donc l'application de la loi de Gauss est possible.

A partir de H et \bar{H} , on peut tracer la droite théorique de Henry qui représente la courbe de Gauss sur le papier à probabilité normale à l'aide de deux valeurs quelconques (Figure 25).

$$- F(H) = 0.5 \longrightarrow u = 0$$

$$D'où : \frac{H - \bar{H}}{\sigma_H} = 0 \longrightarrow H = \bar{H} = 386.72 \text{ mm}$$

$$- F(H) = 0.99 \longrightarrow u = 2.33$$

$$D'où : \frac{H - \bar{H}}{\sigma_H} = 2.33 \longrightarrow H = \bar{H} + 2.33\sigma_H$$

$$H = 386,72 + 2,33 (114,72) = 654,01.$$

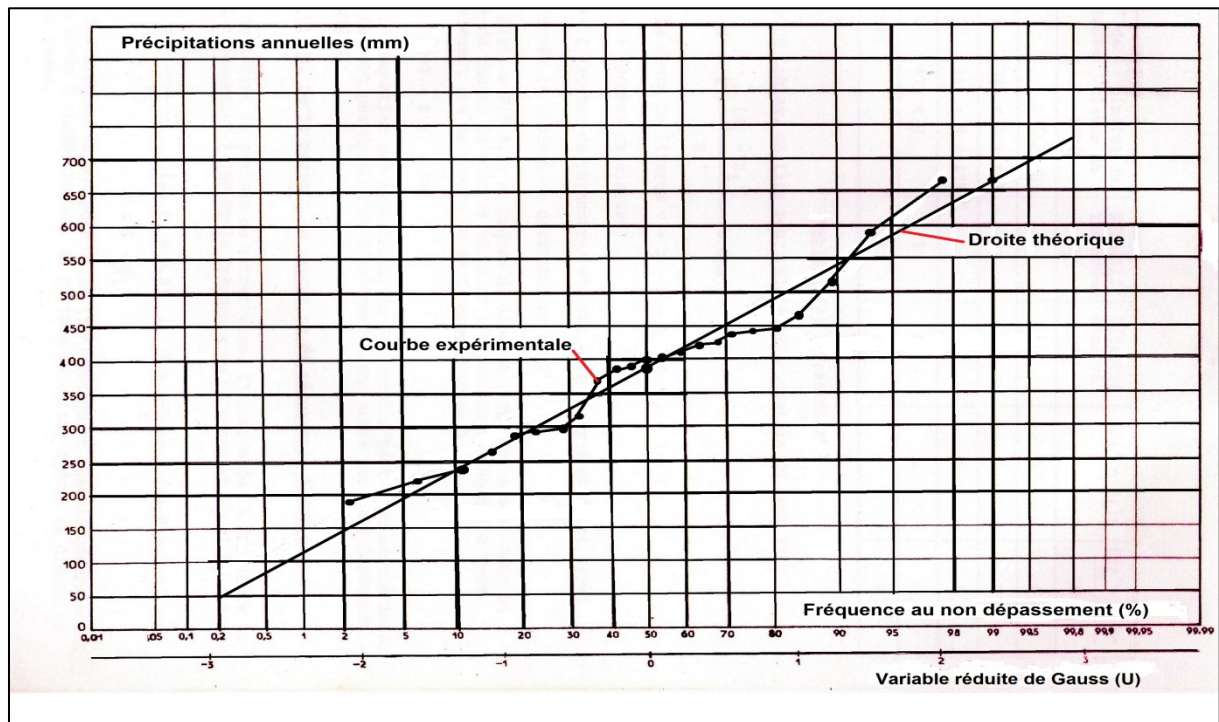


Figure 24: Ajustement des précipitations moyennes annuelles à une loi de Gauss – Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013).

La figure 24 montre que la droite de Henry est bien placée au milieu des points ce qui confirme le calcul exact des caractéristiques empiriques.

7-4-2. Application du test χ^2 de K. Pearson

Le test K. Pearson aussi appelé le test du khi-deux (χ^2) permet de juger de la qualité de l'ajustement d'une distribution théorique à une distribution expérimentale (Sari Ahmed, 2002). Pour procéder à ce test, on doit découper l'échantillon de 23 éléments en quatre classes pour les valeurs correspondantes aux fréquences : 0,282 ; 0,586 et 0,847.

Tableau 11 : Test χ^2

Classe	Limites des classes (mm)	Effectif réel (n_i)	Effectif théorique ($n_{i'}$)
1	$158,2 < H \leq 300$	7	5
2	$300 < H \leq 400$	6	5
3	$400 < H \leq 500$	7	5
4	$500 < H$	3	5

A partir de ce tableau, on tire comme valeur expérimentale du test χ^2

$$\chi = \frac{\sum (n_i - n_{i'})^2}{n_{i'}} = 2.2$$

Le degré de liberté : $\nu = k - p - 1$ avec $k = 4$ (nombre de classe) et $p = 2$ nombre de paramètres ajustés (moyennes et écart-type).

Donc : $\nu = 4 - 2 - 1 = 1$

D'après le tableau de distribution de χ^2 :

$P(\chi^2) = P(2,2)$ a un degré de liberté inférieur à 0.1. Donc on a 90 % de chance de voir l'hypothèse vérifiée d'adéquation mais également 10% de chance de se tromper.

$$90 \% < P(\chi^2) < 10 \%$$

Donc l'adéquation est satisfaite et la loi normale choisie s'ajuste à notre échantillon mais ce qui ne veut pas dire qu'un ajustement à une autre loi soit forcément mauvais.

*** Calcul de la période de retour ou de récurrence théorique**

La période de retour peut être définie comme l'inverse de la fréquence au non dépassement. Mathématiquement on peut écrire :

- $T = \frac{1}{F_1}$ si $F_1 < 0.5$

- $T = \frac{1}{F}$ si $F_1 > 0.5$ avec $F = 1 - F_1$

Où : T : période de retour (an).

F_1 et F : Fréquence au non dépassement (an^{-1}).

* En 1993/1994 : la hauteur enregistrée des pluies annuelles est minimale égale à 185,2 mm ce qui correspond à une variable :

$$u_{1993-1994} = \frac{H_{1993-1994} - \bar{H}}{\sigma_H} = -1.75$$

Pour $u = -1.75 \longrightarrow F_1 = 0.040$

$$T = \frac{1}{0.040} = 25 \text{ ans.}$$

- Donc à chaque 25 ans on peut rencontrer une pluie inférieure à celle observée en 1993-1994 (185.2 mm).

* En 2003-2004, on a enregistré une pluviométrie maximale égale à 665 mm, ce qui correspond à une variable :

$$u_{2003-2004} = \frac{H_{2003-2004} - \bar{H}}{\sigma_H} = 2.42$$

Pour $u = 2.42 \longrightarrow F_1 = 0.992$

$$T = \frac{1}{1-0.992} = 125 \text{ ans.}$$

- Donc en moyenne tous les 100 ans qu'on peut rencontrer une pluviométrie supérieure à celle de l'année 2003-2004 à la station d'Oum El Bouaghi.

7-4-3. la régression linéaire

L'analyse de la corrélation permet d'étudier et de mesurer l'intensité de la liaison linéaire entre deux variables. Dans notre cas il sera établi les précipitations moyennes annuelles des stations (Oum El Bouaghi, Guelma et Tamlouka). La droite de régression Y en X est définie comme étant la droite qui s'ajuste le mieux aux observations.

$$Y = ax + b$$

Avec a : la pente de la droite obtenue

b : l'ordonnée à l'origine

r : coefficient de corrélation

$$\text{Où : } a = \frac{\sum_i^n (x_i y_i) - n\bar{x}\bar{y}}{(n-1)\sigma_x^2}, b = \bar{y} - r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \bar{x}, r = \frac{\sum_i^n (x_i y_i) - n\bar{x}\bar{y}}{(n-1)\sigma_x \sigma_y}$$

D'après les figures 25 et 26, on note que la station de Guelma située à une distance de 100 km par rapport à celle d'Oum El Bouaghi se corrèle moins bien avec cette dernière ($r = 0,60$), par contre il existe une bonne corrélation entre les stations d'Oum El Bouaghi et la station de Tamlouka ($r = 0,91$).

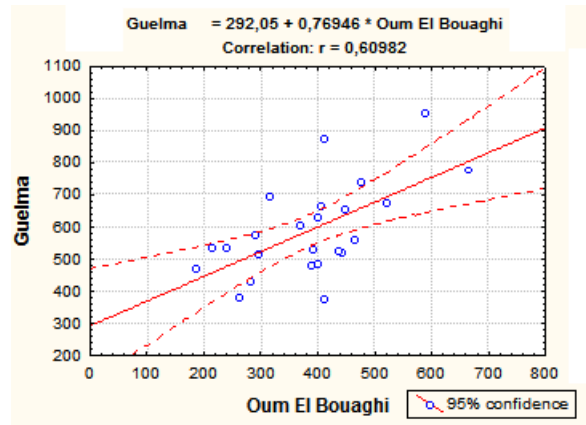


Figure 25 : Corrélation linéaire (station Oum El Bouaghi-Guelma).

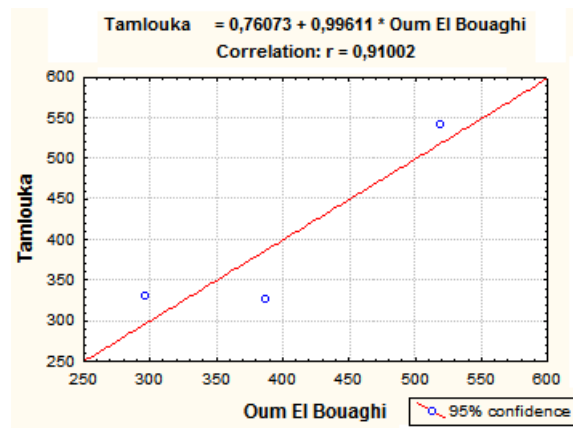


Figure 26 : Corrélation linéaire (station Oum El Bouaghi-Tamlouka).

8- Evapotranspiration

L'évapotranspiration est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique, elle représente la somme de l'évaporation directe qui s'effectue à partir des sols humides et des différents plans d'eau, et aussi de la transpiration des végétaux. On distingue :

- L'évapotranspiration réelle qui représente l'eau réellement perdue par celle-ci sous forme de vapeur.
- l'évapotranspiration potentielle qui est l'eau susceptible d'être perdue dans les mêmes conditions quand elle n'est plus facteur limitant (Bouchet, 1963).

L'évaluation de ces paramètres est effectuée par des formules empiriques :

8-1. La formule de Turc (moyenne annuelle)

Elle permet d'évaluer directement l'évapotranspiration réelle annuelle d'un bassin à partir de la hauteur annuelle de pluie et de la température moyenne annuelle :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec :

P : précipitation moyenne mensuelle.

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3.$$

T : température moyenne annuelle (°C).

ETR : évapotranspiration réelle (mm).

Les résultats sont consignés dans le tableau 12 :

Tableau 12 : Calcul de l'ETR par la formule de Turc (annuel).

Station	P (mm)	T °C	L	ETR (mm/an)
Oum El Bouaghi	386,72	15,51	874,3	369,46
Guelma	589,62	18,6	1086,74	539,54

8-2. La méthode de l'eau de C.W.Thornthwaite

C'est une méthode du bilan hydrique du sol, dans laquelle on estime la réserve en eau facilement utilisable (RFU) exprimée en mm de hauteur d'eau. La quantité d'eau maximum stockée par le sol dépend, pour sa saturation, de la nature, de la composition lithologique et de l'épaisseur de la couche superficielle du terrain et du climat. Thornthwaite a admis que le sol est saturé quand il a absorbé une lame d'eau équivalente à 100 mm. Dans les zones arides ou semi-arides, cette valeur maximum peut être ramenée à 50 mm du fait que le sol n'est pas toujours saturé (Archambault et al., 1975). Pour notre cas on prend une RFU de 50 mm pour la station d'Oum El Bouaghi et 100 mm pour la station de Guelma. Le calcul de l'ETR par cette méthode dite du bilan de Thornthwaite dépend de la valeur de cette (RFU).

De ce fait, il existe deux cas (Debieche, 2002):

- Si pour un mois, $P \geq ETP$ on pose que l'ETP = l'ETR, la quantité d'eau qui reste ($P - ETR$) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum 100 mm et on aura dans ce cas un excédent en eau (Ex) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace (I) vers la nappe, soit sous forme de ruissellement (R).
- Si $P < ETP$, la valeur de $ETR = P + RFU$ jusqu'à égalisation avec l'ETP.
- Si la RFU est nulle, on aura un déficit agricole (Da) ; $Da = ETP - ETR$ et l'ETR ne pourra affecter que la quantité d'eau.

Donc :

- Si $P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$
- Si $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$

Tableau 13: Bilan d'eau par la méthode C.W Thornthwaite à la station d'Oum El Bouaghi (1990-2013).

Paramètres	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	totale
P (mm)	40,77	29,45	31,8	37,67	49,29	19,6	11,65	25,37	41,95	26,65	36,38	36,1	386,72
T°(C)	6,4	6,9	10,1	12,8	17,5	23,1	26,2	25,8	21,6	17,1	10,8	7,2	15,51
ETP (mm)	101,7	65,2	27,2	13,1	11,7	12,7	29,1	45,9	84	133,9	167,9	153,6	845,9
RFU (mm)	0	0	9,2	32,2	50	50	50	41,8	7,1	0	0	0	240,3
ETR (mm)	42	26,7	27,2	13,1	11,7	12,7	29,1	45,9	84	26,7	11,7	25,4	355,9
Déficit (mm)	59,7	38,5	0	0	0	0	0	0	0	107,2	156,2	128,2	490
Excédent (mm)	0	8,2	7,5	3,9	11,2	16,8	2,7	0	0	0	0	0	30,8

Tableau 14 : Bilan d'eau par la méthode C.W Thornthwaite à la station de Guelma (1990- 2013).

Paramètres	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	totale
P(mm)	39,78	41,47	70,16	88,36	80,99	68,27	60,82	55,52	50,09	17,18	4,28	12,65	589,62
T (°C)	24,75	20,17	14,05	10,03	8,88	9,52	13,23	16,4	21,07	25,92	29,63	29,56	18,6
ETP (mm)	115,3	72,3	31,2	15	12,7	14,2	33,2	54,3	98,4	149,7	198,6	184,9	979,9
RFU (mm)	0	0	38,9	100	100	100	100	100	51,7	0	0	0	590,6
ETR (mm)	39,8	41,5	31,2	15	12,7	14,2	33,2	54,3	98,4	68,9	4,3	12,7	426,2
Déficit (mm)	75,5	30,8	0	0	0	0	0	0	0	80,8	194,3	172,3	553,8
Excédent (mm)	0	0	0	12,2	68,3	54	27,6	1,2	0	0	0	0	163,4

Le bilan hydrique de Thornthwaite (Tableau 13, 14, Fig. 27 et 28) a montré que le déficit agricole (DA) se remarque à partir du mois de Juin et se poursuit au mois d'Octobre pour les deux stations de d'Oum El Bouaghi et de Guelma. La recharge de la RFU se reconstitue pendant le mois de Novembre et s'épuise au mois de Mai pour les deux stations d'Oum El Bouaghi et Guelma.

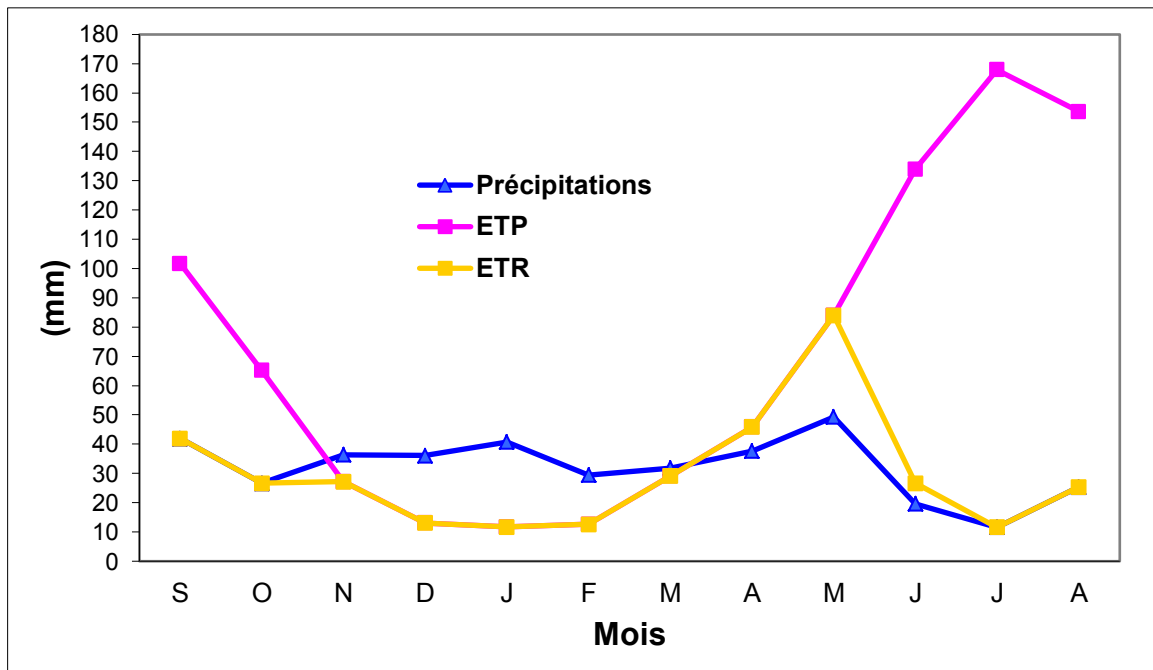


Figure 27: Bilan d'eau par la méthode de Cw.Thornthwaite (station : Oum El Bouaghi).

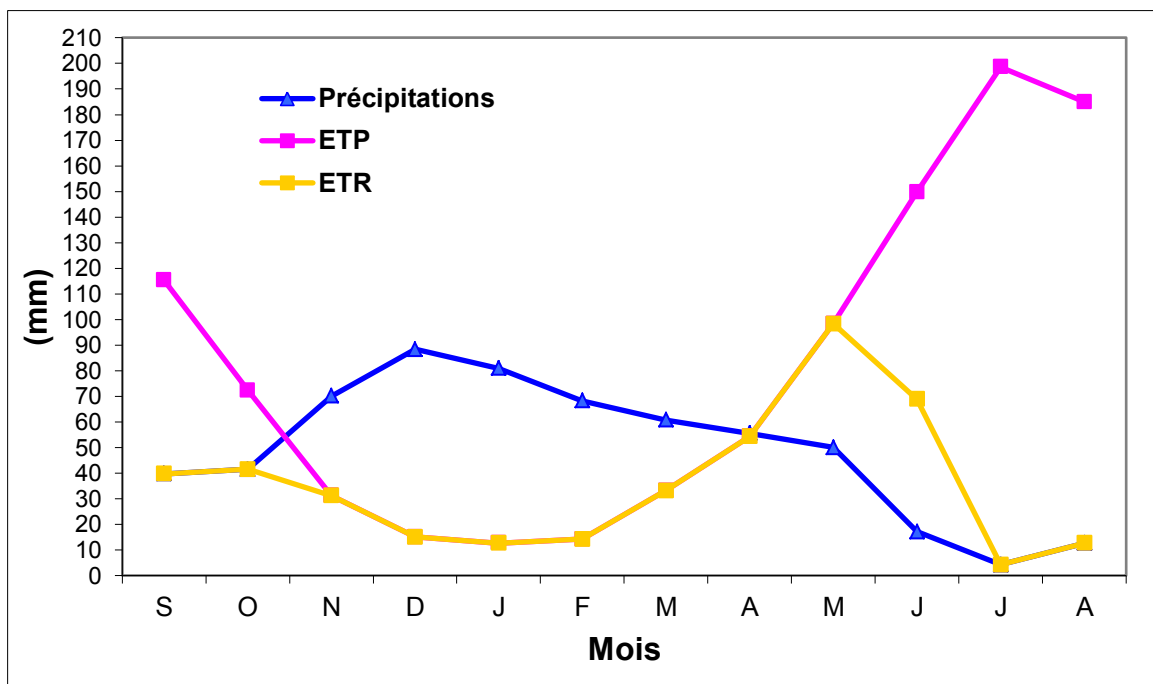


Figure 28: Bilan d'eau par la méthode de Cw.Thornthwaite (station : Guelma).

9- Estimation du ruissellement

Le ruissellement peut être défini comme un phénomène physique d'écoulement non organisé de l'eau sur un bassin versant suite à des chutes de pluies (Guiton, 1994). En 1961, Tixeront et Berkaloff ont donné une formule permettant de calculer une valeur approchée du ruissellement pour des précipitations ne dépassent pas les 600 mm :

$$R = \frac{P^3}{3ETP^2}$$

Avec :

R : ruissellement.

P : précipitations.

ETP : Evapotranspirations potentielle calculée par la méthode de Thornthwaite.

La formule de Tixeront-Berkaloff modifiée par Romantchouk en 1974 pour $P > 600$ mm, appliquée aux stations d'Oum El Bouaghi et Guelma a donné les résultats trouvés dans le tableau 15.

$$R = \frac{P^3}{3}$$

Où : P : précipitation moyennes en mètre, R : ruissellement en mètres cube.

Tableau 15 : Ruissellement par la formule de Tixeront-Berkaloff.

Stations	Tixeront-Berkaloff (mm/an)	Tixeront-Berkaloff modifié (mm/an)
Oum El Bouaghi	40,41	19,27
Guelma	71,15	68,32

10- Estimation de l'infiltration

Selon le bilan hydrologique, l'infiltration efficace peut être calculée par l'équation:

$$P = ETR + R + I$$

D'où : $I = P - ETR - R$

Avec :

I : infiltration (mm).

P : Précipitation annuelle moyenne (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle (mm).

R : Ruissellement (mm).

Tableau 16 : Bilan hydrologique.

Station	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Oum El Bouaghi	386,72	845,9	355,9	19,27	11,55
Guelma	589,62	979,9	426,2	68,32	95,1

D'après le bilan hydrologique (tableau 16), on note que :

- La station d'Oum El Bouaghi : pour une précipitation de 386,72 mm, on remarque une ETP très élevée de l'ordre de 845,9 mm et une ETR égale à 355,9 mm, contre des quantités d'eau de 19,27 mm ruisselées et 11,55 mm infiltrées.
- La station de Guelma : pour une précipitation de 289,62 mm, on note une ETP très élevée de l'ordre de 979,9 mm et une ETR égale à 426,2 mm, contre des quantités d'eau de 68,32 mm ruisselées et 95,1 mm infiltrées.

11- Rythme climatique

11-1. Diagramme pluviothermique

Les travaux de Bagnouls et Gaussen constituent l'une des plus importantes tentatives visant à mettre en relation le couvert végétal et les données climatiques. Le bilan hydrique annuel étant considéré comme déterminant pour la végétation, il importe de connaître la longueur de la saison sèche. Par définition sera biologiquement sec tout mois dont le total des précipitations P (mm) est égal ou inférieur au double de la température mensuelle moyenne exprimée en degré centigrade ($P \leq 2T$) (Bagnouls et Gaussen, 1953).

La représentation graphique de ce diagramme (Fig. 29 et 30) montre deux périodes, l'une chaude et sèche s'étale sur neuf mois, du mois de Mars jusqu'au mois de Novembre pour la station de Oum El bouaghi et sur sept mois du mois d'Avril jusqu'au mois d'Octobre pour la station de Guelma. L'autre période froide et humide s'étale sur trois mois, de Décembre

jusqu'au mois de février pour Oum El Bouaghi, et sur cinq mois du mois de Novembre jusqu'au mois de Mars.

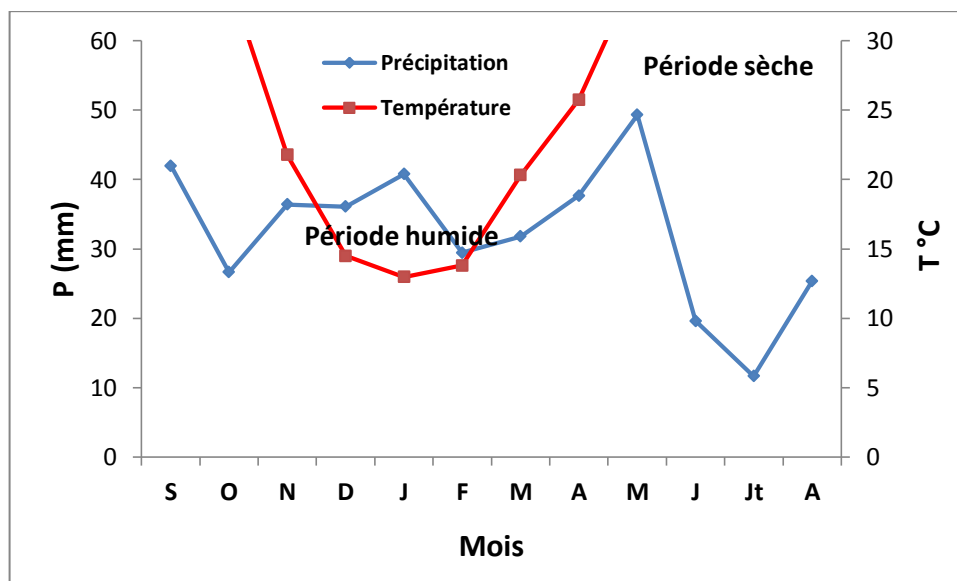


Figure 29 : Diagramme Ombrothermique - Station d'Oum El Bouaghi (1990-2013).

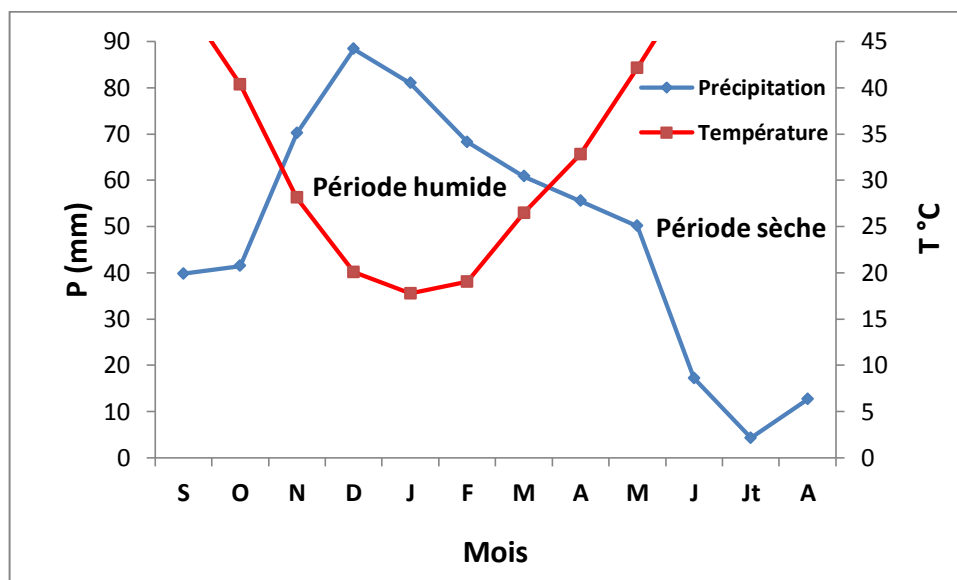


Figure 30 : Diagramme Ombrothermique - Station de Guelma (1990-2013).

11-2. Indice de De. Martonne

Pour définir le climat d'un bassin versant et évaluer son degré d'aridité, on fait appel à plusieurs indices, le plus utilisé est celui de De. Martonne (1923), établi en fonction des températures et des précipitations. Il est calculé par la formule suivante :

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

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

T : température moyenne annuelle (°C).

A : coefficient d'aridité.

Pour :

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

Pour le calcul de cet indice et en vue de l'absence des données à la station de Tamlouka, nous avons pris en considération les données climatiques des stations les plus proches celles d'Oum El Bouaghi et de Guelma. L'application numérique donne :

Station	Coefficient (A)
Oum El Bouaghi	15,15
Guelma	20,61

Donc la région d'étude appartient à un climat semi-aride caractérisé par une saison humide froide et une saison sèche chaude.

11-3. Climagramme d'EMBERGER

Le quotient pluviothermique " Q_2 " d'EMBERGER correspond à une expression synthétique subdivise le climat méditerranéen en cinq étages bioclimatiques, et capable de rendre compte de la sécheresse. Il est calculé à l'aide de la moyenne annuelle des précipitations (P en mm) et des températures. Pour cette dernière, elles sont prises en considération d'une part la moyenne des minimums du mois le plus froid "m", et d'autre part la moyenne des maximums du mois le plus chaud "M".

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

D'où :

M : Température maximale du mois le plus chaud (°K).

m : Température minimale du mois le plus froid (°K).

P : Précipitation moyenne annuelle.

La région d'Oum El Bouaghi et de Guelma présentent un $Q_2 = 51,57$ et $Q_2 = 64,99$ respectivement ce qui correspond l'étage bioclimatique semi-aride (Fig. 31).

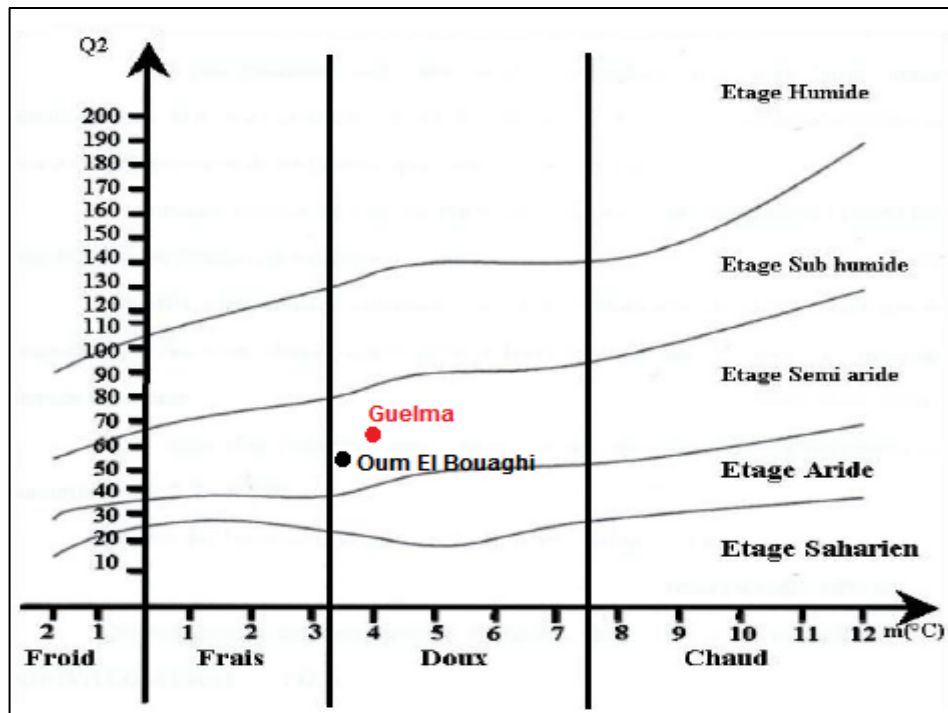


Figure 31 : Climagramme d'Emberger (Station : Oum El Bouaghi et Guelma).

Conclusion

La synthèse des données nous permet de conclure le suivant :

1- Les formations hydrogéologiques sont constituées par des calcaires fissurés du Jurassique avec des conglomérats qui les couvrent, et des calcaires Crétacé-Eocènes au Nord de la plaine et les bordures de la cuvette.

2- La région d'étude comprend, le Plio-quaternaire qui est une formation continentale composée essentiellement d'une croûte de calcaire, d'argile et parfois de sables et graviers. Trois domaines structuraux constituent la plaine: Le sillon Sellaoua apparaît dans la partie orientale formé de marne et peu de calcaire, le second domaine est la néritique qui apparaît dans la partie occidentale de la plaine au niveau des montagnes de Djaffa, caractérisé par une alternance de calcaire, de marne avec de l'argile et parfois de sable. Le troisième domaine

occupe la partie Nord de la plaine et se compose de marnes et de calcaires marneux avec le silex de l'âge Crétacé.

Le climat continental semi-aride de la région de Tamlouka est confirmé par le non homogénéité pluviométrique entre la saison sèche (faible précipitation) et la saison humide (forte précipitation) des deux stations d'Oum El Bouaghi et de Guelma; ce qui influe sur le bilan hydrique qui montre des valeurs très élevées de l'évapotranspiration réelle (99 % et 72 %), tandis que l'infiltration et le ruissellement représentent respectivement (2,98 et 16,12 %) et (4,98 et 14,63 %) des précipitations enregistrées. La période de recharge s'effectue au mois de Novembre et commence à s'épuiser au mois de Mai. L'ajustement à une loi Normale de Gauss des précipitations annuelles a montré une bonne adéquation et l'application de la méthode de la régression linéaire entre les stations d'Oum El Bouaghi, Guelma et Tamlouka a révélé une bonne corrélation entre la station d'Oum El Bouaghi et celle de Tamlouka.

Chapitre II : Étude hydrogéologique

A. Introduction

L'hydrogéologie constitue un outil de base pour la détermination des différents aquifères existants à l'échelle de la zone étudiée, pour comprendre le comportement des eaux souterraines (leur sens d'écoulement et perméabilité) et pour révéler les relations qui peuvent exister entre les différentes nappes. Pour pallier à l'insuffisance des informations, nous sommes basés sur les résultats des travaux de Djidel et Djorfi (1992).

B- Apports de l'étude géophysique

L'objectif de l'étude de notre terrain est de déterminer l'épaisseur du remplissage Mio-Plio-Quaternaire, la nature du substratum et les différents accidents qui peuvent affecter cette région. La prospection électrique a permis grâce aux mesures des résistivités des terrains rencontrées, de préciser la limite probable entre le remplissage conducteur et le substratum résistant. Pour aboutir à ceci, deux études géophysiques ont été effectuées dans la plaine de Tamlouka :

- La Compagne Générale de Géophysique (C.G.G) a entrepris une étude par prospection géophysique, où la méthode utilisée était celle du sondage électrique (quadripôle Schlumberger). Les opérations sur le terrain ont été réalisées à partir du 18 Juillet 1961 au 02 Janvier 1962. Au total, 186 sondages électriques ont été effectués dont 37 suivant deux directions orthogonales avec une longueur de ligne AB d'envoi de courant atteignant 8000 m.
- La deuxième étude a été faite par la société Algérienne de Géophysique (ALGEO). Les travaux ont été réalisés du 31 Mai 1979 au 22 Décembre 1979, avec un programme comportant 319 sondages électriques en AB = 1000 m, 26 Sud-Est en AB = 5000 m et 25 Sud-Est en AB = 2000 m.

Ces sondages électriques ont permis d'élaborer une carte en isopaches et quatre cartes d'isorésistivité apparente. Les buts assignés à la prospection électrique sont :

- Définir l'épaisseur du remplissage du Mio-Plio-Quaternaire de la plaine.
- Déterminer les différents aquifères.
- La corrélation entre les résultats géophysiques et les données géologiques.
- Montrer la localisation des accidents tectonique.

C- Essais de corrélation entre la géologie et la géophysique

La corrélation entre les données géologiques et les résultats géophysiques a permis de placer une échelle de résistivité des principaux types de roches dans la région. Le tableau 17 montre :

Les interactions grossières, sables, graviers ainsi que les conglomérats apparaissent négligeable, elles ne sont pas caractérisées par leurs propres valeurs de résistivité étant donné qu'elles disparaissent dans le milieu environnant argileux plus conducteur (6 à 10 ohm.m), ainsi que les conglomérats entre le milieu argileux plus conducteur et le milieu calcaireux plus résistant (100 à 300 ohm.m).

Tableau 17 : Corrélation entre la géologie et les résultats géophysiques.

Echelle des résistivités	Caractéristique lithologique	Étage
6 – 10 ohm.m	Argile sableuse + marnes + débris calcaires	Mio-Plio-Quaternaire
15 – 20 ohm.m	Argile sableuse + graviers et gravillons	
20 – 30 ohm.m	Calcaire marneux	Crétacé
80 – 100 ohm.m	Calcaire	Crétacé Eocène
100 – 300 ohm.m	Calcaire massif type Jurassique d'Ain Arko	

1- Les cartes d'isorésistivité apparente

1-1. Principe d'élaboration des cartes d'isorésistivité

Les cartes d'isorésistivité sont réalisées à partir des mesures de profils de résistivité, soit à partir des mesures de sondages électriques pour une longueur de ligne AB donnée. On reporte les valeurs de résistivités apparentes calculées de chaque sondage sur l'ensemble des profils déjà tracés sur un fond topographique et par la méthode d'interpolation on trace les courbes d'égale résistivité qui ont la particularité d'intéresser toute la région d'étude (Fig. 32, 33, 34, et 35).

1-2. Interprétation

L'examen de l'ensemble de ces cartes a confirmé les résultats connus par la géologie sur la nature argilo-marneuse du remplissage de la cuvette. L'extension des plages résistantes d'une carte à l'autre indique un prolongement en profondeur des affleurements crétacés et éocènes au Nord-Est, et surtout les calcaires Jurassiques d'Ain Arko qui semblent prolonger en profondeur en direction du Djebel Djaffa, impliquant un lien probable entre ces

formations. Seules les zones au Nord-Est de Tamlouka et le pourtour des collines d'Ain Arko décèlent un intérêt hydrogéologique par l'altération de la partie supérieure de ces calcaires. La plage conductrice de moins de 10 ohm.m et sa persistance même en $AB = 2000$ m, confirme la grande épaisseur argilo-marneuse du remplissage qui dépasse donc les 500 m. Les calcaires lacustres et les conglomérats ne semblent pas avoir une influence quelconque sur les cartes d'isorésistivité.

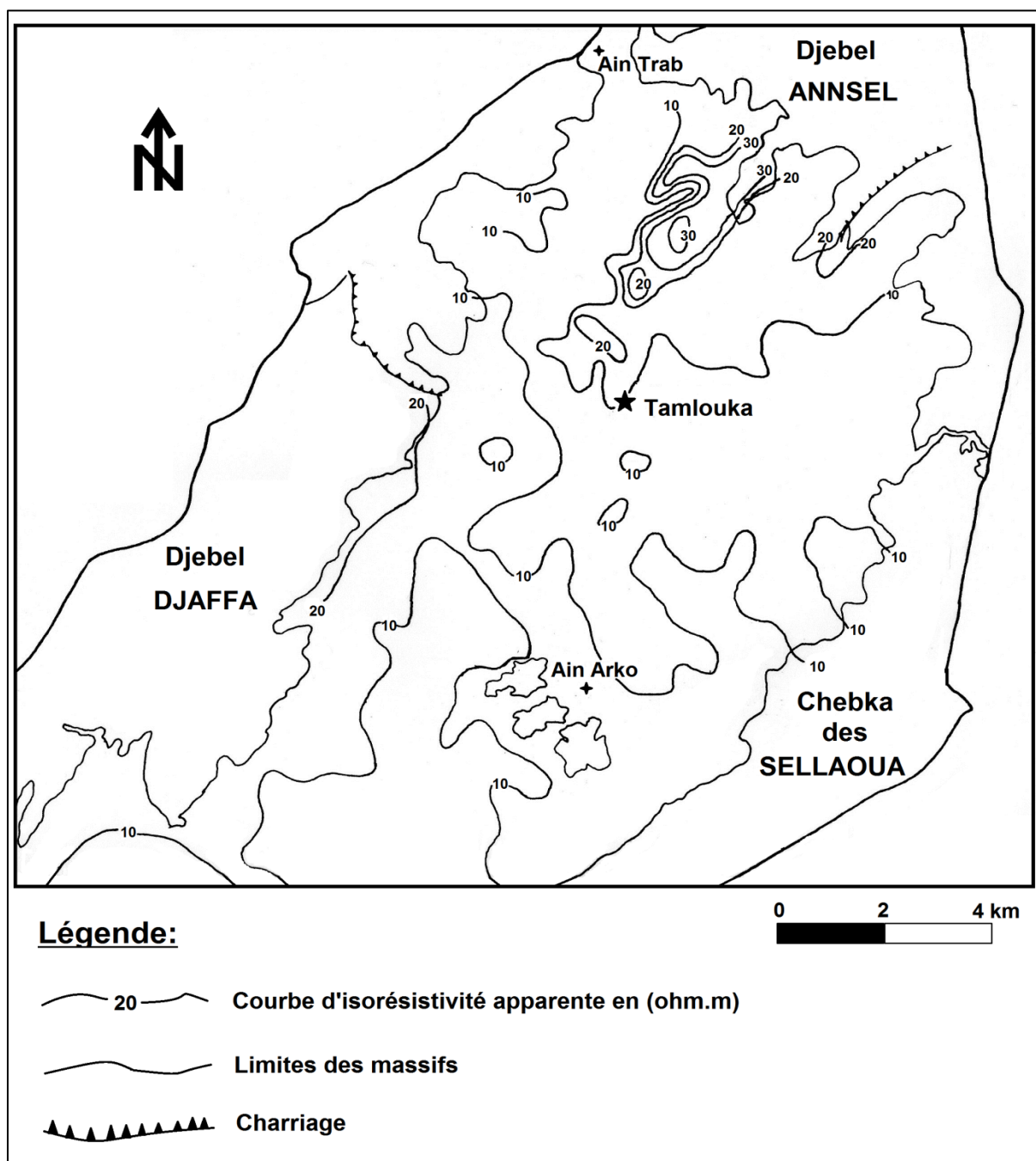


Figure 32 : Carte d'isorésistivités apparentes de la plaine de Tamlouka ($AB = 100$ m)
(in Djidel et Djorfí, 1992).

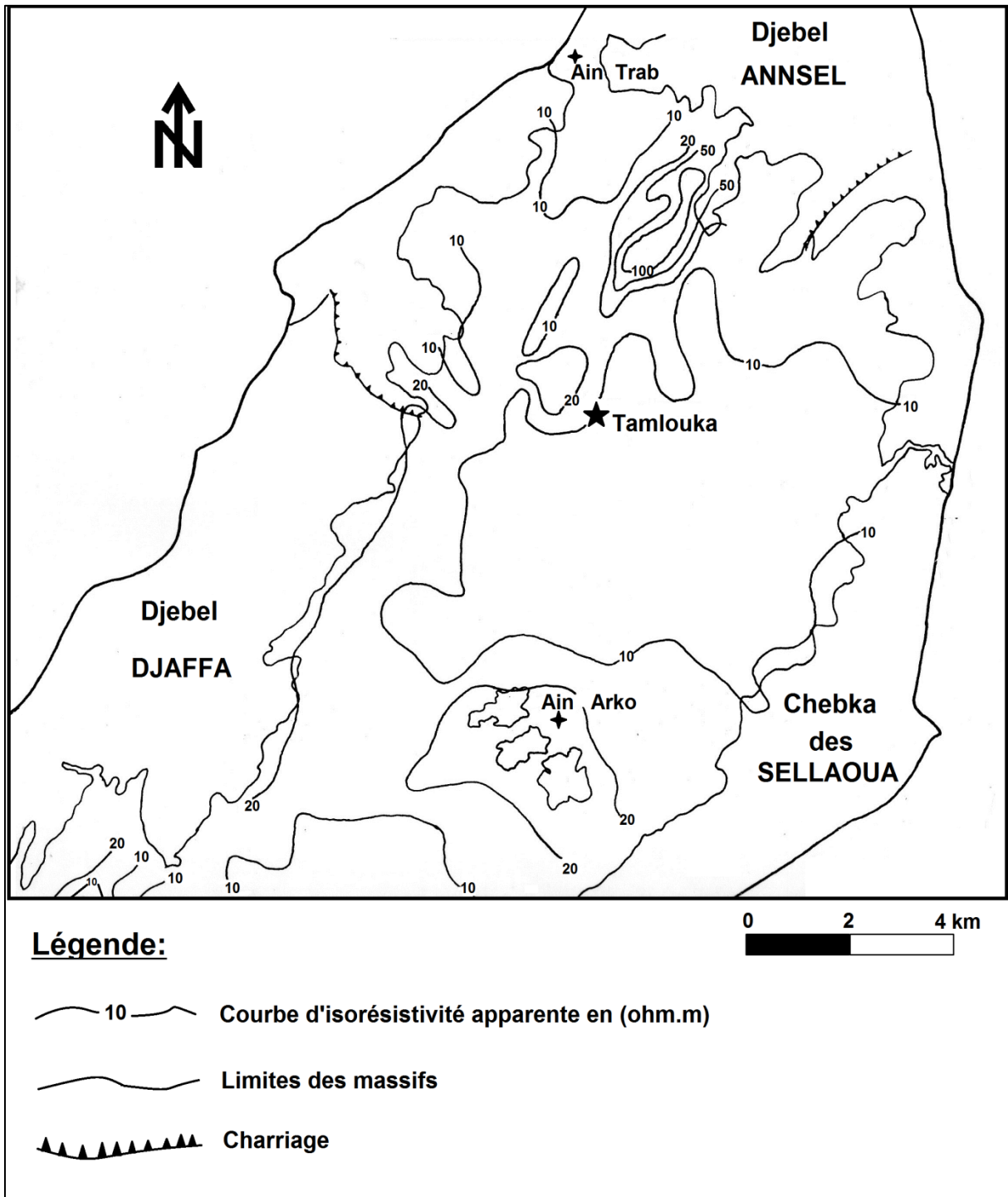


Figure 33 : Carte d'isorésistivités apparentes de la plaine de Tamlouka (AB = 500 m)
(in Djidel et Djorfî, 1992).

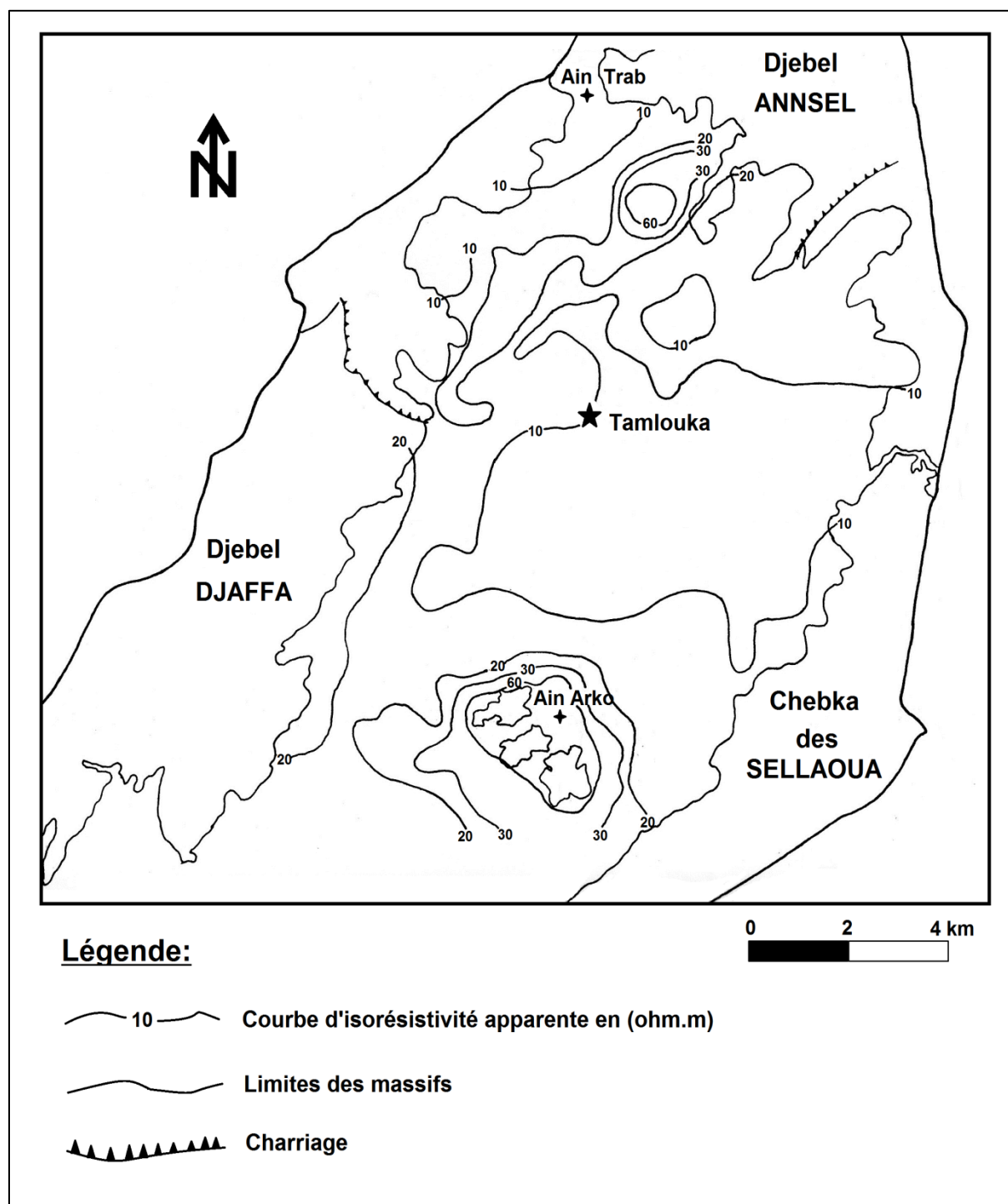


Figure 34 : Carte d'isorésistivités apparentes de la plaine de Tamlouka (AB = 1000 m)
(in Djidel et Djorfí, 1992).

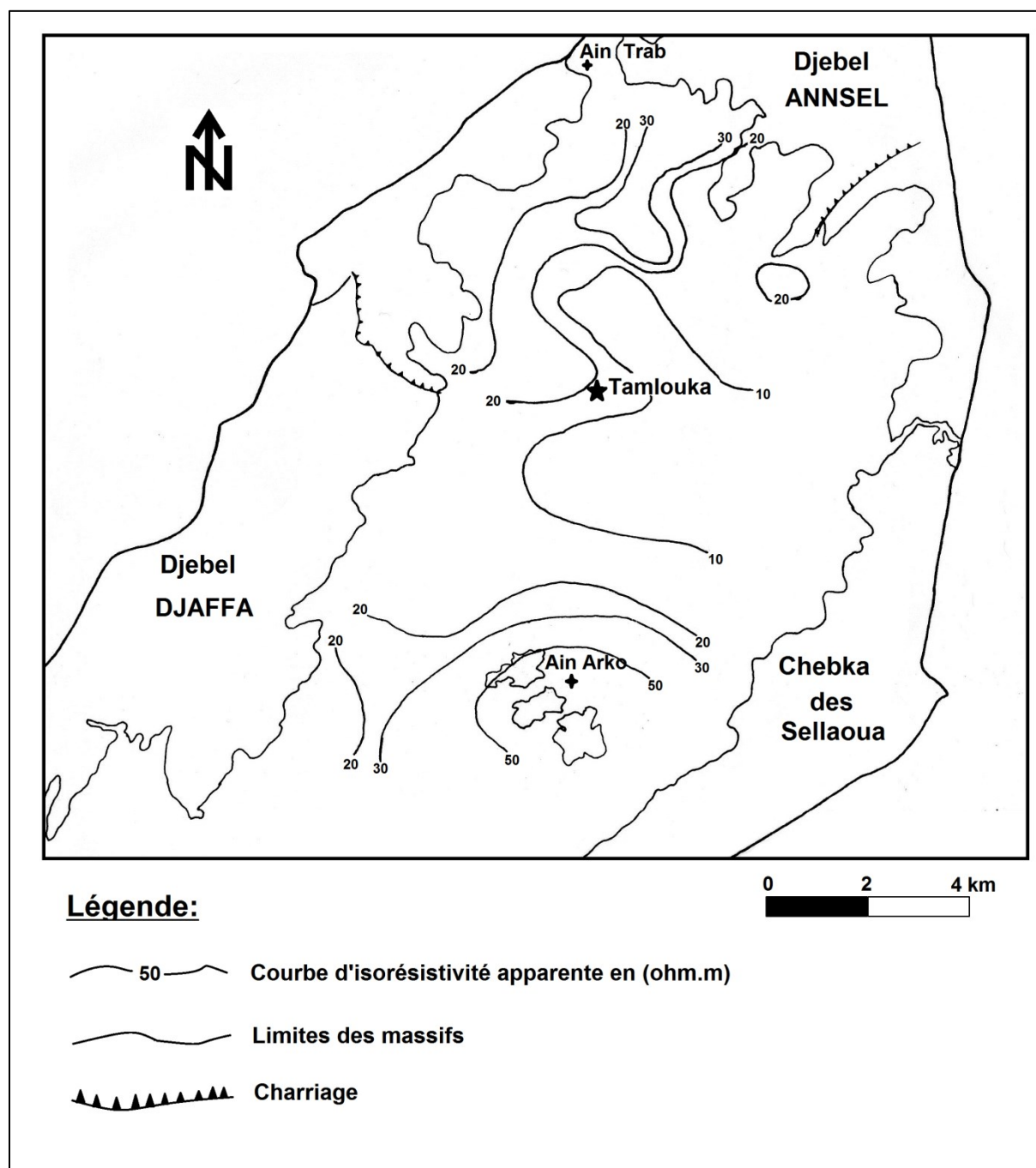


Figure 35 : Carte d'isorésistivités apparentes de la plaine de Tamoulouka (AB = 2000 m)
(in Djidel et Djorfî, 1992).

La carte en isopaches (Fig. 36) dans la plaine de Tamoulouka met en évidence :

- Une cuvette profonde orientée du Nord-Est vers le Sud-Ouest, s'étale vers le Sud-Ouest entre Djebel Djaffa et Ain Arko. Cette cuvette montre une petite ramification vers le Sud.

- Une plateforme haute entourant les affleurements calcaires du Djebel Arko. L'extension du substratum résistant correspond approximativement à celle de la plateforme haute.

Le passage du substratum résistant au substratum conducteur se fait très subitement vers le Nord-Ouest du Djebel Arko suggérant l'existence d'un fossé d'effondrement insensiblement vers le Nord-Est.

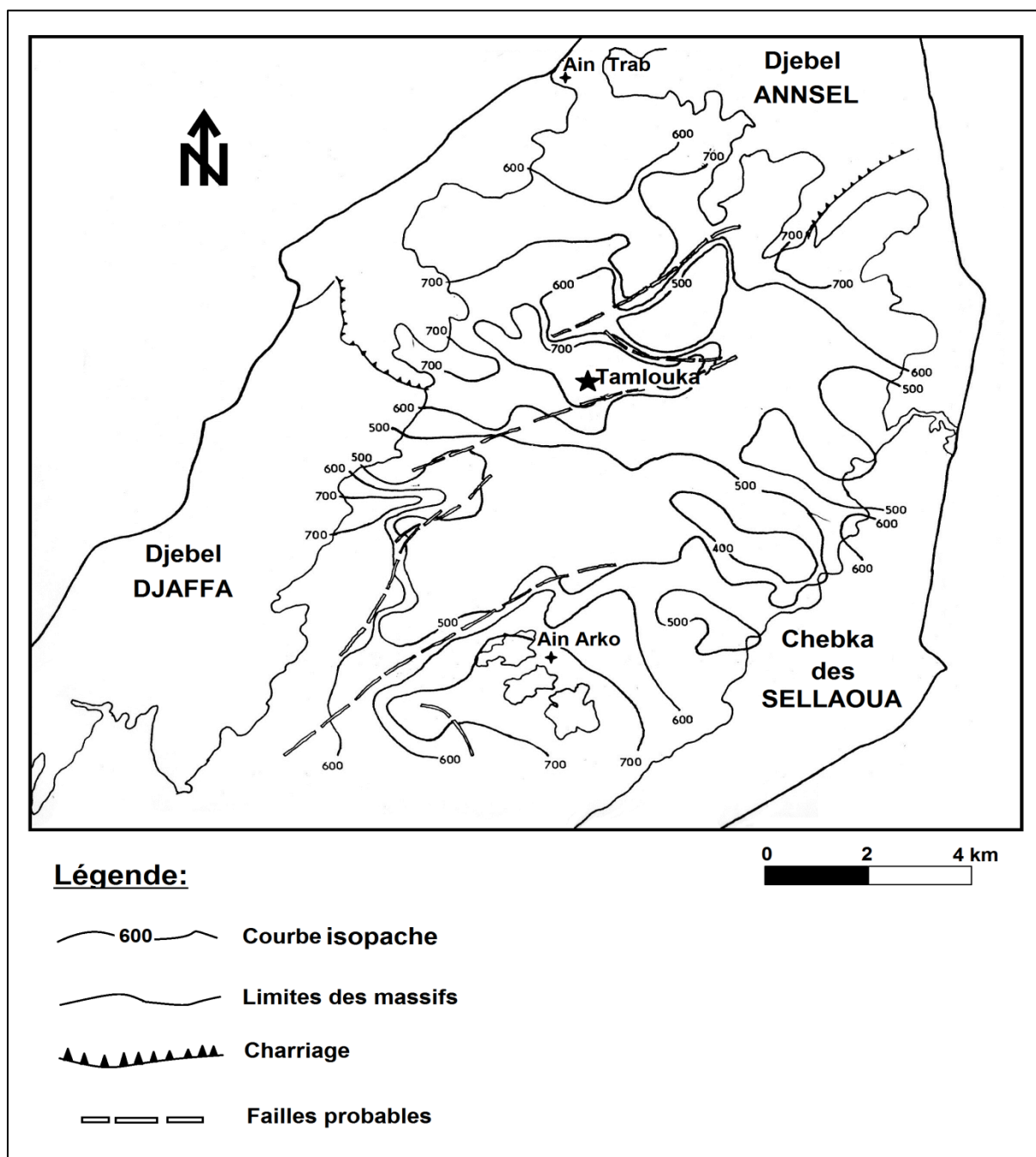


Figure 36 : Carte en isopaches « isosubstratum » de la plaine de Tamlouka (in Djidel et Djorfi, 1992).

D- Caractéristiques des aquifères de la région

Selon la géophysique et les forages d'exploitation réalisés sur le terrain, il apparaît deux formations aquifères, il s'agit de :

1- La nappe aquifère du remplissage Mio-Plio-Quaternaire

Elle occupe la partie superficielle du terrain, avec une épaisseur varie de 3 à 95 m. Elle se trouve dans toute la plaine sauf au niveau des affleurements calcaires. Elle est caractérisée par une variation latérale des formations aquifères.

Au Nord de la plaine les formations aquifères sont formées par des poudingues rougeâtres mal cimentés et parfois grossiers, des marno-calcaires contenant des niveaux de calcaire conglomératique avec des graviers et d'argiles sableuses et des marnes lacustres. Il existe aussi des lambeaux du quaternaire ancien et surtout un alluvionnement limoneux ou argileux localement sableux ou caillouteux.

Au Sud, le remplissage est devenu argileux avec des alternances de conglomérats calcaires, de graviers et de sable. La puissance de la série à ce niveau est d'environ 90 m, correspond à une zone d'effondrement. Cette nappe est exploitée par des puits domestiques à débits variables.

2- La nappe profonde des calcaires

Elle se trouve au Sud de la plaine dans les formations carbonatées Jurassique Crétacé du Djebel Ain Arko et les bordures Ouest de la cuvette (Djebel DJAFFA). Il s'agit essentiellement de formations calcaires fissurées et karstifiées dominés par des argiles bariolées compactes et des marnes qui constituent le toit imperméable de cette nappe. Au Nord, la formation aquifère présente une dominance marno-calcaire de la nappe tellienne.

E- Etablissement des coupes hydrogéologiques

En se basant sur la carte géologique et sur les logs lithologiques des forages, deux coupes hydrogéologiques ont été établies ; une (AA') se trouve au Nord de direction Nord-Est Sud-Ouest, passe par les forages F10, F1, F13, et l'autre (BB') se trouve au Sud de direction Nord-Nord-Est Sud-Sud-Ouest, passe par les forages F11, F9, et F14 (Fig. 37, 38).

1- La coupe AA'

Cette coupe révèle que la nappe superficielle n'est pas bien développée dans la partie Nord de la plaine. Les formations marno-calcaires (F10, F13, F15) constituent la nappe profonde affleurent directement à la surface. Cependant, il existe quelques zones où le

remplissage Mio-Plio-Quaternaire est plus ou moins important, c'est le cas du forage F1 où l'épaisseur atteint 40 m.

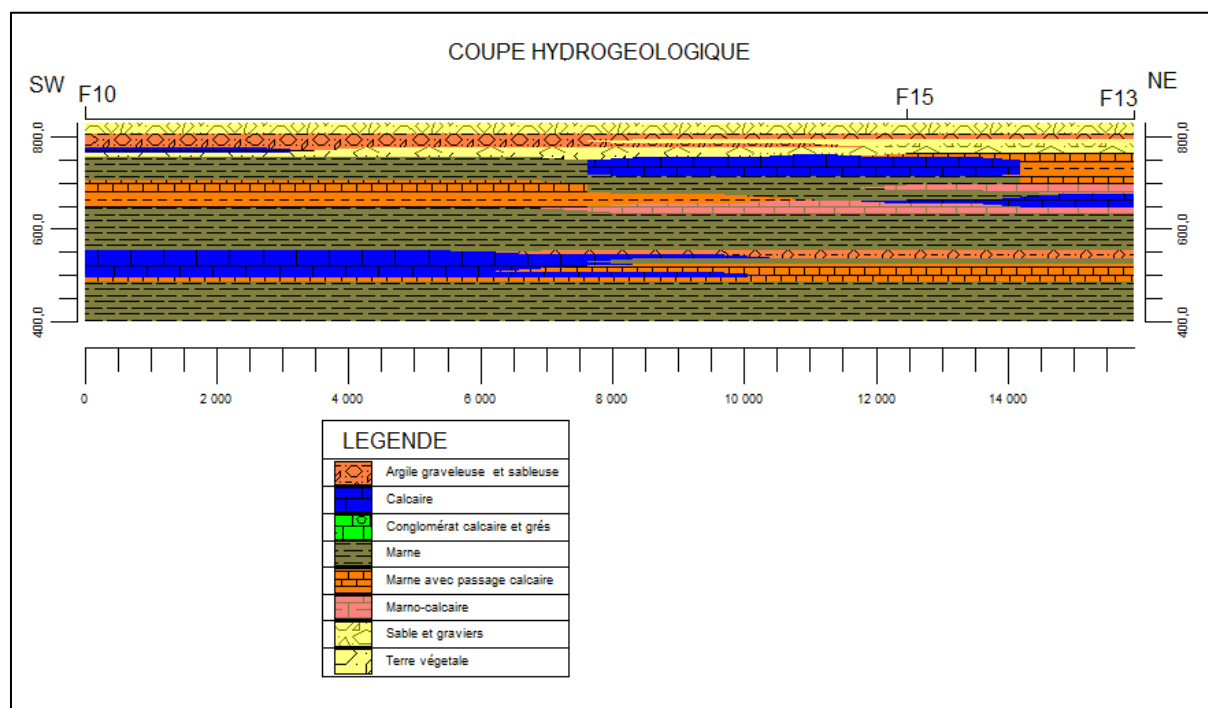


Figure 37 : Coupe (AA') des forages.

2- La coupe BB'

Elle nous permet de révéler certaines ambiguïtés structurales sur la partie Sud de la plaine. L'existence de plusieurs failles conditionnant la formation des « HORTS et de GRABENS », ont permis une évolution latérale de la nappe superficielle.

La partie centrale correspond à un « GRABEN », montre au niveau du forage F9 une épaisseur plus importante (environ 100 m) que celle des zones périphériques où elle atteint respectivement 75 et 50 m au niveau des forages F11 et F14.

Le substratum de la nappe superficielle formé généralement d'argiles sableuses constitue le toit semi-perméable de la nappe profonde, formée essentiellement de calcaire fissurée d'âge Jurassique.

La comparaison des coupes AA' et BB' fait ressortir les différences suivantes :

- Au Nord, le remplissage Mio-Plio-Quaternaire est moins développé, parfois inexistant d'où l'affleurement de la nappe profonde à la surface. A ce niveau, l'aquifère est constitué par les formations de la nappe tellienne avec une prédominance de marnes.

- Au Sud, l'épaisseur de la nappe superficielle présente la conséquence des contraintes tectoniques (HORSTS et GRABENS), affectant les calcaires du Néritique et de la série intermédiaire de Djebel DJAFFA , constituant l'aquifère de la nappe profonde.

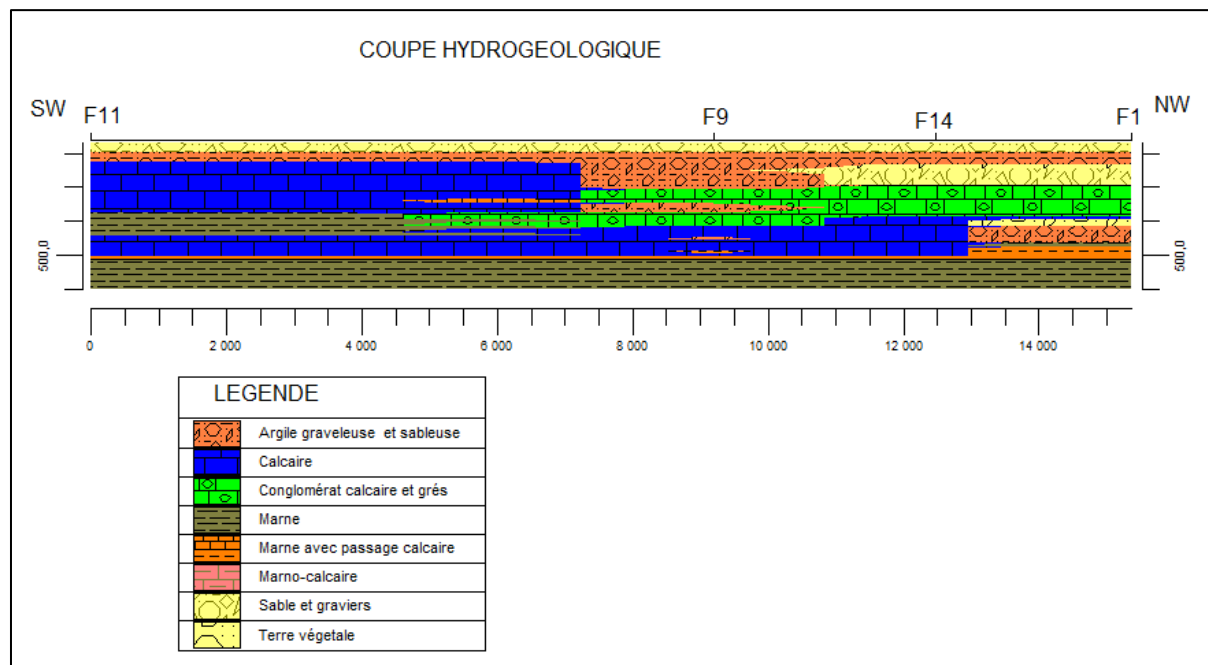


Figure 38 : Coupe (BB') des forages.

F- Hydrologie souterraine

1- Piézométrie

La mesure piézométrique est réalisée pour déterminer l'écoulement des eaux souterraines, déterminer les zones possédant de grandes perméabilité et par conséquent les zones favorables à l'implantation des captages d'eau. Pour notre région d'étude, l'absence d'une sonde piézométrique et les difficultés rencontrés sur le terrain pour l'étude de la nappe libre captée par les puits ainsi que l'inaccessibilité des ouvrages profonds n'ont pas permis de tracer les cartes correspondant à ces deux niveaux. Pour remédier à ce problème, nous disposons d'un historique piézométrique réalisé par Djidel et Djorfi qui ont effectué deux campagnes piézométriques allant :

- Du 10/11/1991 au 15/11/1991 pour les basses eaux.
- Du 15/05/1992 au 20/05/1992 pour les hautes eaux.

1-1. La carte piézométrique des basses eaux

Elle est établie à partir de 65 puits, montre que les lignes du courant sont convergées en formant des écoulements orientés du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Elle permet également d'identifier trois secteurs distincts : (Fig. 39).

- En bordure de la plaine, l'espacement des courbes apparaît très faible ce qui traduit une alimentation importante à partir des reliefs.
- Au centre, l'espacement des courbes devient éloigné, ce qui indique une diminution du gradient hydraulique (0,006) et une augmentation de la perméabilité qui peut être expliquée par le changement de faciès suivant l'écoulement. A ce niveau, la convergence des lignes de courant donne naissance à des débits d'écoulement importants, ce qui rend cette zone plus favorable à l'implantation des puits.
- En aval de l'oued El Malah, les courbes deviennent plus serrées, ce qui se traduit par une augmentation du débit ou une diminution de la perméabilité due à une dominance locale d'argile ou bien un drainage important de la nappe par le forage F10. Il est signalé que la forme des courbes à l'intersection avec les cours d'eau montre un drainage de ces derniers par la nappe.

1-2. La carte piézométrique des hautes eaux

Cette carte est établie à partir de 60 puits, montre une orientation aval de la concavité vers le Nord-Est des courbes hydroisohypses ce qui donne une convergence des lignes du courant indiquant une augmentation du débit unitaire d'écoulement (Fig. 40).

En bordure de la plaine, l'espacement des courbes est petit avec un gradient hydraulique élevé (0,02) indiquant un débit fort dû à une alimentation de la nappe par les reliefs.

Au centre, l'espacement augmente ce qui donne un faible gradient hydraulique (0,007) et un débit élevé dû la convergence des lignes du courant ce qui rend cette zone favorable à l'implantation des puits. En aval, la carte est marquée par un resserrement des courbes piézométriques dans le forage F10 d'une part et au drainage de la nappe par l'oued d'autre part. Il est signalé que la forme des courbes à l'intersection avec les cours d'eau montrent un drainage de la nappe par les oueds.

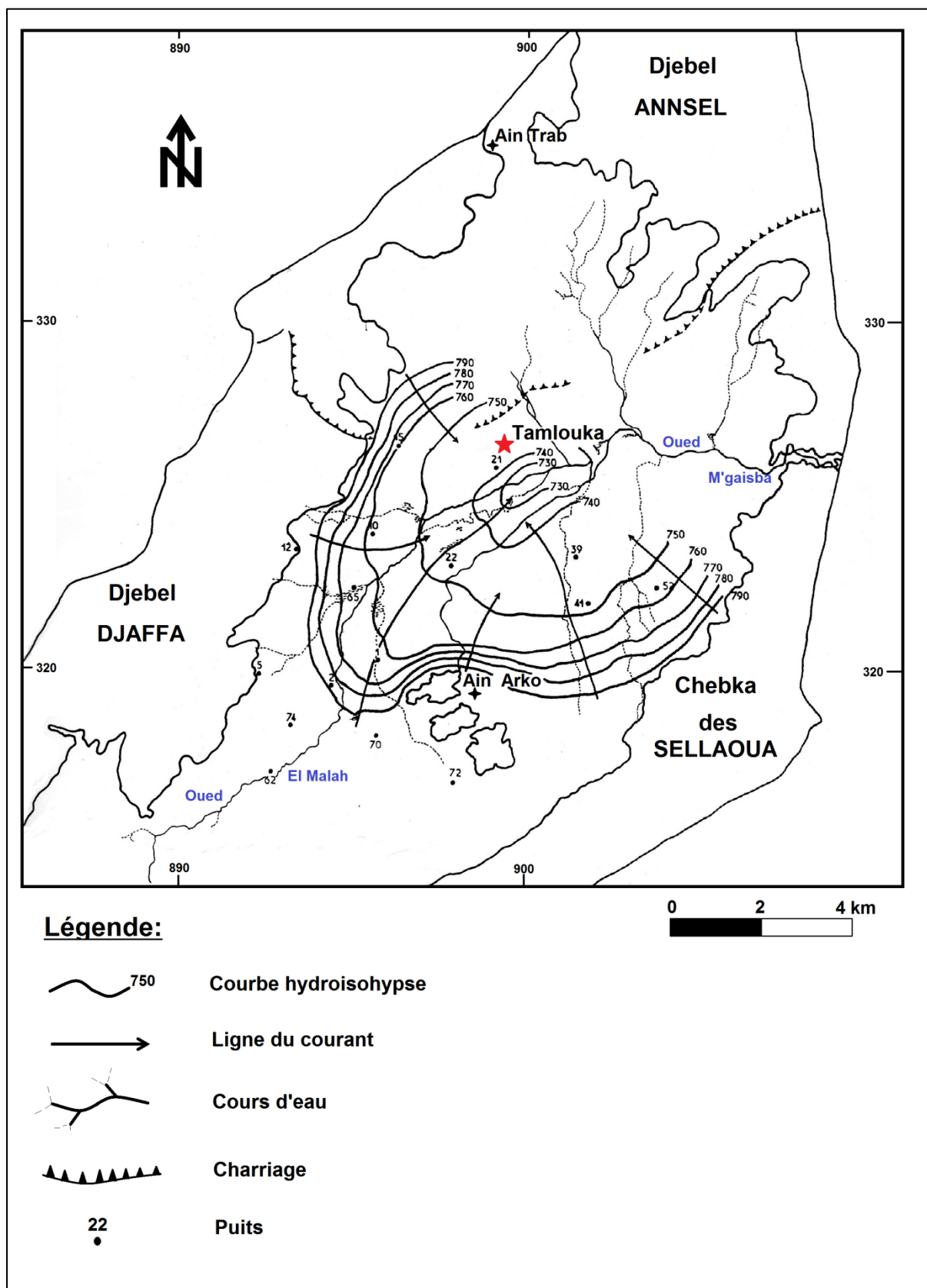


Figure 39 : Carte piézométrique des basses eaux – Novembre 1991.

(in Djidel et Djorfí, 1992).

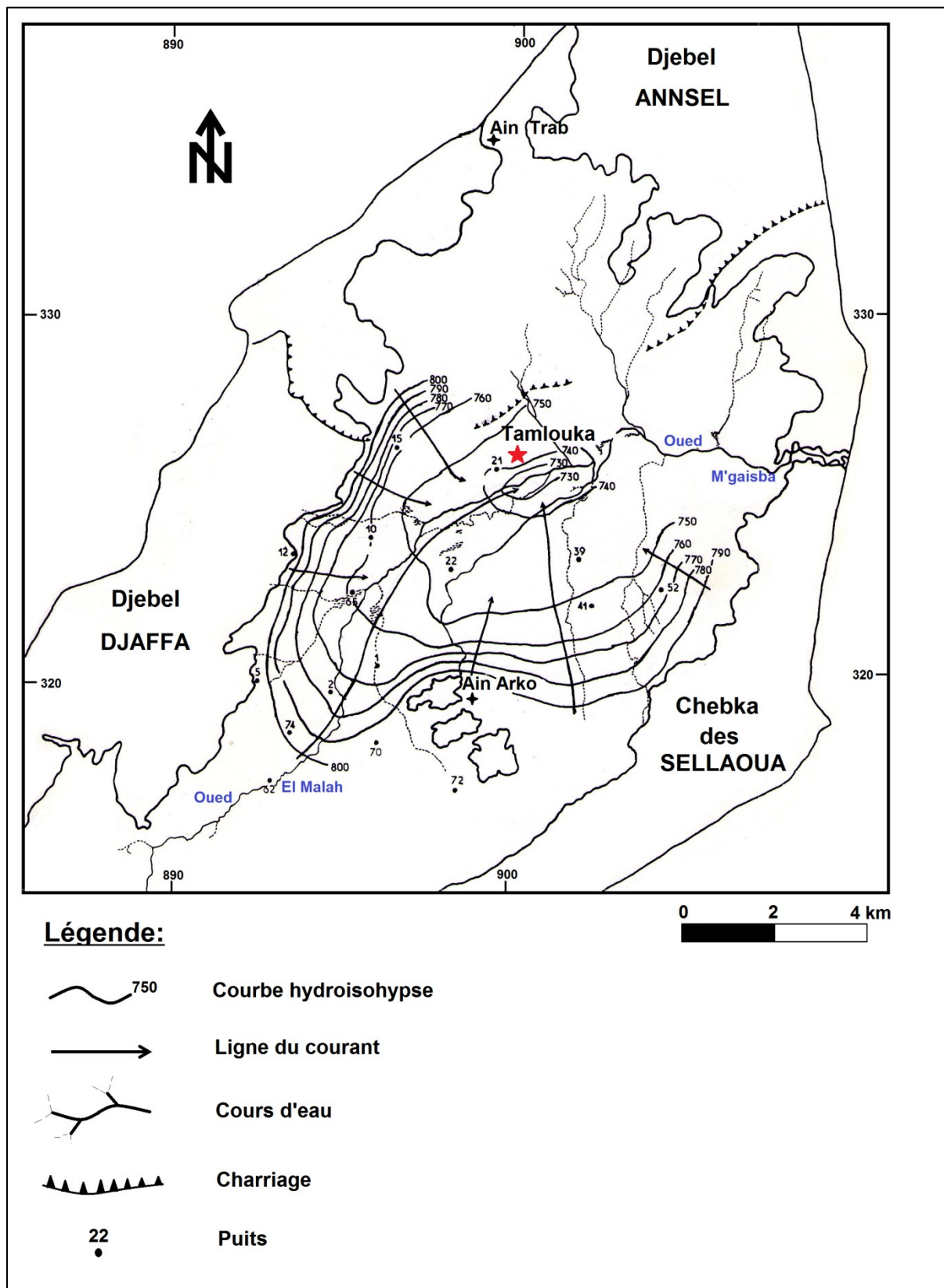


Figure 40 : Carte piézométrique des hautes eaux – Mai 1992 (in Djidel et Djorfî, 1992).

2- Les zones d'alimentation des nappes

2-1. La nappe libre

Cette nappe est alimentée essentiellement par l'infiltration directe des eaux de pluies à travers la surface alluviale. Elle est aussi alimentée partiellement par des pluies qui tombent au niveau des calcaires de Djebel DJAFFA et Ain Arko, qui sont en contact direct avec les alluvions de la nappe superficielle. Cette alimentation est favorisée par le pendage des couches dirigé vers le centre de la plaine et par les calcaires fissurés.

Les zones de perte de cette nappe sont les zones marécageuses et particulièrement les zones de drainage comme les failles qui affectent les formations aquifères profondes et constituant des zones d'alimentation pour la nappe profonde. Cependant, l'exutoire principal de la nappe est les cours d'eau qui traversent la plaine.

2-2. La nappe profonde des calcaires

Elle est alimentée par les affleurements calcaires entourant la plaine de l'Ouest (Djebel DJAFFA) et du Sud (les collines d'Ain Arko). La nappe s'alimente aussi par les formations gréseuses du Djebel ANNSEL au Nord de la plaine.

Les failles peuvent constituer des zones d'alimentation par l'infiltration des eaux à travers lesquelles la nappe est drainée par l'ensemble des forages exploitant cette dernière.

G- Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères

Les pompages d'essai ont pour but de déterminer les propriétés hydrauliques des couches aquifères et par conséquent les caractéristiques des nappes. Les travaux de Djidel et Djorfi sont basés sur l'étude de la nappe profonde et la nappe superficielle.

La nappe profonde est captée par 10 forages répartis sur la plaine en deux zones distinctes. La première zone est représentée par 6 forages situés aux environs et au Nord de la ville de Tamlouka, alors que la deuxième renferme 4 forages arrangés alentours du Djebel Arko. Ces forages et l'absence des piézomètres, ont permis de déterminer un seul paramètre hydrodynamique qui est la transmissivité (T).

La nappe superficielle est captée par plus de 90 puits domestiques répartis sur toute la plaine. Ces puits ont permis de déterminer deux paramètres hydrodynamiques ; la transmissivité (T) et le coefficient d'emmagasinement (S).

1- Pompage d'essai de la nappe profonde

Trois méthodes applicables dans les milieux fissurés ont été utilisées pour déterminer les paramètres hydrodynamiques :

- Méthode de la fracture verticale unique.
- Méthode de la fracture circulaire horizontale unique.
- Aquifère à double porosité.

L'analyse des résultats (Tableau 18) montre une grande homogénéité des formations aquifères situées au Nord de la ville de Tamlouka. La transmissivité varie de $1,7 \times 10^{-4}$ à $2,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, due à une alternance marno-calcaire de la nappe tellienne avec une exception du forage F10 situé à l'Ouest de la ville de Tamlouka qui présente une valeur relativement grande de la transmissivité $T = 2,4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ qui peut être due à une forte puissance de la nappe.

Au Sud de la plaine, au niveau de la région d'Ain Arko qui montre une transmissivité varie de $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (F11) à $6,28 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (F14). Ces fortes valeurs peuvent être justifiées par la situation du forage F14 dans une zone tectonique qui donne à la nappe karstique une grande puissance.

Tableau 18 : Valeurs de transmissivité par différentes méthodes de la nappe profonde.

Forages	F9	F10	F11	F13	F14	F15
T (m ² /s)						
T (fracture verticale)	$2,2 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-3}$	9×10^{-3}	$1,8 \times 10^{-4}$	$7,8 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-4}$
T (double porosité descente)	/	$2,6 \times 10^{-3}$	10×10^{-3}	$3,5 \times 10^{-4}$	$4,7 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-4}$
T (double porosité remontée)	$1,2 \times 10^{-4}$	$8,5 \times 10^{-3}$	$8,5 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-4}$	/	$7,8 \times 10^{-4}$
T (fracture horizontale)	$3,3 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-3}$	17×10^{-3}	1×10^{-4}	$6,2 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-3}$
T (fracture verticale s/q)	$2,3 \times 10^{-4}$	/	/	/	/	/
T (fracture horizontale s/q)	$3,4 \times 10^{-4}$	/	/	/	/	/
T (double porosité s/q)	$2,2 \times 10^{-4}$	/	/	/	/	/
T (moyenne)	$2,4 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-3}$	1×10^{-4}	2×10^{-4}	$6,2 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-4}$

2- Pompage d'essai de la nappe superficielle

Les pompages d'essai ne sont effectués que dans quatre puits. Deux méthodes sont utilisées pour la détermination des paramètres hydrodynamiques :

- La méthode de CHOW (1952).
- La méthode de PAPADOPOULOS et COOPER (1967).

Le tableau 19 donne un aperçu sur les différentes valeurs des paramètres hydrodynamiques des quatre puits.

Tableau 19 : Valeurs de transmissivité et de coefficient d’emménagement dans les puits.

Puits	P2	P15	P17	P51
Paramètres hydrodynamiques				
T (CHOW) (m^2/s)	$4,5 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$
T (PAPADOPOULOS et COOPER) (m^2/s)	$7,4 \times 10^{-4}$	/	/	$4,3 \times 10^{-4}$
T (remontée) (m^2/s)	$6,1 \times 10^{-4}$	/	$7,3 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-4}$
S (CHOW)	0,49	0,94	0,51	0,44
S (PAPADOPOULOS et COOPER)	0,14	/	/	0,12
T (moyenne)	6×10^{-4}	$1,5 \times 10^{-4}$	$4,8 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-4}$
S (moyenne)	0,31	0,94	0,51	0,28

L’observation des valeurs de « T » et « S » montre une légère différence d’une méthode à autre, mais elles restent du même ordre présentant une homogénéité de la nappe libre superficielle.

H- Réalisation d’un modèle numérique de terrain (M.N.T)

Pour établir la cartographie numérique du massif de Tamlouka, on doit intégrer les données contenant l’information de relief (Altitude). Les courbes de niveaux qui consistent à joindre les points d’égales altitudes, ont été obtenus par la numérisation de la carte topographique feuille de Tamlouka 1/50.000 à l’aide du logiciel Map Info 7.5. Ces courbes de niveaux constituent le moyen le plus pratique pour représenter le relief et elles permettent l’établissement du modèle numérique de terrain (M.N.T).

Après interpolation des points d’égales altitudes, on a révélé que notre zone d’étude est caractérisée par quatre classes d’altitudes (Fig. 41) qui sont :

- Classe 1 : 712 m et 834 m ;
- Classe 1 : 834 m et 956 m ;
- Classe 1 : 956 m et 1078 m ;
- Classe 1 : 1078 m et 1200 m.

1- Définition d'un M.N.T

Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation numérique de valeurs d'altitudes continues sur une surface topographique. Autrement dit, un MNT est une représentation imagée de l'aspect topographique d'une zone, en fonction des différentes classes d'altitudes. Il permet de fournir des renseignements sur les formes du relief tant que leur position. Plusieurs systèmes de coordonnées peuvent être liés à un MNT, on peut dire qu'il est constitué de points connus en coordonnées (peu importe les systèmes de références choisis) donnant une représentation partielle du terrain. Sur la surface topographique continue, la méthode d'interpolation doit être choisie en déterminant l'altitude de points quelconques en fonction des altitudes des échantillons initiaux.

A partir du modèle numérique du terrain MNT, il est possible de :

- Tirer de nombreuses informations précisant le modèle du terrain.
- Retirer du MNT à l'aide d'algorithmes informatiques des informations sans effectuer de mesures sur le sol lui-même.

2- Elaboration d'un M.N.T

L'élaboration d'un MNT passe par plusieurs processus; les techniques utilisées pour leur création sont variées, parmi lesquelles on peut citer : le levé topographique, la photogrammétrie, l'interférométrie radar, le laser altimètre et l'interpolation de courbes de niveau à partir des cartes existantes. Ces différentes techniques entraînent par la suite un des traitements qui leur sont spécifiques. Quelle que soit la méthode de construction de MNT et le logiciel, le calcul de MNT est établi à partir des entités vectorielles ponctuelles (points cotés) et des lignes caractéristiques du terrain. Il est signalé que toutes les données utilisées pour l'acquisition du MNT doivent être connues en coordonnées X, Y, Z dans un référentiel donné. Les points connus en X, Y, Z sont utiles pour l'obtention d'un fichier d'interpolation (le GRID "GRD") (Maoui, 2007). Un GRID est un ensemble de cellules ; chaque cellule est d'une taille donnée et contient une valeur préalablement calculée. Cette valeur peut représenter l'altitude moyenne de la cellule, ou d'autres valeurs représentant un phénomène géographique (Barbier, 2006). En effet, les lignes doivent être transformées en points à l'aide du logiciel VERTICAL MAPPER, dans lequel le Poly2point nous a permis de transformer les Poly-lignes en points avec les mêmes attributs.

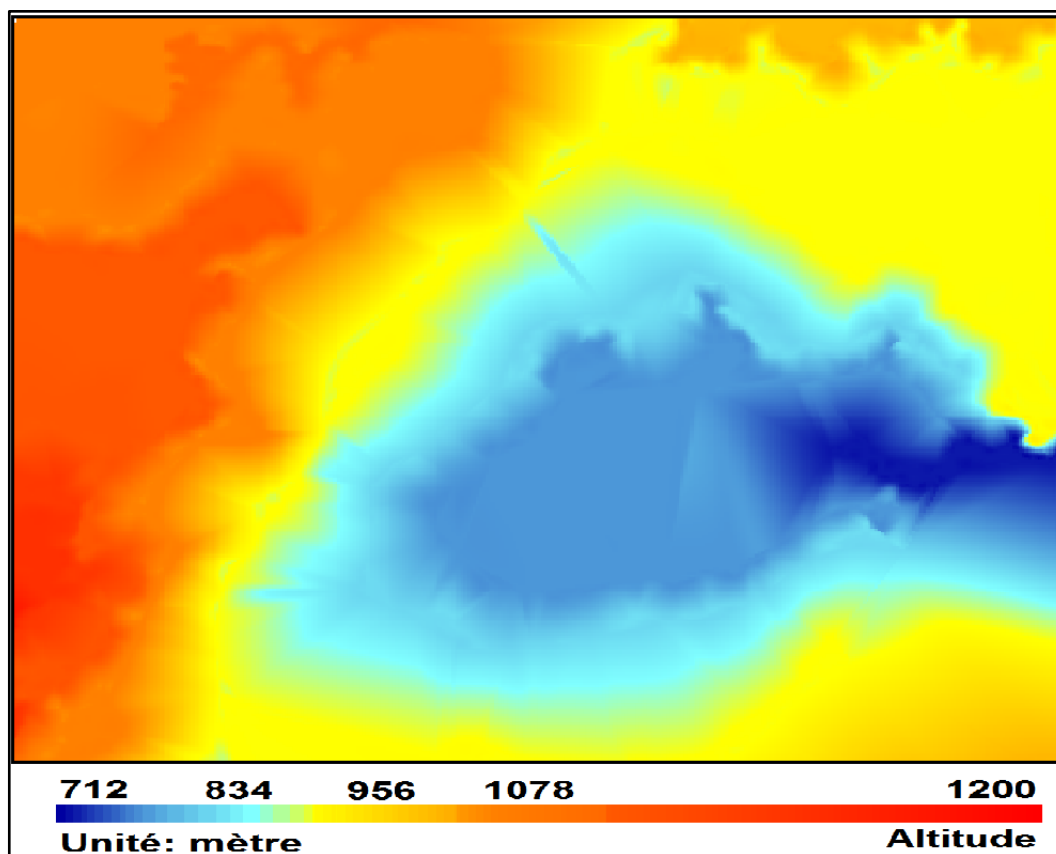


Figure 41 : Carte hypsométrique de la zone d'étude.

3- Interpolation

L'interpolation permet d'obtenir une représentation continue à l'aide d'un nombre fini de points. Elle est nécessaire quelle que soit la structure d'échantillonnage choisie. Lors de la création du MNT, l'interpolation est utilisée pour déterminer, par le calcul, l'altitude de points qui n'ont pas été mesurés sur le terrain. Les points mesurés sur le terrain représentent des échantillons qui vont être estimés :

- ❖ Les points contenus dans les facettes triangulaires des modèles TIN (Triangular Irregular Network) ;
- ❖ Les points situés entre deux profils ;
- ❖ Les nœuds des grilles raster.

L'interpolation permet le passage d'un semis de données brutes, arrangées de manières aléatoires, à ce qu'on appelle un MNT raster (échantillonnage régulier) ; alors que dans le cas d'un échantillonnage irrégulier, elle représente un moyen de calcul pour les points intermédiaires qui ne faisant pas partie des échantillons de départs. Elle permet aussi de changer le format de MNT, et on pourra passer d'un modèle TIN à un MNT raster.

Pour ne pas aboutir à un modèle MNT trop éloigné de la réalité, les méthodes d'interpolation employées doivent être bien apprises. Il est possible de différencier entre les méthodes exactes qui permettent de garder les valeurs des données initiales dans l'information finale et celles approximatives induisant une erreur demeurant pour chaque point d'échantillon initial. Selon la méthode d'interpolation on peut obtenir pour un point donné, des altitudes différentes.

Toutes les formes de représentation citées sont associées de multiples méthodes d'interpolation qui sont classées à leurs tours en deux grandes catégories:

- **Les méthodes globales:** Elles visent à utiliser toute l'information disponible pour interpoler l'altitude et génèrent des fonctions continues, généralement des fonctions polynomiales ou Splines. Autrement dit, Elles impliquent que tous les points du modèle contribuent au calcul de l'altitude inconnue d'un point.
- **Les méthodes locales (*Pointwise Methods*):** Elles visent à employer le voisinage du point du calcul.

Pour notre travail, on a exploité les différentes méthodes utilisées par le logiciel VERTICAL MAPPER qui met 4 méthodes d'interpolation à disposition:

- Par l'inverse pondéré de la distance (*Inverse Distance Weighting*) ;
- Par triangulation avec lissage (*TIN-based*) qui est une triangulation de Delaunay ;
- Par interpolation rectangulaire qui utilise les 4 points les plus proches (*Bilinear*).

3-1. Inverse pondéré de la distance (*Inverse Distance Weighting*)

Elle introduit une méthode simple pour interpoler une fonction 2D à partir d'un ensemble de points irrégulièrement espacés. Le principe de cette technique est d'associer à chaque nœud de la grille une valeur calculée par moyenne pondérée (ou non) des valeurs des points qui se repèrent à proximité du nœud. Cette pondération est linéairement inverse à la distance de chaque point et du nœud considéré (Fig. 42). Cette technique peut être contrôlée par certains paramètres influençant le résultat.

- Rayon de recherche : il définit la taille du rayon de recherche autour de chaque nœud de la grille. Les points à l'intérieur de la grille, seront sélectionnés et inclus dans le calcul d'interpolation.
- Rayon d'affichage : il définit la distance autour du lot de données où la grille va être calculée.
- Minimum et Maximum de points : il définit le nombre min. ou max. de points nécessaires pour le calcul l'interpolation.

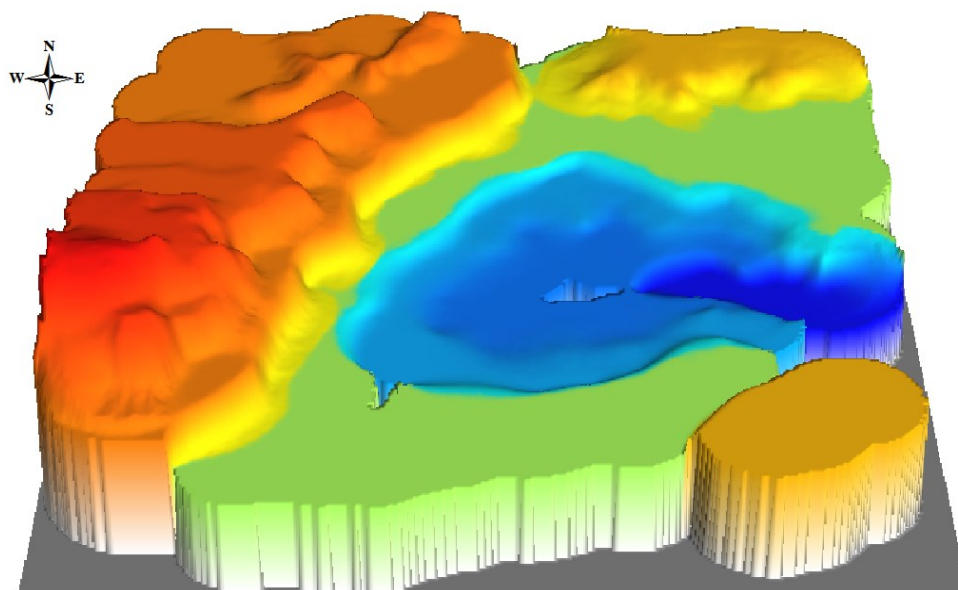


Figure 42 : Réalisation du MNT Par la méthode d'Interpolation Inverse pondéré de la distance (Inverse Distance Weighting).

3-2. Interpolation bilinéaire (Rectangular interpolation)

Cette technique vise à joindre un cercle à chaque nœud de la grille. Ce cercle est divisé en 4 quadrants, à l'intérieur desquels les points les plus proches sont sélectionnés pour affecter une valeur au nœud de cette grille (Fig. 43). Cette méthode peut être appliquée quand la distribution spatiale des points à interpoler est régulière et où la valeur de chacun d'entre eux n'est pas à prendre en compte.

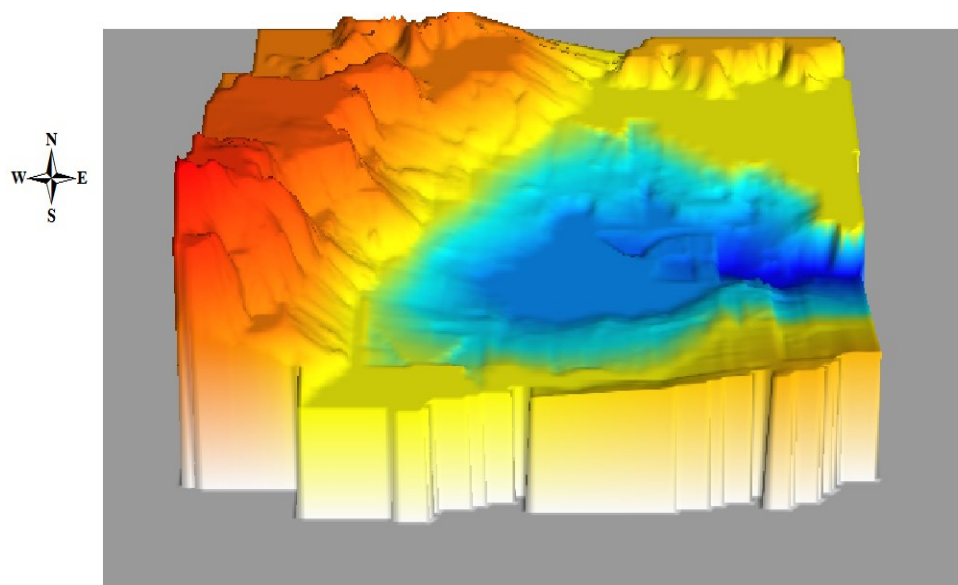


Figure 43 : Réalisation de MNT Par la méthode Interpolation Bilineaire (Rectangular interpolation).

3-3. Interpolation par triangulation irrégulière (TIN)

L'interpolation par triangulation irrégulière a toutes les propriétés désirées dans la modélisation de terrain pour la génération automatique des courbes de niveaux et pour la représentation des caractéristiques topographiques telles que les lignes de rupture. Elle est appliquée pour construire des GRIDS avec des données qui ne nécessitent pas de moyennes locales, c'est comme le cas des MNT. Cette technique utilise un réseau de triangles équilatéraux qui servent à connecter les points du lot de données. Cette triangulation est connue sous le nom de triangulation de Delaunay. Elle représente une solution utile pour travailler sur des lots de données de répartition spatiale quelconque où on peut participer chaque information à la constitution du résultat. La règle de Delaunay désigne que chaque triangle formé définit un cercle limité qui ne contient aucun autre sommet de triangle (Fig. 44) ; donc, cette triangulation est produite par un procédé reliant tous les points originaux par un réseau de triangles réguliers, aussi équilatéraux que possible.

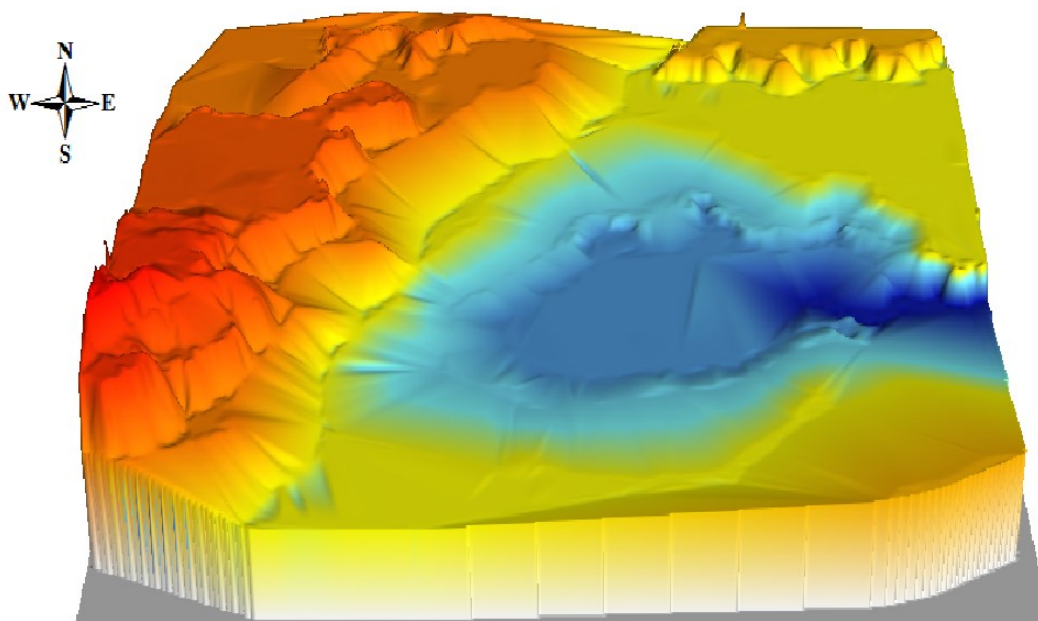


Figure 44: Réalisation de MNT Par la méthode de triangulation irrégulière (TIN).

L'examen du modèle numérique de terrain, réalisé par différentes méthodes d'interpolation, montre sans doute que les écoulements convergent au centre de la plaine.

Conclusion

La synthèse des résultats nous permet de dire le suivant :

- Il existe une correspondance générale entre la géologie et la géophysique, mais les décalages observés sont souvent dus aux limites d'application des méthodes électriques. Les cartes d'isorésistivité apparente aux différentes longueurs d'émission indiquent que les zones résistantes se trouvent au niveau des affleurements calcaires d'Ain Arko, de ceux du Nord de Tamlouka et les bordures de la cuvette. Ces cartes montrent l'étendue des terrains conducteurs et leurs extensions en profondeur, ce qui confirme la nature argilo-marneuse du remplissage. En définitive, les formations hydrogéologiques considérées comme intéressantes sont constituées par les calcaires fissurés du Jurassique couverts par des conglomérats, les calcaires Crétacé-Eocènes du Nord de la ville de Tamlouka et les bordures de la cuvette.

- L'étude hydrogéologique a permis de déterminer deux systèmes aquifères distincts par leur lithologie et géométrie. Le premier se trouve au niveau du remplissage argilo-sableux du Mio-Plio-Quaternaire et constitue la nappe superficielle où l'épaisseur augmente de la périphérique vers le centre de la plaine, favorables à l'exploitation locale.

Le deuxième système aquifère est situé dans les formations carbonatées Jurassique-Crétacé. Il constitue la nappe profonde où les paramètres hydrodynamiques sont tributaires des conditions lithostructurales ; ainsi la prédominance au Nord du faciès marno-calcaire est due à la nappe tellienne. Au Sud, les calcaires fissurés du néritique et de l'unité intermédiaire de Djebel DJAFFA constituent le réservoir principal. Il est noté que les interactions entre les deux nappes s'effectuent à travers les couches semi-perméables situées à la base de la nappe superficielle.

- Les données des pompages d'essai ont permis d'attribuer aux calcaires Eocènes de la nappe Tellienne une valeur de transmissivité moyenne de l'ordre de 2×10^{-4} m²/s. Cette valeur est considérée plus ou moins faible par rapport à un milieu fissuré, qui est due à l'alternance des marnes et des calcaires. La nappe calcaire Jurassique montre une transmissivité moyenne de l'ordre de 8×10^{-3} m²/s qui présente un intérêt hydrogéologique. La nappe superficielle du Mio-Plio-Quaternaire montre une transmissivité varie de $1,5 \times 10^{-4}$ m²/s à 6×10^{-4} m²/s et une porosité efficace de l'ordre de 28 %.

Chapitre III : Étude hydrochimique

A. Introduction

La composition chimique d'une eau est indispensable pour la détermination de sa qualité et du domaine de son utilisation. Au cours des dernières décennies, suite au développement de l'urbanisation, les activités industrielles et agricoles, les eaux des bassins de la plupart des cours d'eau et aquifères du monde y compris ceux de l'Algérie ont vu leur qualité se dégrader. La qualité des eaux de l'aquifère superficiel de la plaine de Tamlouka peut être influencée par la dissolution des formations géologiques, les rejets domestiques et surtout l'activité agricole. Cette étude hydrochimique est menée dans le but de déterminer et de connaître l'origine de faciès chimique des eaux, son évolution spatio-temporelle, ainsi d'avoir une idée générale sur la qualité de ces eaux et les secteurs d'utilisation.

B- Résultats des mesures et des analyses chimiques de l'eau

Les analyses physico-chimiques des eaux souterraines de la plaine de Tamlouka ont montrés une grande concentration des éléments chimiques qui dépassent les normes de potabilité dans la plupart des cas. Pour mieux comprendre ces variations, les données seront représentées sous deux formes :

- l'une présente des valeurs naturelles non influencées par l'effet des pluies (dilution), ni par l'effet de l'évaporation (concentration des éléments chimiques), ni par l'effet de la pollution. Ces données sont présentées sous forme d'un tableau (Tableau 20) ;
- l'une statistique, présentant les valeurs maximales, moyennes, minimales et les écarts types (Tableau 21).

Une discussion sur l'origine, l'évolution et le rôle des éléments chimiques sera traitée ultérieurement.

Tableau 20 : Norme de potabilité de l'eau.

Paramètres	Unités	Valeurs maximales admissibles		
		Algérie ⁽¹⁾	France ⁽²⁾	OMS ⁽³⁾
Couleur	mg/l de platine Pt/Co	15	15	15
Turbidité	NTU	5	2	1
Saveur	Taux de dilution à 25 °C	4	3	/
Odeur	Taux de dilution à 25 °C	4	3	/
Résidu sec	mg/l	1500	1500	/
Température	°C	25	25	/
Concentration en ions hydrogène	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9	≥ 6,5 et ≤ 9	≥ 6,5 et ≤ 8,5
Conductivité	μS/cm à 20 °C	/	≥ 180 et ≤ 1000	400
TDS	mg/l	/	/	< 600
Dureté totale (TH)	Degré français °F	200 (mg/l en CaCO ₃)	15	10
Calcium	mg/l en CaCO ₃	200	100	/
Magnésium	mg/l de Mg ²⁺	/	50	/
Sodium	mg/l	200	200	200
Potassium	mg/l	12	12	12
Alcalinité	mg/l en CaCO ₃	500	/	/
Chlorures	mg/l	500	250	250
Sulfates	mg/l	400	250	250
Nitrates	mg/l de NO ₃ ⁻	50	50	50
Nitrites	mg/l NO ₂ ⁻	0,2	0,1	3
Ammonium	mg/l	0,5	0,1	0,5
Phosphore	mg/l	5	/	5
Fluorures	mg/l	1,5	1,5	1,5
Silices	mg/l	/	/	≤ 10

⁽¹⁾ : Selon le décret du 22 mars 2011 (J.O.R.A.), Algérie.

⁽²⁾ : Selon l'arrêté du 11 janvier 2007 (J.O.R.F.), France.

⁽³⁾ : Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.), 2011.

Tableau 21 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de plaine de Tamlouka.

Paramètres		T °C	pH	CE (µs/cm)	O ₂ (mg/l)	TDS (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)
Paramètres statistiques	Moyenne	18,51	7,29	2120,43	2,88	1146,47	137,82	20,56	264,41	4,9
	Ecart-type	6,12	0,2	840,69	1,3	394,24	58,84	6,6	118,42	2,28
	Minimum	11,1	6,82	532	0,56	293	36,07	5,34	111,22	1,03
	Maximum	35,3	7,9	4610	5,64	2335	380,76	38,88	866	10,34
Normes		25 (1) et (2)	≥ 6,5 et ≤ 9 (1) et (2) ≥ 6,5 et ≤ 8,5 (3)	≥ 180 et ≤ 1000 (2) 400 (3)	/	< 600 (3)	200 (1) 100 (2)	50 (2)	200 (1), (2) et (3)	12 (1), (2) et (3)
Nombre d'observation		100	100	100	100	100	100	100	100	100
Paramètres		HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	OPO ₄ ⁻ (mg/l)	SiO ₂ ⁻ (mg/l)	F ⁻ (mg/l)
Paramètres statistiques	Moyenne	185,6	319,07	325,55	51,391	0,45	0,13	0,55	0,35	0,69
	Ecart-type	57,8	86,9	145,43	20,27	0,55	0,49	0,2	0,09	0,25
	Minimum	67,1	155	79,9	22	0,19	0,042	0,3	0,23	0,3
	Maximum	336	542	776	112,64	5,51	5,01	1,81	0,74	1,4
Normes		/	500 (1) 250 (2) et (3)	400 (1) 250 (2) et (3)	50 (1), (2) et (3)	0,2 (1), 0,1 (2) et 3 (3)	0,5 (1) et (3), 0,1 (2)	5 (1) et (2)	≤ 10 (3)	1,5 (1), (2) et (3)
Nombre d'observation		100	100	100	100	100	100	100	40	40

1- Prélèvements

Les prélèvements ont été réalisés au cours des campagnes d'échantillonnage avec une fréquence saisonnière ; elles se sont déroulées en 5 phases : du mois d'Avril 2012 au mois de Mai 2013 (Tableau 22). Les stations d'échantillonnage ont été divisées en 3 groupes : puits domestiques, forages et sources, réparties en 3 sous zones : la ville de Tamlouka, Ain Arko et Sidi Mâach (Fig. 45).

Tableau 22 : Campagnes d'échantillonnage dans la zone d'étude.

Campagnes		1	2	3	4	5	Total
Date de Prélèvement		Avril 2012	Juillet 2012	Novembre 2012	Février 2013	Mai 2013	
Nombre d'échantillons prélevés et analysés		20	20	20	20	20	100
	Points	Cordonnées GPS			Cordonnées UTM		
		Latitude	Longitude	Élévation (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Cordonnées des points de prélèvement	F8	36°5'50.05" N	7°7'57.61"E	777	331899,6	3996347,7	777
	F9	36°5'8.84" N	7° 5'42.83"E	788	328504,03	3995143,1	788
	F10	36°9'40.95" N	7° 7'56.94"E	752	332147,5	4002891,5	752
	F15	36°9'36.50" N	7° 8'21.96"E	746	332672,5	4002800,5	746
	F16	36°6'1.29" N	7° 6'39.49"E	775	329952,64	3996731,8	775
	F17	36°4'44.5" N	7° 6'41.50"E	810	329956,95	3994364,5	810
	P1	36° 6'50.03"N	7° 9'34.11"E	762	334347,94	3998149,9	762
	P2	36° 6'11.10"N	7° 9'44.70"E	778	334590,04	3996945,3	778
	P3	36° 6'37.28"N	7° 9'59.63"E	766	334978,61	3997745	766
	P4	36° 5'57.65"N	7°10'0.79"E	782	334984,59	3996523,2	782
	P5	36° 6'57.45"N	7°10'16.62"E	763	335415,14	3998358,5	763
	P6	36° 6'16.07"N	7°10'26.74"E	780	335644,21	3997078,6	780
	P7	36° 5'34.30"N	7°10'49.20"E	804	336181,75	3995780,9	804
	P8	36° 5'19.86"N	7°10'47.63"E	825	336134,16	3995336,7	825
	P9	36° 5'32.80"N	7° 9'49.70"E	793	334692,79	3995762,7	793
	P10	36° 5'26.63"N	7°10'17.18"E	796	335376,49	3995559,6	796
	P11	36° 5'18.55"N	7° 9'52.85"E	794	334763,28	3995322,1	794
P12	36° 5'43.60"N	7° 9'55.00"E	781	334831,62	3996093	781	
P13	36° 4'57.54"N	7° 9'53.15"E	813	334758,57	3994674,5	813	
S1	36° 5'51.70"N	7°11'50.90"E	830	337734,81	3996288,4	830	

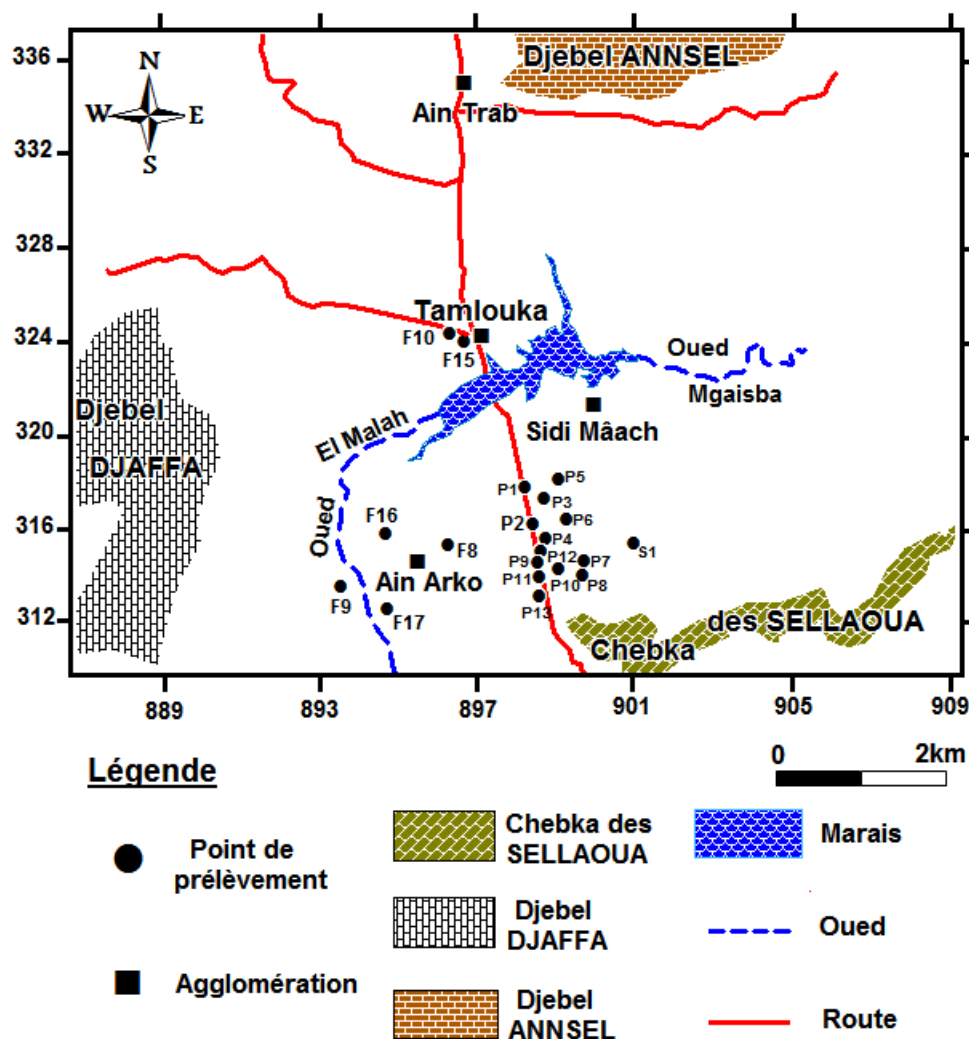


Figure 45 : Carte de la répartition des échantillons dans la zone d'étude.

2- Méthodes d'analyses

Après mesure in situ de la conductivité, la température et le pH par un multiparamètre WTW (Multiline P3 PH/LF SET), ainsi que l'oxygène dissous par un oxymètre (CelloX 325), les échantillons sont préalablement filtrés, placés dans des bouteilles en polyéthylène de 1,5 L et conservés à une température de 4°C. Les analyses chimiques ont été effectuées au laboratoire de Génie Civil et Hydraulique de l'Université 8 Mai 1945, Guelma. La dureté totale ou titre hydrotimétrique (TH) est obtenue par la méthode complexométrique par titrage à l'EDTA en présence d'un indicateur coloré (noir ériochrome T à 0,5 %) et dans un milieu tamponné pH = 10. Le calcium est dosé par complexométrie par titrage à l'EDTA en présence d'un indicateur coloré (Murexide) et une solution d'hydroxyde de sodium 2 N. La différence entre la dureté totale et la dureté calcique donne directement la dureté magnésienne de l'eau analysée (Rodier, 2009). Les teneurs de sodium et potassium sont déterminées par spectrophotométrie d'émission de flamme JENWEY-PEP7. Le dosage des bicarbonates est

réalisé par titrimétrie, on a fait agir une solution de concentration connue d'acide sulfurique H_2SO_4 sur un volume précis d'échantillons (100 ml) en présence de l'orange de méthyle comme indicateur ; la réaction qui se produit est due à la neutralisation des ions de bicarbonate par les ions H^+ de l'acide sulfurique. Les chlorures sont déterminés par volumétrie selon la méthode de Mohr, en faisant précipiter le chlorure d'argent par réaction des ions chlorures avec les nitrates d'argent et en présence d'une solution de chromate de potassium K_2CrO_4 à 10 % comme un indicateur. Les sulfates SO_4^{2-} sont déterminées par néphélométrie, en utilisant un spectrophotomètre UV-visible (WTW) réglé à une longueur d'onde de 420 nm et étalonné avant toute détermination de la concentration des sulfates qui est reliée à la turbidité de la suspension ($BaSO_4$). Les nitrates, nitrites, ammonium et orthophosphate sont déterminés par la colorimétrie. Le dosage de la silice et le fluor est réalisé par une méthode colorimétrique à l'aide d'un coffret test spectroquant, la lecture est faite à l'aide d'un spectrophotomètre adapté. Il est à noter qu'on a pratiqué des dilutions sur tous les échantillons prélevés avant chaque mesure et elles sont prises en considération lors des calculs des concentrations de tous les éléments chimiques. Il est aussi à signaler qu'on a travaillé avec une balance ionique de 6 %.

3- Analyse des résultats

Les résultats du tableau 21 montrent :

3-1. La conductivité électrique

La conductivité est un paramètre important dans la mesure où elle reflète la minéralisation globale de l'eau. Elle dépend à la fois de la quantité d'ions présents dans le milieu et la présence des espèces ioniques en solution. Elle s'accroît avec l'augmentation de la teneur de l'eau en sels dissous. Notons que les valeurs mesurées ont été corrigées par rapport à une température standard de 25 °C. Les résultats obtenus montrent une moyenne de 2120 $\mu s/cm$ indiquant la forte minéralisation des eaux souterraines de la plaine de Tamlouka, surtout au Sud et le centre de la plaine, due à la dissolution des argiles de la Mio-Pliocène riche en halite. L'écart-type est de l'ordre 840,69 $\mu s/cm$ reflète la variation des valeurs de la conductivité électriques, qui oscille de 532 $\mu s/cm$ à 4610 $\mu s/cm$ comme valeur maximale (Fig. 46).

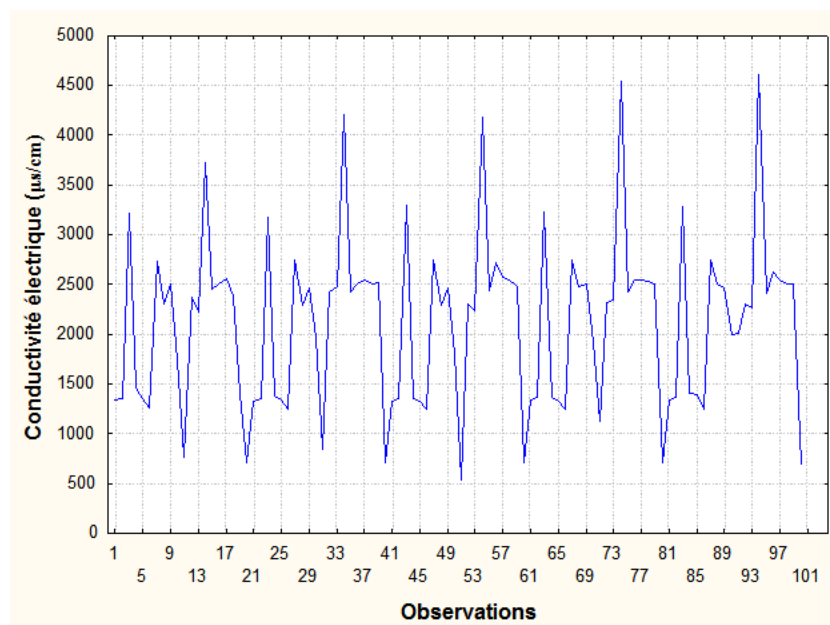


Figure 46 : Variation de la conductivité électrique.

3-2. Potentiel hydrogène (pH)

Le pH permet de déterminer l'acidité ou l'alcalinité d'une eau et il conditionne l'équilibre physico-chimique. Les résultats montrent un pH varie entre 6,82 et 7,9, ce dernier est neutre et dans les normes de potabilité (Fig. 47).

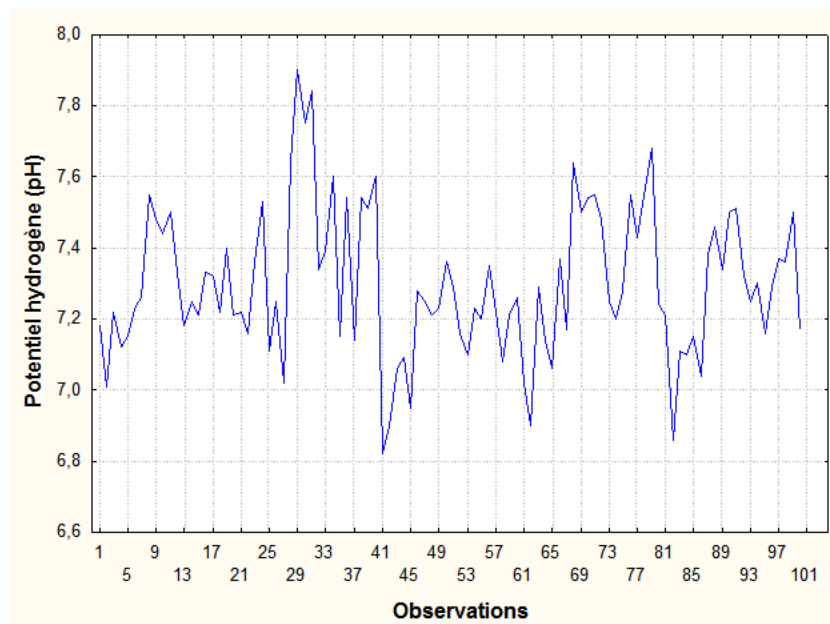


Figure 47 : Variation du potentiel hydrogène pH.

3-3. Température T

La température de l'eau est un paramètre très important, elle joue un rôle dans l'augmentation des activités chimiques, bactériennes et de l'évaporation de l'eau.

Elle varie en fonction de la température de l'air, les saisons et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol. Elle varie de 11,1 à 35,3 °C comme valeur maximale avec une moyenne de 18,51 °C (Fig. 48). Parmi 100 échantillons analysés, la plupart sont dans les normes de potabilité excepté 14 cas où la température dépasse 25°C.

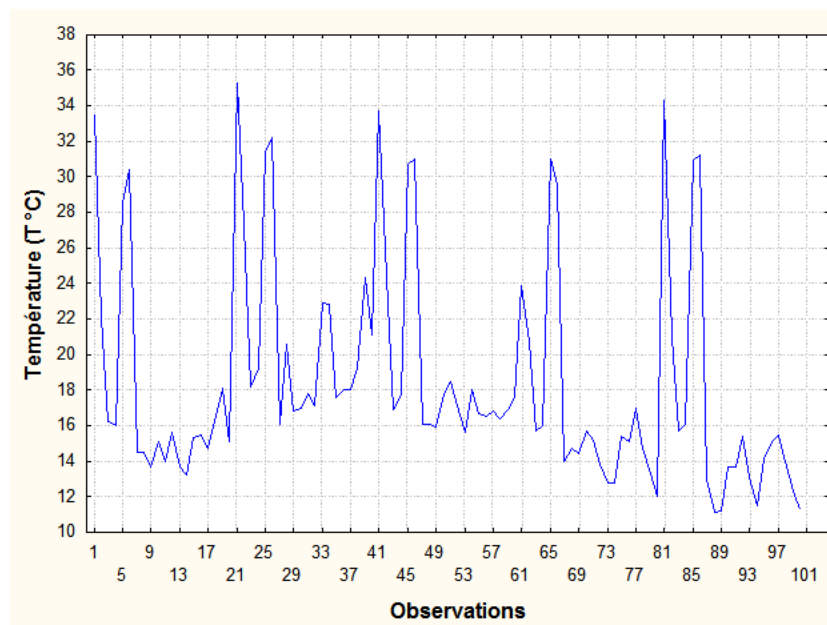


Figure 48 : Variation de la température.

3-4. L'oxygène dissous (O₂)

L'oxygène est l'un des facteurs fondamentaux de la vie. Il entre pour 21% dans la composition de l'air atmosphérique, et représente 35% environ des gaz dissous dans l'eau à pression normale (Bremond et Perrodon, 1979). Pour une température et une pression données, on trouve une quantité maximale d'oxygène sous forme dissoute ; elle présente la teneur en O₂ pour laquelle l'eau est saturée à 100 %. Il constitue un excellent indicateur de la qualité. Sa présence dans les eaux de surface joue un rôle prépondérant dans l'autoépuration et le maintien de la vie aquatique (MC Bride et Rutherford, 1983). Les résultats obtenus montrent une moyenne de 2,88 mg/l indiquant que les eaux sont modérément oxygénées. L'écart -type est de l'ordre 1,3 mg/l reflète la variation des valeurs de l'oxygène dissous, qui fluctue de 0,56 à 5,64 mg/l comme valeur maximale enregistrée en Février 2013 (Fig.49). Cette variation est à l'origine des apports d'eau en période des hautes eaux, qui alimentent les réserves souterraines et régénèrent la nappe, aussi la perméabilité des formations géologiques qui fait que la teneur en oxygène dissous diffère d'un point à autre.

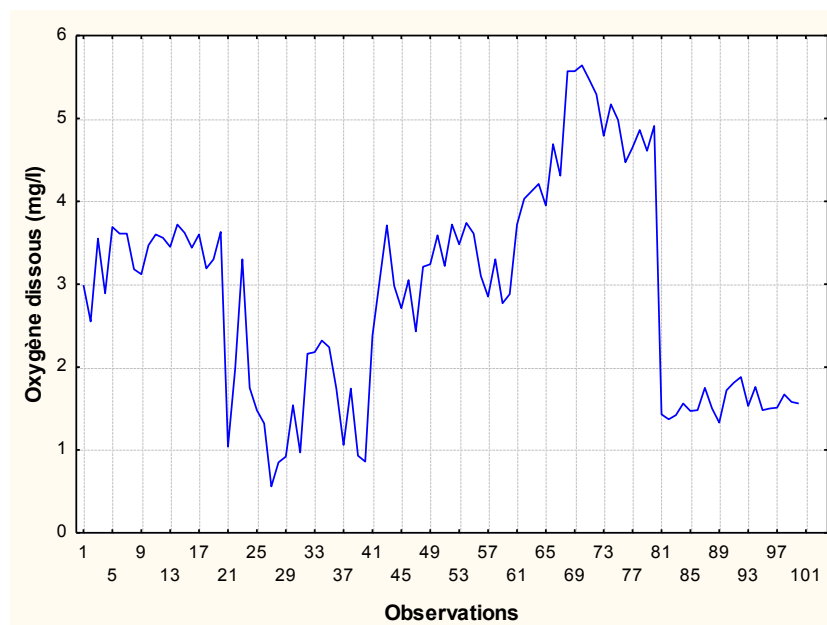
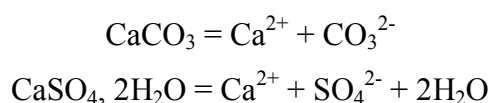


Figure 49 : Variation de l'oxygène dissous.

3-5. Le calcium (Ca²⁺)

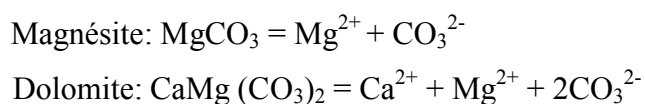
Les ions Ca²⁺ dans l'eau peuvent provenir soit de la dissolution des formations carbonatées soit la dissolution des formations gypseuses soit des deux en même temps.



Le tableau 21 montre que les moyennes dépassent les normes françaises de potabilité de l'eau. La plupart des points d'eau notamment 79 % desquels, présentent des concentrations supérieures à la norme de potabilité avec une valeur maximale de l'ordre de 380,76 mg/l atteint au niveau du puit P8, ce qui indique l'influence des formations calcaires.

3-6. Le magnésium (Mg²⁺)

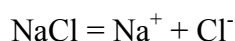
Cet élément accompagne souvent le calcium dans la nature, il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite).



Les résultats montrent des teneurs en Mg²⁺ varie de 5,34 à 38,88 mg/l avec une moyenne de l'ordre de 20,56 mg/l. Ces valeurs sont dans les limites de la norme de potabilité.

3-7. Les Chlorures (Cl⁻) et le Sodium (Na⁺)

La présence de ces éléments peut être liée à deux origines naturelles : l'effet de la salinité marine et surtout la dissolution des formations évaporitiques (salifères). Cette dernière se fait selon la relation suivante :



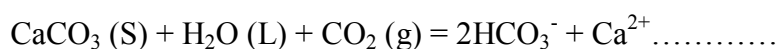
Les valeurs des moyennes en chlorures sont importantes vis-à-vis à celles du sodium à cause des caractéristiques du chlorure qui est un élément considéré comme très mobile, ne rentre pas dans les phénomènes de précipitation chimique et en plus il ne s'adsorbe pas par les formations géologiques (Maoui, 2007). Les teneurs du sodium et du chlorure présentent pour la plupart des points, des concentrations variables supérieures aux normes de potabilité avec une moyenne de l'ordre de 319,07 mg/l pour les chlorures et 264,41 mg/l pour le sodium. Ces valeurs élevées indiquent l'existence des forts apports salifères à partir des formations évaporitiques.

3-8. Le Potassium (K⁺)

Le potassium peut provenir soit de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), soit des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK). Les valeurs observées montrent que tous les points ont des concentrations inférieures à la limite de potabilité, avec un maximal de 10,34 mg/l atteint au niveau du forage F17.

3-9. Les Bicarbonates (HCO₃⁻)

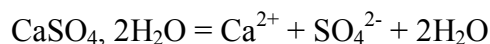
La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (cipolin, calcaire) selon la relation suivante :



Les concentrations en bicarbonates sont très variables, elles varient de 67,1 à 336 mg/l considéré comme valeur maximale enregistrée au niveau du forage F8 située à Ain Arko au Sud-Ouest de la plaine. Ces teneurs provenant probablement de la dissolution des formations calcaires caractérisant la partie occidentale de la plaine au niveau du Djebel DJAFFA.

3-10. Les Sulfates (SO_4^{2-})

La présence des ions sulfates dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses selon la relation :



Les teneurs moyennes de cet élément dans les eaux de la plaine de Tamlouka dépassent les normes de potabilité. Cependant des variations (l'écart type est de l'ordre 145,43 mg/l) sont enregistrées autour des valeurs moyennes, allant d'un minimum de 79,9 mg/l au point S1 à un maximum de 776 mg/l au niveau du puit P8. Ces fortes concentrations peuvent être liées à la dissolution des formations gypseuses par lessivage des évaporitiques.

3-11. Les nutriments

a- Les nitrates (NO_3^-)

Les nitrates constituent la forme oxydée finale de l'azote. Leur présence dans l'eau atteste d'une bonne récupération en cas de pollution organique. L'activité humaine est indubitable dès que l'on observe des concentrations dépassant 12 mg/l (Bremond et Perrodon, 1979). Les NO_3^- peuvent aussi provenir des eaux usées domestiques et parfois même des eaux industrielles. La pollution organique dans la région de Tamlouka est liée à plusieurs facteurs dont le plus important est l'activité agricole où l'utilisation excessive des engrais contribue à l'augmentation des teneurs des nitrates, sachant que 90 % de la superficie de la plaine est cultivable. D'autres facteurs peuvent influencés d'une manière à une autre tel que l'activité pastorale, la mauvaise protection des puits et l'absence de réseaux d'assainissement. Parmi cent échantillons analysés, on note que 40 % présentent des concentrations élevées dépassant les normes de potabilité avec une valeur maximale de l'ordre de 112,64 mg/l enregistrée au puits P1.

b- Les nitrites (NO_2^-)

Ils représentent la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium. Il s'agit d'une forme toxique, moins oxygénée et moins stable. Les valeurs moyennes observées dépassent les normes de potabilité algériennes et françaises. Par contre la valeur maximale 5,51 mg/l notée au puits P7 est la seule qui dépasse les normes de potabilité décrite par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.). Ces fortes concentrations peuvent être dues à l'effet de l'oxydation de l'ammonium.

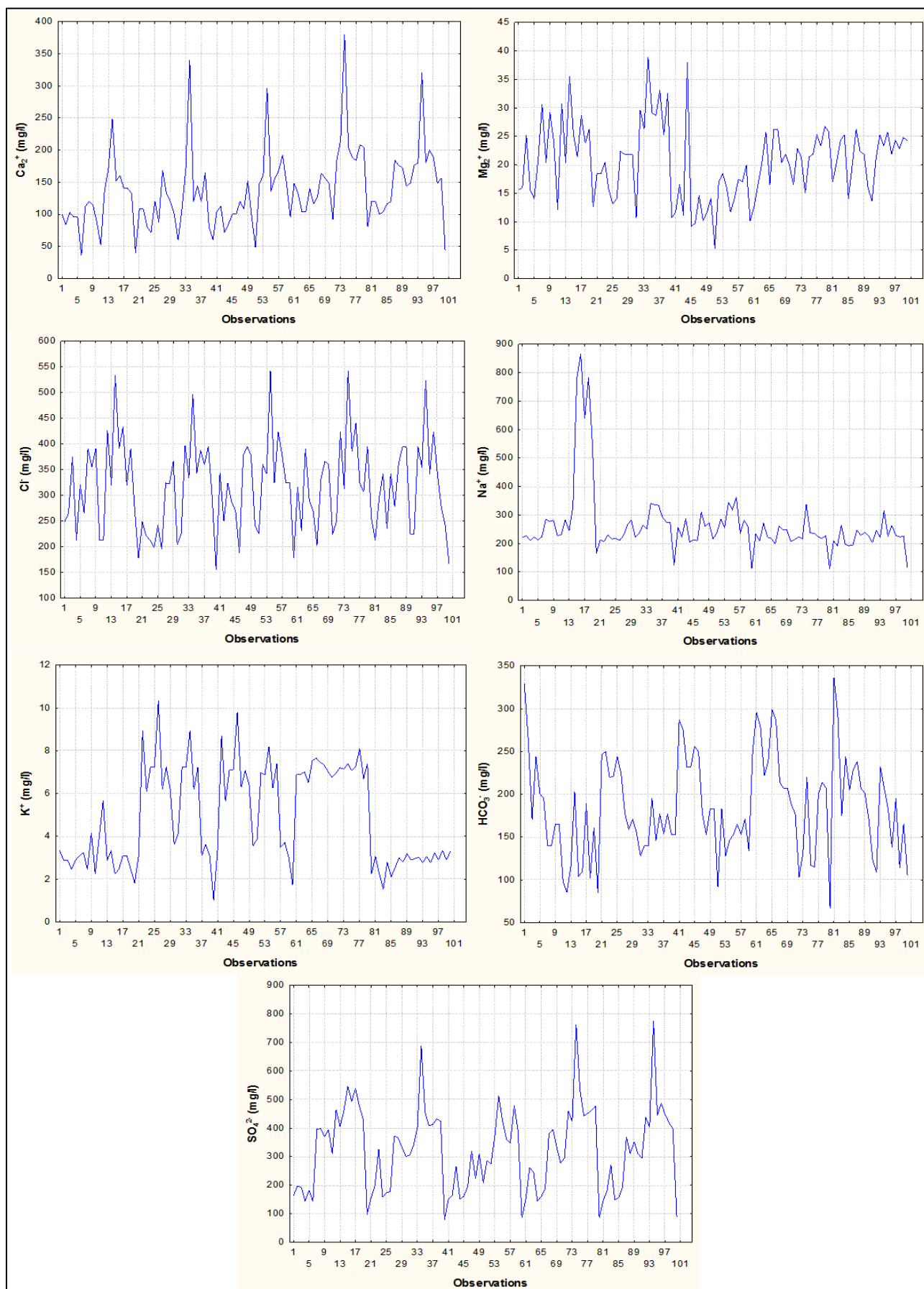


Figure 50 : Variation des éléments majeurs (cations et anions) dans la région d'étude.

c- L'ammonium (NH_4^+)

Il est considéré comme la forme d'azote la plus toxique, sa présence dans les eaux profondes résulte le plus souvent de la décomposition anaérobie de matières organiques azotées (Detay, 1993). Dans les eaux souterraines de la plaine de Tamlouka sa valeur varie de 0,13 à 5,01 mg/l comme valeur maximale dépassant largement les normes de potabilité algériennes et françaises ainsi que celles recommandés par l'O.M.S. L'origine de cette pollution est liée soit au rejet domestique et l'activité pastorale et agricole caractérisant la région, soit par réduction des formes azotées (nitrates et nitrites).

d- L'ortho phosphate (PO_4)

Le phosphore est un élément assez rare mais indispensable à tous les êtres vivants. Il est assimilable par les êtres vivants sous forme oxydée ou sous forme organique dans la nature. Sa présence dans l'eau est liée aux rejets urbains ou à la dissolution des engrais (NPK), et elle favorise la croissance des algues dès que l'eau est exposée à la lumière: phénomène d'eutrophisation. Les teneurs en phosphate varie de 0,3 à 1,81 mg/l et ne dépasse pas les normes de potabilité des eaux (5mg/l).

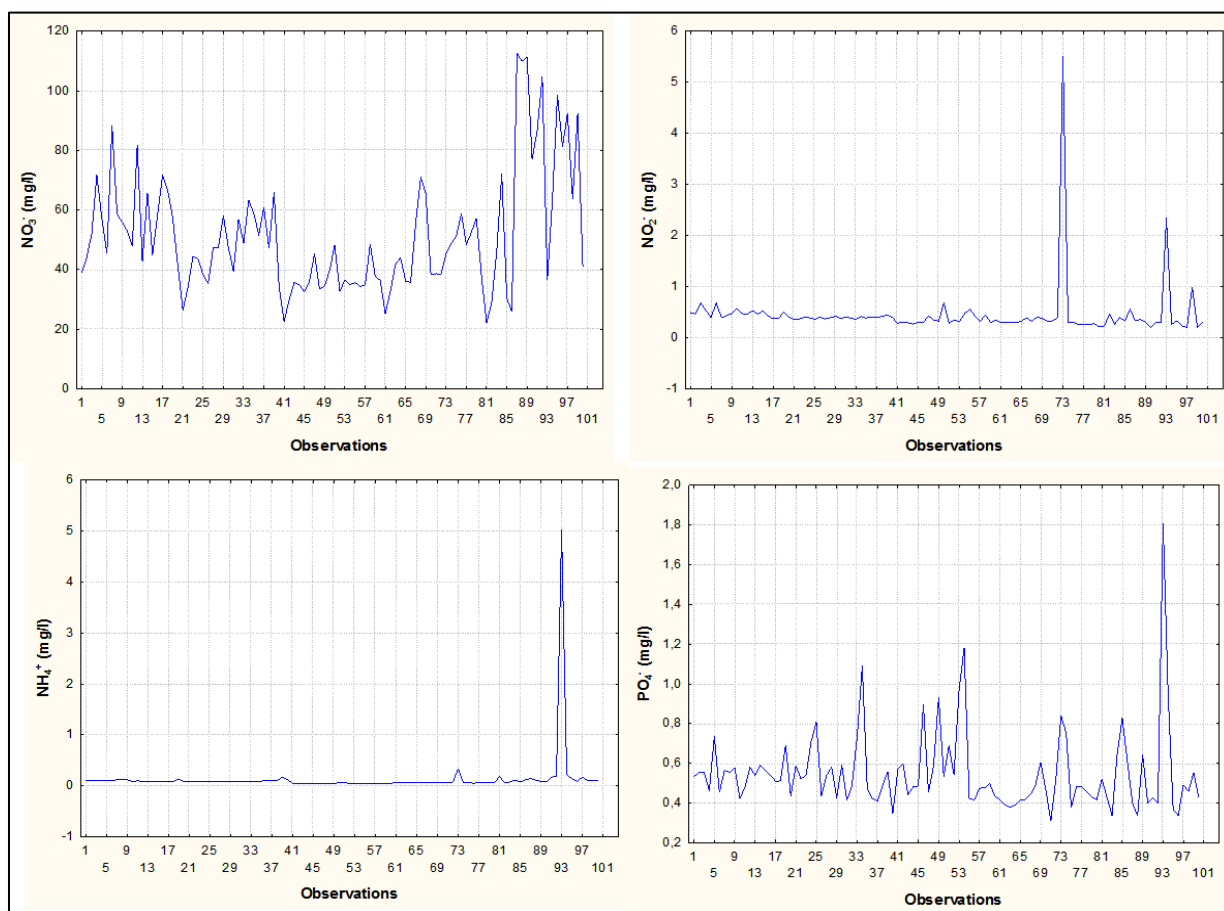


Figure 51 : Variation des éléments nutritifs (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^-) dans la région d'étude.

3-12. Le Silicium (Si)

La silice dans la nature se trouve sous forme SiO_2 , d'origine naturelle liée aux formations silicatées (sables et grés) ainsi que les silicates en provenance de roches métamorphiques et magmatiques. Les composés siliceux représentent environ 28 % de la lithosphère. Combinée à de nombreux minéraux, la silice forme des silicates. La dégradation de ces produits est à l'origine de la silice naturelle dans l'eau. La silice soluble dans les eaux naturelles est généralement sous forme H_4SiO_4 (ou $\text{Si}(\text{OH})_4$). Les teneurs enregistrées sont très faibles, varient de 0,23 à 0,74 mg/l avec une valeur moyenne de 0,35 mg/l.

3-13. Le Fluorure (F^-)

Il appartient à la famille des halogènes. Du fait de sa grande réactivité, il ne se rencontre pas à l'état libre dans la nature mais sous forme de fluorures en association avec d'autres éléments : la fluorine ou fluorure de calcium (CaF_2), cryolithe ou aluminofluorure de sodium (Na_3AlF_6) et l'apatite fluorée ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$). Les fortes concentrations du fluor (supérieures à 1,5 mg/l) peuvent causer des problèmes de santé, notamment des altérations dentaires qui se caractérisent surtout par des lésions dentaires. Cet élément est analysé sur 40 échantillons présentant des résultats variant de 0,3 à 1,4 mg/l qui sont inférieurs à la norme de potabilité. L'origine de cet élément dans la région d'étude peut être liée à l'utilisation des engrais phosphatés.

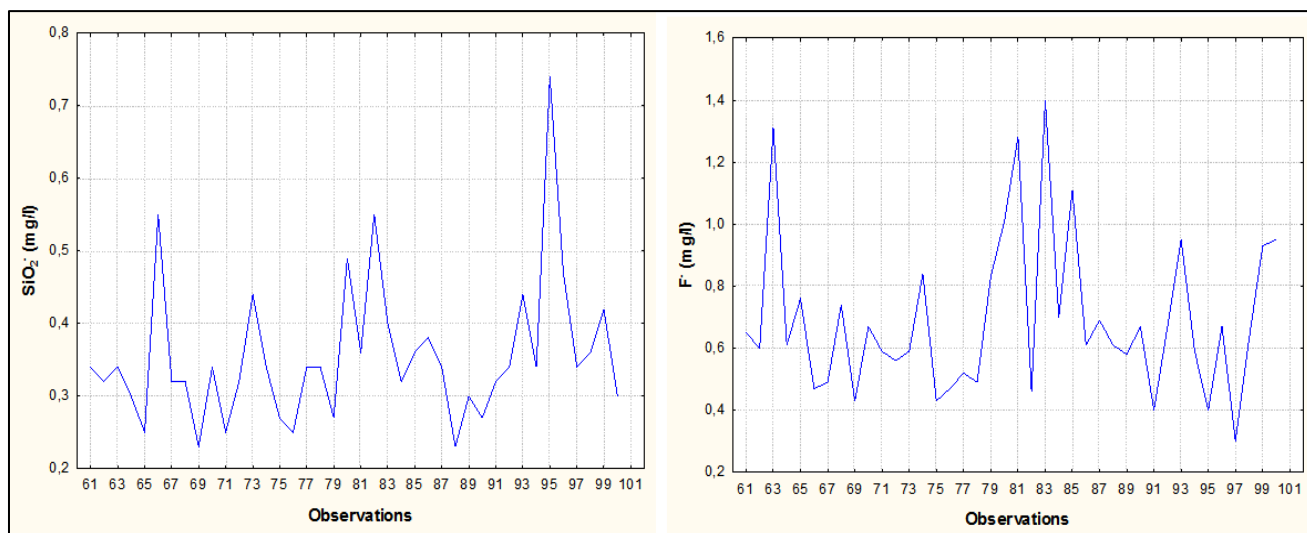


Figure 52 : Variation du silicium et fluorure dans la région d'étude.

4- Faciès chimiques des eaux

La représentation de la composition des eaux sur le diagramme de Piper, appelle les commentaires suivants (Fig. 53):

- ✓ Le triangle des anions, les eaux se répartissent entre le pôle sulfaté caractérisée par une dominance de 54 % des eaux étudiées et le pôle chloruré-sodique avec une dominance de 38 %.

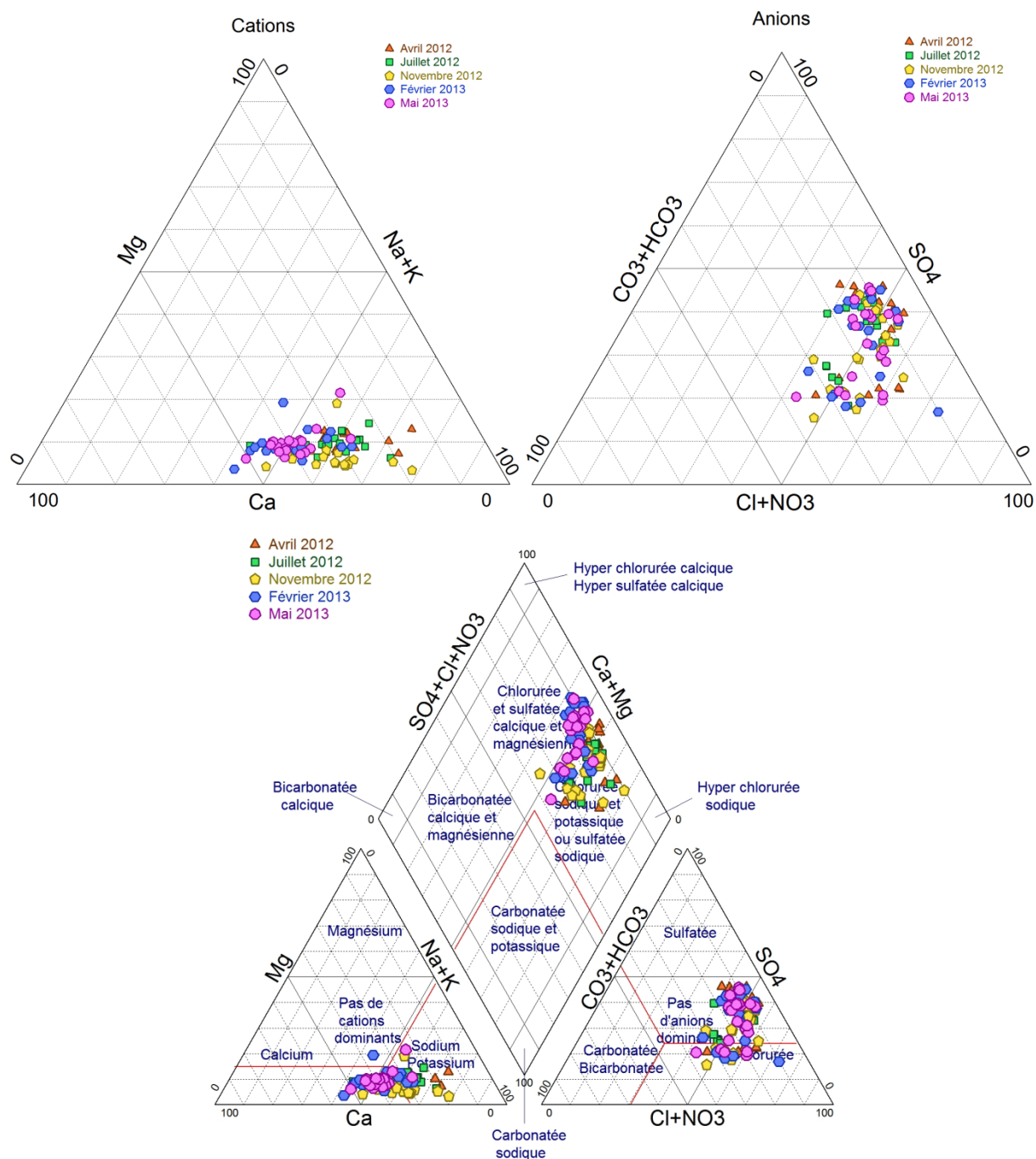


Figure 53 : Diagrammes de Piper des eaux de la plaine de Tamlouka (Année : 2012-2013).

- ✓ Le triangle des cations, la plupart des eaux se rapprochent du pôle calcique avec une dominance pour plus de 94 %. On constate toutefois que quelques-unes évoluent vers le pôle chloruré avec une dominance de 6 %.

Dans le losange, les eaux se répartissent en deux faciès:

- Des eaux chlorurées sulfatées sodiques, liés à l'existence des transitions évaporitiques dans les formations calcaires.
- Des eaux chlorurées sulfatées calciques, liés aux interactions marneuses dans leur lithologie.

La comparaison des moyennes et des écart-types des éléments chimiques majeurs, pour les 100 échantillons des eaux prélevées (Tableau 23), montre que les chlorures et les sulfates ont des valeurs moyennes plus importantes, comparativement aux autres éléments majeurs, ce qui confirme la prédominance du faciès chloruré sulfaté.

Tableau 23 : variation des éléments majeurs des eaux de la plaine de Tamlouka (2012-2013).

Paramètres	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Moyenne (mg/l)	137,82	20,56	264,41	4,9	185,6	319,07	325,55
Ecart-type (mg/l)	58,84	6,6	118,42	2,28	57,8	86,9	145,43
Minimum (mg/l)	36,07	5,34	111,22	1,03	67,1	155	79,9
Maximum (mg/l)	380,76	38,88	866	10,34	336	542	776

5- Analyse statistiques des données physico-chimiques

La composition chimique des eaux souterraines est liée à plusieurs facteurs, parmi lesquels on trouve la nature géologique des formations à travers lesquelles l'eau a circulée, les variations saisonnières du climat et les activités anthropiques. Pour déterminer les paramètres susceptibles à influencer le comportement chimique des eaux, nous avons pratiqué l'analyse en composantes principales.

❖ L'analyse en composantes principales (ACP)

L'Analyse en Composantes principales (ACP) fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles. Elle vise à réduire le nombre total des variables à un autre moindre, sans perdre les informations essentielles. Elle permet de convertir la matrice de données à un nouvel ensemble de composantes principales basé sur la matrice de variance-covariance (Maoui et al., 2010; Galego Fernandes and Carreira, 2010).

Chaque échantillon d'eau d'une campagne de prélèvement constitue une unité statistique, les différents paramètres soumis à l'analyse constituent les variables qui caractérisent ces unités statistiques. Une ACP a été pratiqué sur 60 individus (analyses) et 15 paramètres. Le tableau 24 donne les valeurs propres et l'inertie, le premier axe principal a une valeur propre égale à 4,53, il explique 30,21 % de la variation totale, la seconde composante égale à 2,16 explique 14,43 % de la variance totale, alors que le troisième axe présente une valeur propre égale à 1,76, il explique 11,77 % de la variation totale. Les trois premiers facteurs fournissent une inertie expliquée de 56,42 % considérée comme une bonne inertie moyenne. Cependant le pourcentage cumulé tend vers 100% ce qui traduit la complexité des influences qui s'exerce sur le chimisme des eaux.

Tableau 24 : Inertie dans les 5 premières composantes principales.

Axes factoriels	Valeurs propres	Pourcentage Total de la variance	Cumule des valeurs Propres	Pourcentage Cumulé
1	4,532	30,219	4,532	30,219
2	2,164	14,431	6,697	44,651
3	1,765	11,770	8,463	56,421
4	1,348	8,993	9,812	65,414
5	1,048	6,991	10,860	72,406

La matrice de corrélation (Tableau 25) des 60 échantillons montre que les coefficients de corrélations les plus significatifs sont ceux de la conductivité électrique avec le calcium ($r = 0,74$), la conductivité électrique avec les chlorures ($r = 0,80$), la conductivité électrique avec les sulfates ($r = 0,78$), le calcium avec les chlorures ($r = 0,73$), le calcium avec les sulfates ($r = 0,77$), les chlorures avec les sulfates ($r = 0,71$), l'ammonium avec les phosphates ($r = 0,62$), la température avec les bicarbonates ($r = 0,57$) et à un degré moindre entre le sodium et les sulfates ($r = 0,50$). Pour un nombre d'échantillon $n = 60$ et un nombre de variable $p=15$, les tables de Fischer donnent un coefficient de corrélation ($r_{\text{théorique}} = 0,31$) pour un seuil $\alpha = 0,001$. Cela nous permet donc de dégager les couples suivants : CE-Mg²⁺ ($r = 0,40$), CE-Na⁺ ($r = 0,33$), CE-NO₃⁻ ($r = 0,34$), O₂-K⁺ ($r = 0,36$), Ca²⁺-PO₄⁻ ($r = 0,35$), Mg²⁺-Cl⁻ ($r = 0,37$), Mg²⁺-SO₄⁻² ($r = 0,42$), Mg²⁺-NO₃⁻ ($r = 0,41$), Na⁺-Cl⁻ ($r = 0,41$), SO₄²⁻-NO₃⁻ ($r = 0,41$), NO₂⁻-NH₄⁺ ($r = 0,38$), NO₂⁻-PO₄⁻ ($r = 0,35$).

Tableau 25 : Matrice de corrélation des 100 observations.

Variabes	T°C	pH	CE	O ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻
T°C	1,00														
pH	-0,32	1,00													
CE	-0,43	0,14	1,00												
O ₂	-0,21	-0,00	0,08	1,00											
Ca ²⁺	-0,29	0,09	0,74	0,16	1,00										
Mg ²⁺	-0,30	0,18	0,40	-0,03	0,28	1,00									
Na ⁺	-0,16	0,02	0,33	0,10	0,22	0,21	1,00								
K ⁺	0,16	0,05	0,15	0,36	0,21	-0,04	-0,09	1,00							
HCO ₃ ⁻	0,57	-0,37	-0,16	-0,06	-0,03	-0,16	-0,25	0,19	1,00						
Cl ⁻	-0,34	0,04	0,80	0,15	0,73	0,37	0,41	0,12	-0,22	1,00					
SO ₄ ²⁻	-0,49	0,31	0,78	0,13	0,77	0,42	0,50	0,08	-0,39	0,71	1,00				
NO ₃ ⁻	-0,49	0,31	0,34	-0,18	0,27	0,41	0,14	-0,29	-0,26	0,28	0,41	1,00			
NO ₂ ⁻	-0,10	-0,02	0,03	0,09	0,11	0,04	-0,02	0,01	-0,08	0,00	0,08	-0,06	1,00		
NH ₄ ⁺	-0,09	-0,01	0,02	-0,13	0,08	0,09	-0,03	-0,12	0,07	0,04	0,06	-0,03	0,38	1,00	
PO ₄ ⁻	0,07	-0,06	0,22	-0,06	0,35	0,01	0,07	0,11	0,04	0,25	0,22	-0,14	0,35	0,62	1,00

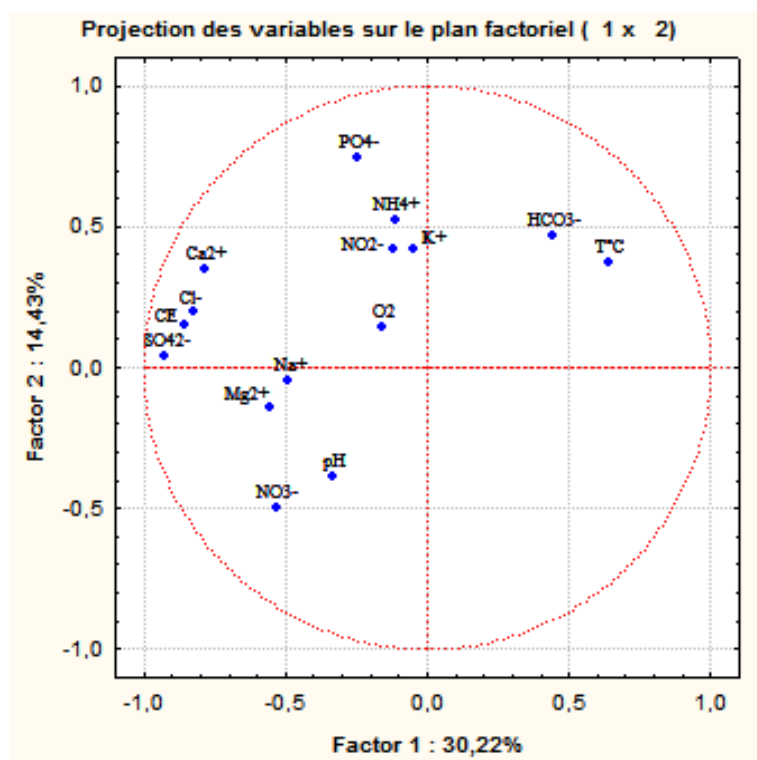


Figure 54 : Projection des variables sur le plan factoriel (1-2).

Le facteur 1 exprime 30,22 % de la variance des données et montre une corrélation élevée et négative de la conductivité électrique ainsi que les éléments majeurs (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻) à l'exception du potassium. Le facteur 2 exprime 14,43 % de la variance des données, montre une bonne corrélation des éléments de pollution (NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄⁻).

L'analyse du cercle réalisé par les deux facteurs F1 et F2 (Fig. 54) montre une opposition entre l'ensemble des éléments chimiques constituant la minéralisation des eaux ainsi que les éléments de pollution, à la température et les bicarbonates. Ces interprétations nous permettent de considérer le facteur 1 comme facteur de minéralisation lié à la dissolution des formations géologiques.

Tableau 26 : Corrélations entre variable et poids factoriels.

Paramètres	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 3	Fact. 4	Fact. 5
T°C	0,638	0,371	-0,202	-0,366	-0,013
pH	-0,331	-0,385	0,131	0,367	-0,471
CE	-0,856	0,153	-0,183	-0,181	-0,079
O ₂	-0,156	0,139	-0,499	0,625	0,177
Ca ²⁺	-0,780	0,352	-0,196	-0,136	-0,150
Mg ²⁺	-0,551	-0,143	0,131	-0,198	-0,203
Na ⁺	-0,487	-0,047	-0,096	-0,136	0,660
K ⁺	-0,043	0,419	-0,604	0,310	-0,366
HCO ₃ ⁻	0,441	0,463	-0,226	-0,444	-0,275
Cl ⁻	-0,826	0,196	-0,216	-0,186	0,100
SO ₄ ²⁻	-0,923	0,037	-0,071	-0,011	0,034
NO ₃ ⁻	-0,531	-0,499	0,253	-0,231	-0,243
NO ₂ ⁻	-0,119	0,421	0,446	0,436	0,069
NH ₄ ⁺	-0,112	0,522	0,691	0,072	-0,050
PO ₄ ⁻	-0,248	0,746	0,385	0,008	0,002

La projection des individus dans le plan factoriel (1-2) (Fig. 55) a montré l'existence de deux groupes opposés, celles des eaux faiblement minéralisées et les eaux possédant une minéralisation assez élevée comme ceux des puits P10, P7d, P7e, P8, P8a, P8b, P8c, P8d et P8e qui présente un maximum de 4610 (µs/cm).

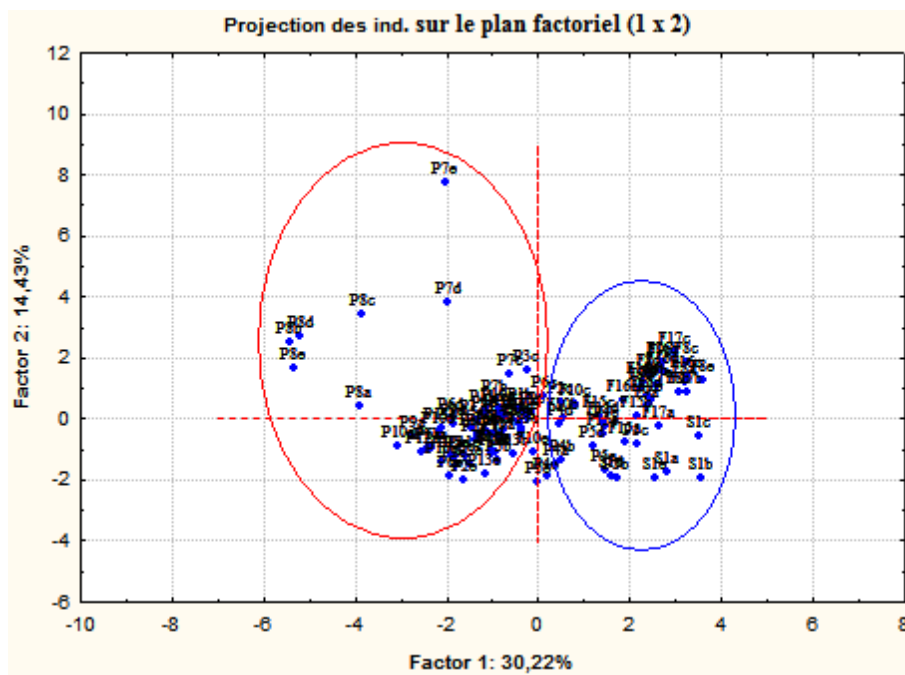


Figure 55 : Projection des individus sur le plan factoriel (1-2).

Tableau 27 : Contribution des variables selon les axes factoriels.

Paramètres	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 3	Fact. 4	Fact. 5
T°C	0,089	0,063	0,023	0,099	0,000
pH	0,024	0,068	0,009	0,100	0,211
CE	0,162	0,010	0,019	0,024	0,006
O ₂	0,005	0,009	0,141	0,290	0,030
Ca ²⁺	0,134	0,057	0,021	0,013	0,021
Mg ²⁺	0,067	0,009	0,009	0,029	0,039
Na ⁺	0,052	0,001	0,005	0,013	0,416
K ⁺	0,000	0,081	0,207	0,071	0,127
HCO ₃ ⁻	0,043	0,099	0,028	0,146	0,072
Cl ⁻	0,150	0,017	0,026	0,025	0,009
SO ₄ ²⁻	0,188	0,000	0,002	0,000	0,001
NO ₃ ⁻	0,062	0,115	0,036	0,039	0,056
NO ₂ ⁻	0,003	0,082	0,112	0,141	0,004
NH ₄ ⁺	0,002	0,126	0,270	0,003	0,002
PO ₄ ⁻	0,013	0,257	0,084	0,000	0,000

Les variables donnant les meilleures contributions sur l'axe factoriel 1 sont la conductivité, les chlorures et les sulfates, ce qui confirme qu'il est un facteur de minéralisation. Pour l'axe factoriel 2, les variables donnant les meilleures contributions sont les nitrates, l'ammonium et les phosphates, donc il peut être considéré comme facteur caractérisant la pollution liée aux activités anthropiques qui sont très répandues dans la région.

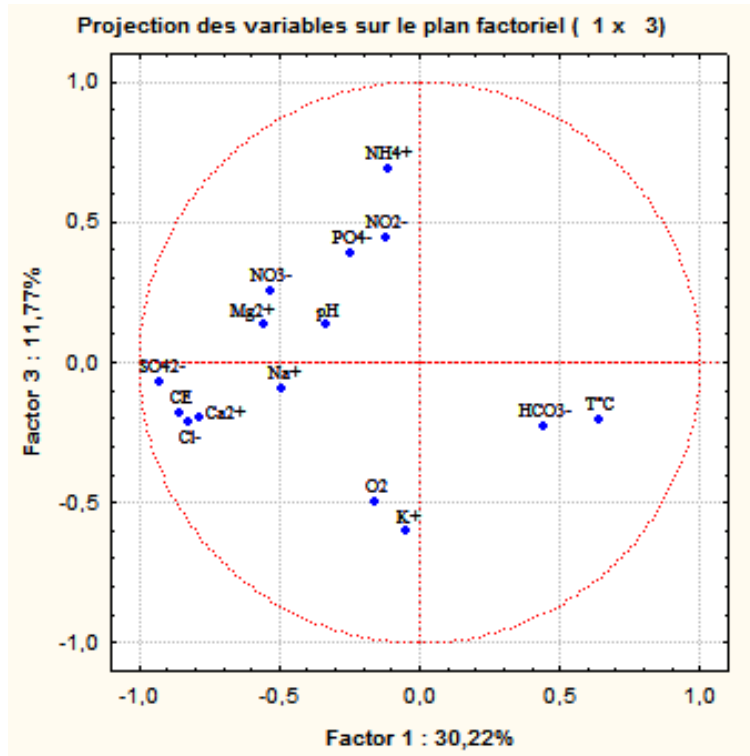


Figure 56 : Projection des variables sur le plan factoriel (1-3).

La projection des variables dans le plan factoriel 3 (Fig. 56) a montré que les éléments de pollution (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^-) ont les meilleures contributions, ce qui prouve le rôle des activités anthropiques surtout les activités agricoles dans le problème de pollution caractérisant les eaux souterraines de la région de Tamlouka. Cette pollution est notée surtout dans les puits traditionnels situés à la zone de Sidi Mâach où l'utilisation des engrais est fréquente pour la culture des céréales, sans oublier que la majorité de ces puits sont mal protégés des eaux usées provenant des fermes qui n'ont pas un réseau d'assainissement.

6-Thermodynamique

Dans cette partie, nous essayerons de définir la nature des sels susceptibles de précipiter dans les eaux de la plaine de Tamlouka à partir de considérations thermodynamiques. L'étude thermodynamique permet d'étudier l'évolution chimique de l'eau en fonction de son état d'équilibre (ou de déséquilibre) vis-à-vis des minéraux primaires et néoformés de la roche-réservoir. Elle compte des interactions électrostatiques entre les différents ions « i » représentées par l'activité ionique. Pour une solution idéale, l'activité et la molarité sont égales. En pratique, la déviation par rapport au cas précédent est présentée par γ_i :

$$a_i = \gamma_i m_i \dots\dots\dots(1)$$

Avec :

a_i : l'activité des ions considérés.

m_i : la molarité des ions considérés.

Le calcul du coefficient d'activité d'une espèce ionique se réalise par deux formules qui dépendent de la force ionique I :

$$I = 1/2 \left(\sum_i m_i Z_i^2 \right) \dots\dots\dots(2)$$

a_i : la molarité de l'ion i considéré.

Z_i : la charge de l'ion i considéré.

Pour une solution concentrée ($I < 0,1$) le coefficient d'activité d'une espèce ionique peut être calculé à l'aide de la loi de DEBYE-HUCKEL :

$$\log \gamma_i = - \frac{AZ_i^2 I^{1/2}}{1 + a_i^o BI^{1/2}} - C_i I \dots\dots\dots(3)$$

Avec :

Z_i : la charge de l'ion i .

a_i^o : paramètre de taille de l'ion i .

A et B : constantes de Debye-Huckel, caractéristiques du solvant et dépendant de la température et de la pression.

I : force ionique de la solution.

C_i : paramètre caractéristique de l'ion i .

Pour des solutions non diluées ($I < 0,5$), le coefficient d'activité est défini par l'équation de DAVIES (Davies, 1962) :

$$\log \gamma_i = -AZ_i^2 \left(\frac{I^{1/2}}{1 + I^{1/2}} - 0,3I \right) \dots\dots\dots(4)$$

L'indice de saturation

L'équilibre d'une solution avec la matrice encaissante est calculé à l'aide de l'indice de saturation IS . Ce dernier vis-à-vis d'un minéral donné est défini par le logarithme décimal du rapport des produits d'activités ionique (PAI) sur le produit de solubilité (K_s):

$$IS = \log \left[\frac{PAI}{K_s} \right] \dots\dots\dots(5)$$

Le K_s est déterminé de manière thermodynamique :

$$\ln K_s = - \frac{\Delta G^0}{RT} \dots\dots\dots(6)$$

Avec :

ΔG^0 : enthalpie libre standard de réaction ($J.mol^{-1}$).

R : constante des gaz parfaits ($1,987 \cdot 10^{-3} \text{ kcal.mole}^{-1}$).

T : température à l'échelle Kelvin. ($T = 273,15 + 25^\circ C$).

Lorsque $IS = 0$, la solution est en équilibre avec une phase minérale (flux de dissolution égal au flux de précipitation). Elle est dite sous-saturée lorsque $IS < 0$ et sursaturée lorsque $IS > 0$. Compte tenu des incertitudes sur les valeurs des constantes thermodynamiques utilisées dans les calculs ainsi que l'imprécision dans les mesures des paramètres physico-chimiques in situ et l'analyse des éléments chimiques, Paces (1972) propose de considérer comme saturée une eau ayant un indice de saturation compris dans l'intervalle :

$$- 0,5 < IS < 0,5 \dots\dots\dots(7)$$

La constante d'équilibre $K_{\text{éq}}$

Elle est liée à l'énergie fournie ou demandée à partir d'une réaction chimique mise en solution ou précipitation, elle peut être calculée selon la relation suivante :

$$\ln(K_{\text{éq}}) = - \frac{\Delta G^0}{RT} \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{Log}(K_{\text{éq}}) = - \frac{\Delta G^0}{1,364} \dots\dots\dots(9)$$

ΔG^0 est l'énergie libre exprimée en kcal.mol^{-1} à une température moyenne de $25^\circ C$ et une pression de 1 atmosphère. Leur variation représente la différence entre la somme des énergies des éléments qui sont produits par la réaction moins la somme des énergies des éléments entrant dans la réaction. La comparaison entre la constante d'équilibre et la constante standard donne une idée sur l'état de saturation des éléments chimiques, plus les valeurs sont supérieures à la valeur standard plus les éléments sont à l'état de sursaturation, alors que si les valeurs sont inférieures à la valeur standard elles sont à l'état de sous saturation.

$$\Delta G^0 = \sum G(\text{produits}) - \sum G(\text{réactifs}) \dots\dots\dots(10)$$

Il existe d'autres méthodes de calcul de la constante d'équilibre à partir des activités ioniques des éléments chimiques dans une réaction :



Avec : a, b, c et d : nombre de moles / A, B, C, D : les éléments chimiques.

$$K_{\text{éq}} = \exp - \frac{\Delta G^0}{RT} = \frac{aC^c \cdot aD^d}{aA^a \cdot aB^b} \dots\dots\dots(12)$$

a est l'activité ionique de chaque élément chimique.

Les 6 minéraux suivants : calcite, dolomite (les carbonates), gypse, halite (les évaporites), le quartz et Chalcédoine (les silicates) influencent la composition chimique des eaux de l'aquifère superficiel de la plaine de Tamlouka à des degrés variables (Tableau 28).

Tableau 28 : Statistiques des indices de saturations.

Paramètre	Indice	IsCalcite	IsDolomite	IsAragonite	IsGypse	Ishalite	IsAnhydrite	IsQuartz	IsChalcédoine
Moyenne		-0,083	-0,71	-0,23	-1,09	-5,74	-1,33	-1,13	-1,58
Ecart-type		0,27	0,53	0,27	0,3	0,19	0,29	0,13	0,12
Minimum		-0,91	-2,2	-1,06	-1,86	-6,29	-2,11	-1,49	-1,9
Maximum		0,64	0,65	0,49	-0,4	-5,36	-0,65	-0,76	-1,22

D'après les indices de saturation vis-à-vis des minéraux considérés, le groupe des carbonates présente des degrés de saturation différents : la dolomite est souvent à l'état de sursaturation avec un indice qui varie entre -2,2 et 0,65. Cependant, les eaux varient d'un état d'équilibre à un état de sursaturation en calcite et aragonite avec un indice de saturation qui varie entre -0,91 et 0,64 (Fig. 57). La dissolution des formations carbonatées cèdent les ions Ca²⁺ et Mg²⁺ qui donnent avec le CO₂ atmosphérique des minéraux carbonatés.

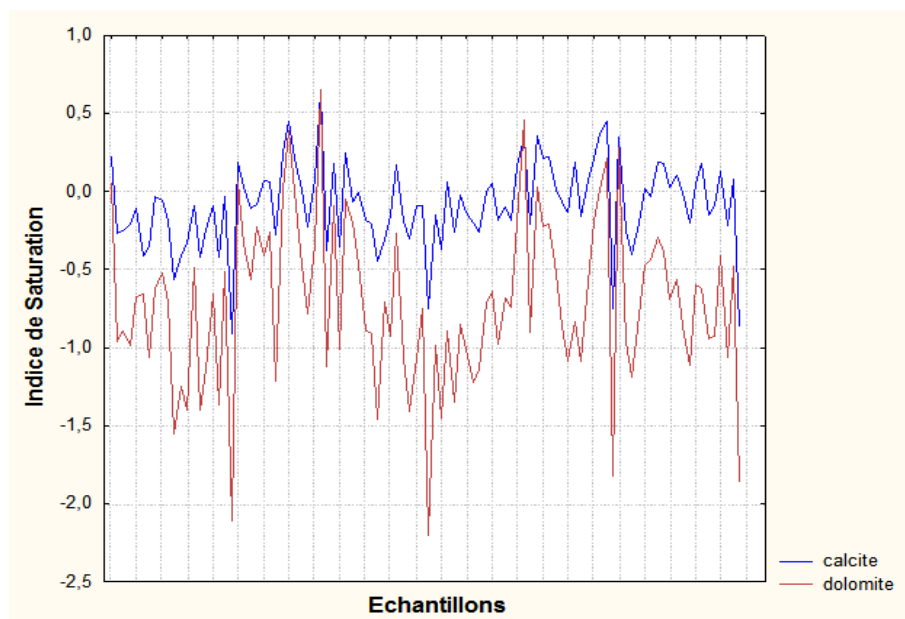


Figure 57 : Variation de l'indice de saturation de la calcite et de la dolomite.

Pour le groupe des évaporites, les eaux sont sous-saturées par rapport à l'anhydrite, le gypse et largement sous-saturées vis à vis de l'halite (-6,29 à 5,36) (Fig. 58). Les minéraux évaporitiques présentent toujours un état de sous-saturation même si les ions Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} sont à forte concentration. La constante d'équilibre des minéraux évaporitiques NaCl (1,60) et CaSO_4 (- 4,58) montre une dissolution de ces minéraux, ce qui traduit par des fortes concentrations des éléments évaporitiques dans l'eau. Par contre la constante d'équilibre pour les minéraux carbonatés est plus faible, Dolomite (-16,75), Calcite (-8,41) ce qui exerce une précipitation rapide des éléments chimiques.

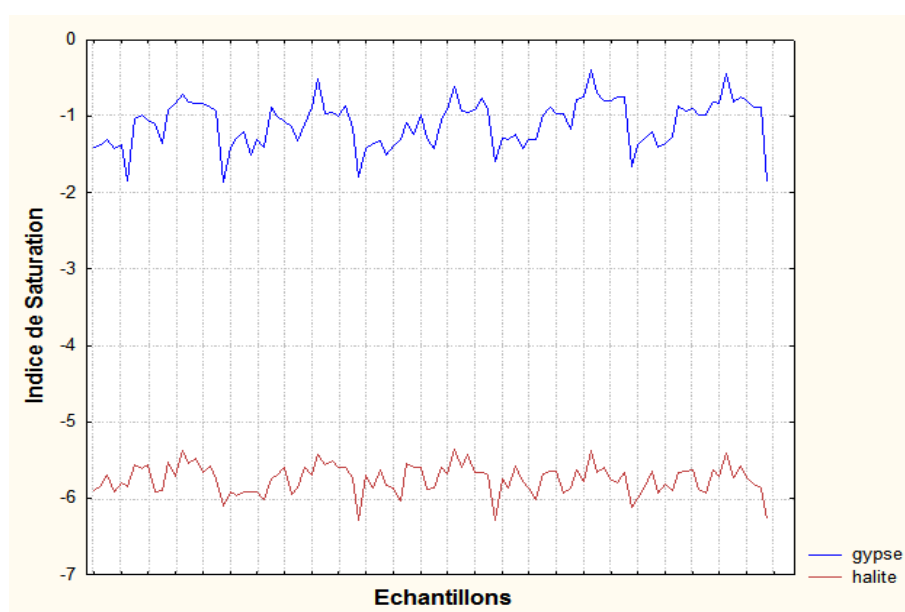


Figure 58 : Variation de l'indice de saturation du gypse et l'halite.

Le groupe des silicates (Quartz, Chalcédoine) présente toujours un état de sous-saturation (Fig. 59), lié à la dissolution des formations géologique (Mio-Plio-Quaternaire) caractérisant toute la plaine sauf au niveau des affleurements calcaires.

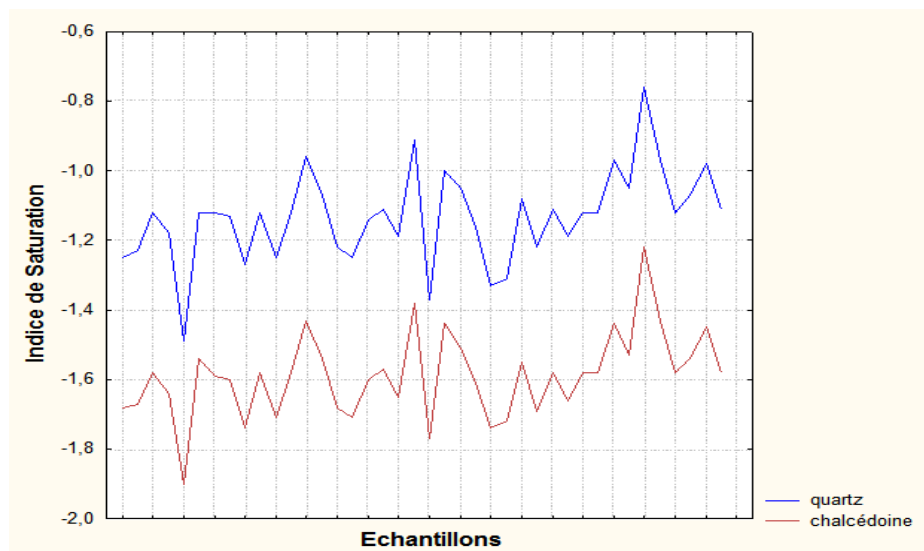


Figure 59 : Variation de l'indice de saturation du quartz et la Chalcédoine.

L'indice de saturation montre que les minéraux carbonatés tendent à précipiter sous la forme de dolomite, de calcite et aragonite. Par contre, les minéraux évaporitiques des cas de l'halite, le gypse et l'anhydrite, tendent à la dissolution.

7- Origine des éléments chimiques

Au cours de son trajet et son séjour souterrain, l'eau dissout un certain nombre de substances des roches qu'elle traverse. Suivant la nature de la roche, on obtient une concentration bien déterminée de sels minéraux dans l'eau. Dans cette partie, nous essayons de déterminer l'origine géologique des éléments chimiques tout dépend de la bonne corrélation qui existe entre eux. Deux relations principales seront examinées au cours du suivi (d'Avril 2012 au Mai 2013).

7-1. Le couple Na^+ - Cl^-

Ces deux éléments chimiques dans les eaux naturelles sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). La représentation graphique de l'évolution des teneurs en sodium en fonction des concentrations en chlorures sur une échelle logarithmique (Fig. 60), montre une répartition stœchiométrique de la plupart des ions Na^+ avec les ions Cl^- pour des fortes concentrations du chlorure oscillent entre 6 et 15 méq/l.

Cette répartition indique l'origine chlorurée sodique commune de ces deux éléments chimiques. Elle est due au lessivage des argiles Mio-Pliocène contenant des sels de NaCl (Halite).

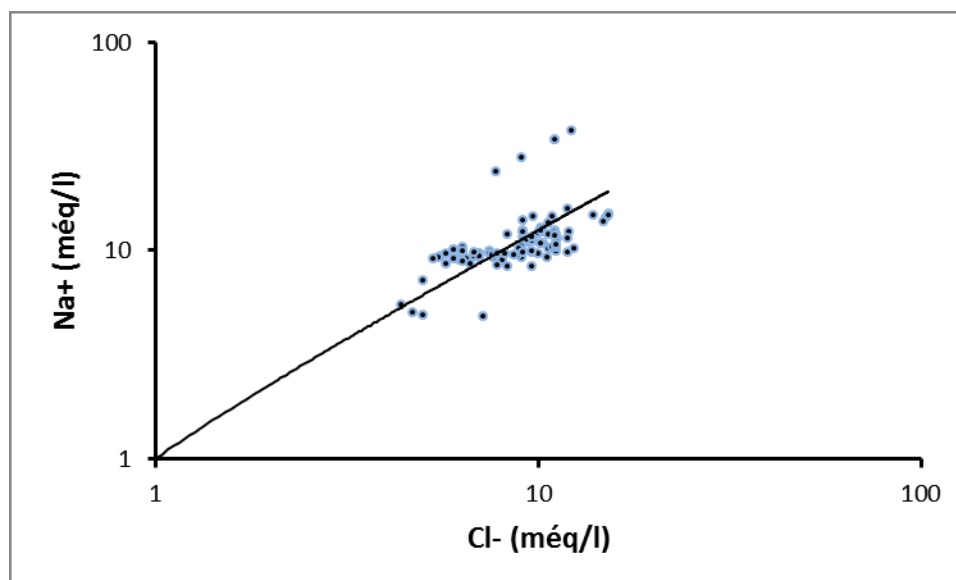


Figure 60 : Relation Sodium - Chlorure.

7-2. Les éléments Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}

L'évolution des teneurs en calcium est déterminée en fonction des teneurs de HCO_3^- et SO_4^{2-} . La figure (61a.) montre qu'un arrangement de la plupart des points au-dessus de la droite, ces points présentent un excès des teneurs en Ca^{2+} indiquant l'origine évaporitique des ions du calcium. La figure (61b.) présente un excès exponentiel en Ca^{2+} , indiquant l'origine évaporitique de Ca^{2+} , et une évolution linéaire traduite par la dissolution des formations carbonatées. En conclusion, ces deux représentations nous montrent que la dissolution des ions calcium à partir des évaporites est plus importante que celle des carbonates. Elle est liée à l'existence des passages gypsifères dans les argiles Mio-Pliocène et les marno-calcaires.

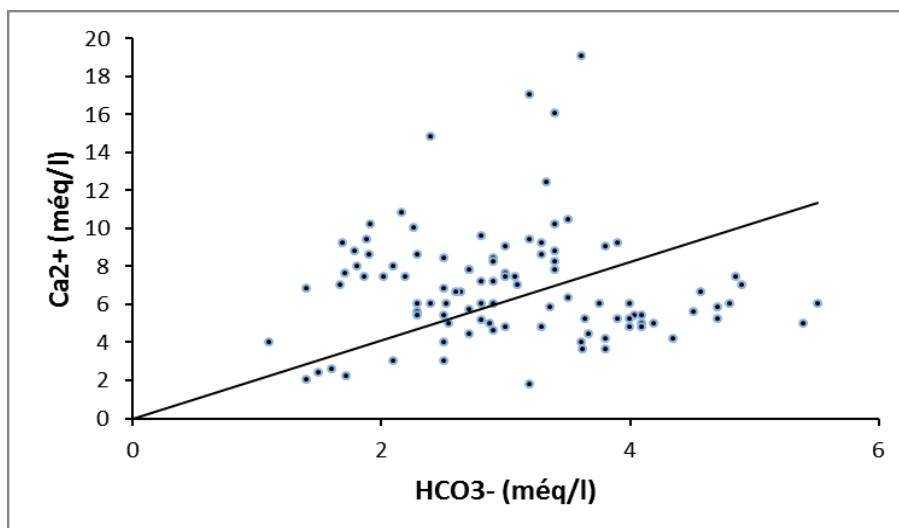


Figure 61.a : Origine du sulfate.

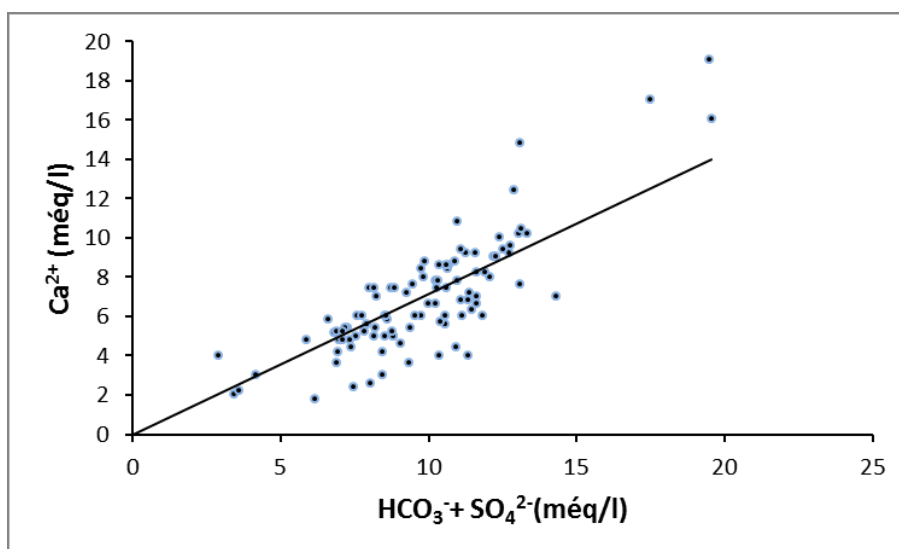


Figure 61.b : Origine du calcium.

8- Etude des rapports caractéristiques

Le rapport caractéristique est le rapport de certains éléments chimiques exprimé en (méq). Trois rapports caractéristiques $\{(SO_4^{2-}/Cl^-), (Mg^{2+}/Ca^{2+}), (Na^+/Cl^-)\}$ sont utilisés pour déterminer l'alimentation et l'écoulement des eaux souterraines en identifiant la nature lithologique des roches réservoirs.

8-1. Le rapport SO_4^{2-}/Cl^-

D'après la figure 62, ce rapport est inférieur à 1 pour 86 % des observations indiquant la prédominance des chlorures liée au lessivage des argiles et des marnes abondantes dans la région. Cependant le rapport dépasse 1 pour 14 % des observations, ce qui traduit par la prédominance des sulfates liée aux formations géologiques riches en marnes gypsifères.

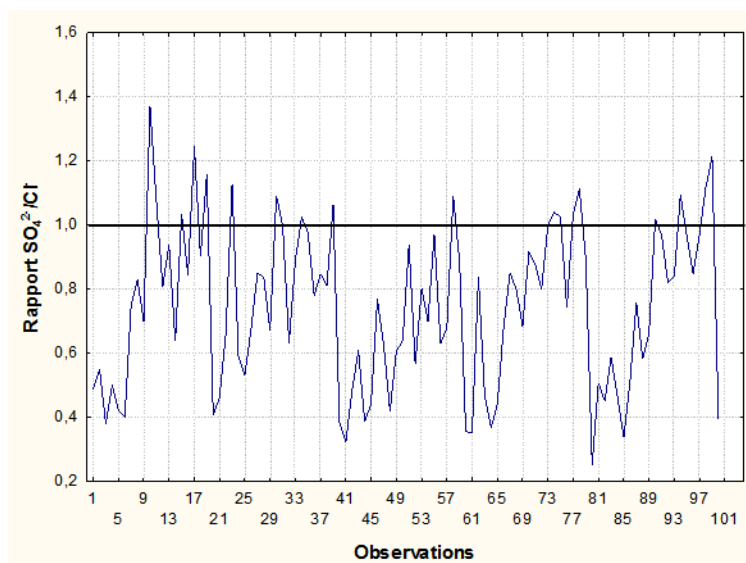


Figure 62 : Variation du rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$.

8-2. Le rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$

Ce rapport est inférieur à 1 pour toutes les observations effectuées (Fig. 63), ce qui traduit une prédominance du calcium dans toute la région. Il varie de 0,065 à 0,91 indiquant la faible solubilité des sulfates de calcium à celle des sulfates de magnésium.

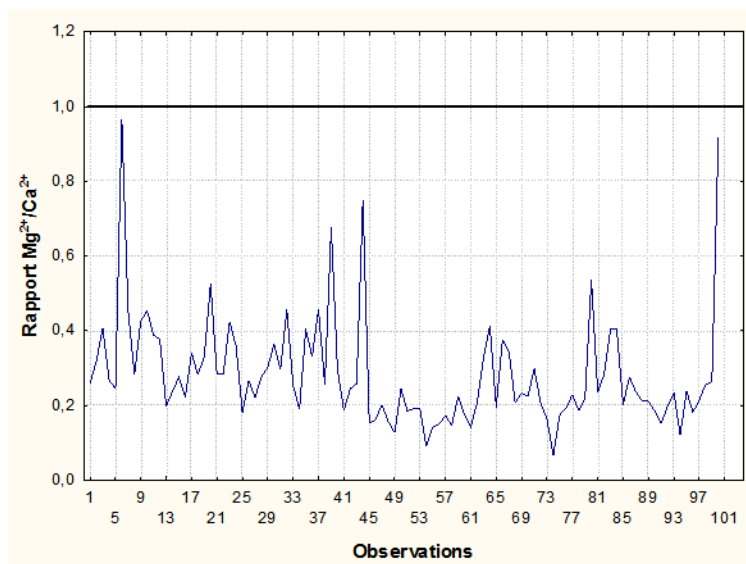


Figure 63 : Variation du rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$.

8-3. Le rapport Na^+/Cl^-

Pour la plupart des observations (83 %), ce rapport est supérieur à la valeur 1 montrant une prédominance du sodium par rapport aux chlorures. L'origine de cette dominance est liée aux formations riches en halite (NaCl) correspondant aux affleurements Mio-Pliocène continentaux renfermant par endroit des passages lagunaires salifères. Lorsque ce rapport est inférieur à 1 (17 % des observations), il y a une prédominance des chlorures liée aux lessivages des argiles et des marnes des formations géologiques du Mio-Pliocène.

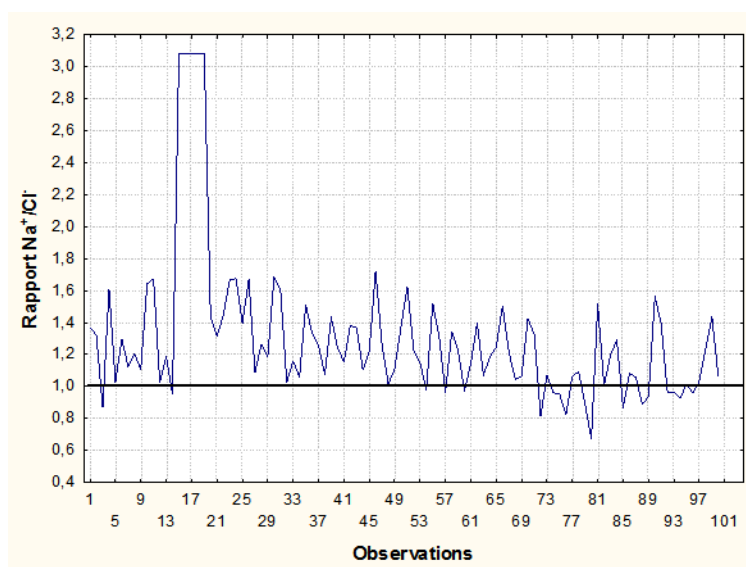


Figure 64 : Variation du rapport Na^+/Cl^- .

9- Echanges de bases

Au cours de leurs trajets souterrains, les eaux en contact avec les différentes substances ayant la propriété d'échanger les ions contre ceux contenus dans l'eau et établir un équilibre hydrochimique. Parmi ces substances, on trouve : les minéraux argileux, les substances organiques et les hydroxydes ferriques. L'indice d'échange de base (IEB) permet de donner une estimation approximative de la durée du contact eau-roche lié à la vitesse d'écoulement. Il est exprimé par la relation suivante :

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

D'après la figure 65, l'indice d'échange de base est négatif pour la plupart des observations. Ceci présente une libération des ions de Na^+ de la roche vers l'eau et la fixation des ions de Ca^{2+} par la roche. Lorsque l'indice d'échange de base est positif, on aura une fixation du sodium par l'argile et la libération du calcium dans l'eau. Ce phénomène explique un écoulement relativement lent.

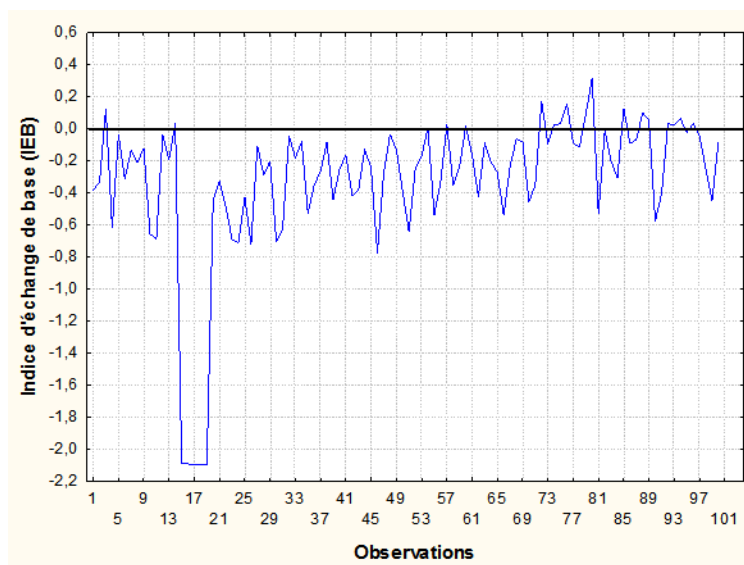


Figure 65 : Variation de l'indice d'échange de base.

10- La Cartographie hydrochimique

L'Association Cartographique Internationale (1966) a défini le terme cartographie comme l'ensemble des études et des opérations scientifiques, artistiques et techniques intervenant à partir des résultats d'observations directes ou de l'exploitation d'une documentation, en vue de l'élaboration de cartes et autres modes d'expression, ainsi que leur utilisation. L'avantage de la cartographie est la modélisation de chaque entité étudiée, pour atteindre un document de synthèse, mettant en exergue les éléments essentiels à des fins analytiques. La cartographie s'est informatisée avec l'apparition des logiciels d'aide à l'établissement des cartes, donc l'ordinateur est devenu l'outil du géographe pour la production cartographique et l'analyse spatiale. C'est alors que le concept de « Système d'Information Géographique » le S.I.G est né. Un système d'information géographique SIG se définit comme un ensemble accordé à des opérations généralement informatisées destinées à transcrire et à utiliser des données géographiques sur un même territoire (Berger et al., 2005). Il peut être identifié à l'aide de quatre principales fonctionnalités : l'acquisition des données d'entrée ; stockage, récupération et gestion de bases de données ; manipulation et analyse des données ; et l'affichage des données permettant à l'utilisateur d'appréhender les phénomènes spatiaux (Hessas, 2005). Le SIG combiné à la cartographie va nous permettre de réaliser des documents cartographiques montrant la variation spatiale des paramètres hydrochimiques des eaux de la plaine de Tamlouka, en utilisant logiciel Map-info 7.5.

10-1. les résultats obtenus

Après avoir placé les points des échantillonnages, sur une carte topographique au 1/50.000ème géo référencier et scanné, nous avons procédé à l'introduction des données hydrochimiques des campagnes d'analyses d'Avril 2012 à Mai 2013. Nous avons obtenus les cartes thématiques suivantes :

10-1-1. Carte de la variation spatiale de la conductivité électrique

L'observation de la carte de la variation de la conductivité électrique (Fig. 66), montre des fortes minéralisations au Sud et à un degré moins élevée au centre de la plaine. Au cours des cinq campagnes effectuées, les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau du puits P8 et le forage F10. Les valeurs les plus faibles sont notées dans la partie Est.

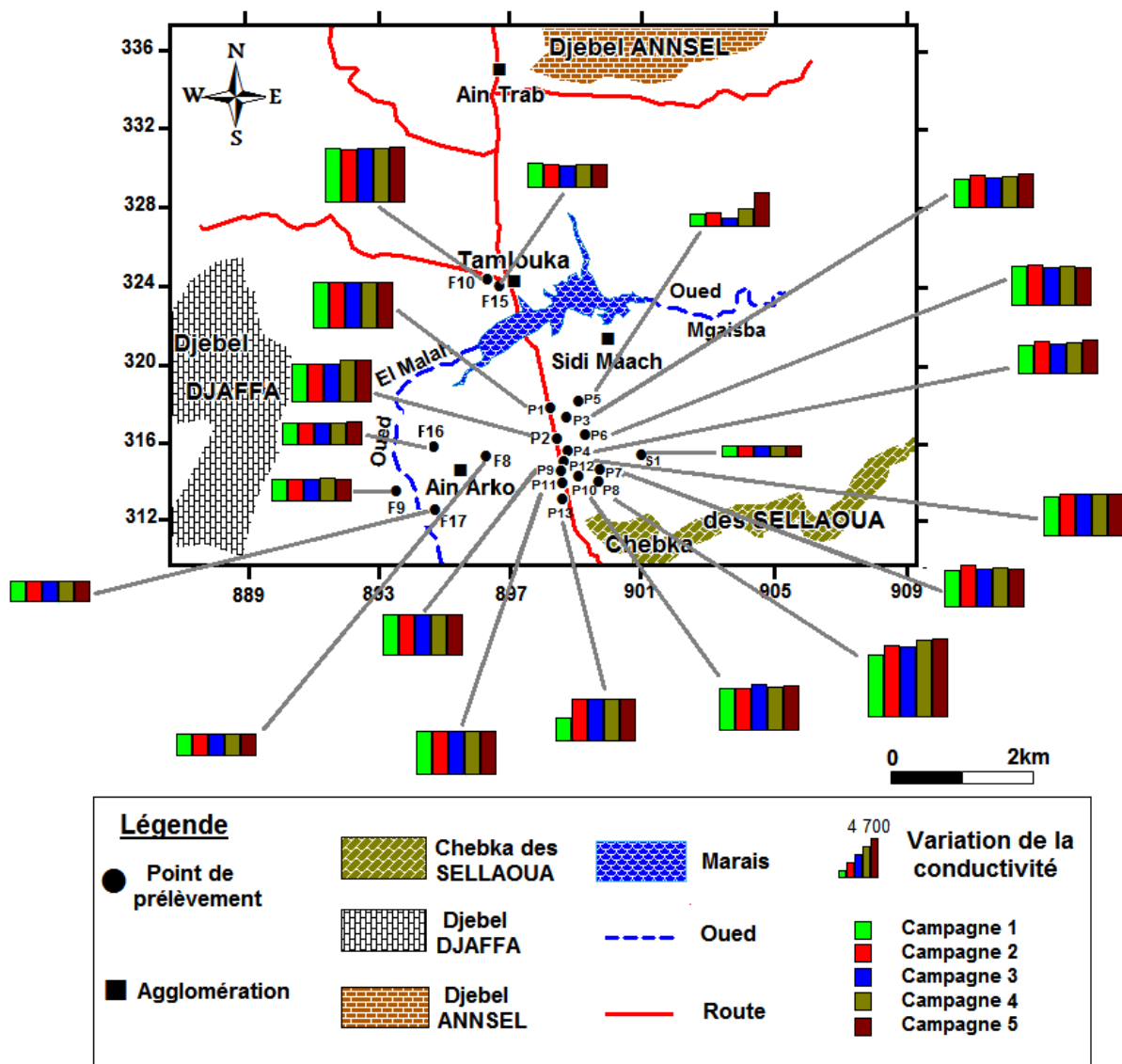


Figure 66 : Variation spatiale de la conductivité électrique (Avril2012-Mai 2013).

Cette variation de la conductivité de l'Est vers le centre et le Sud de la plaine peut être expliquée par la faible perméabilité des formations géologiques, ce qui favorise la dissolution des éléments chimiques par le contact de l'eau et ces formations. Par contre, les faibles concentrations enregistrées peuvent être le résultat d'une alimentation par les massifs permettant la dilution des eaux.

10-1-2. Carte de la variation spatiale du calcium

La carte d'évolution du calcium montre des faibles teneurs au centre et à l'Est qui augmente progressivement vers le Sud de la plaine où les valeurs les plus élevées sont repérées au point P8 (Fig.67). Cette tendance peut être expliquée par l'origine évaporitique du calcium.

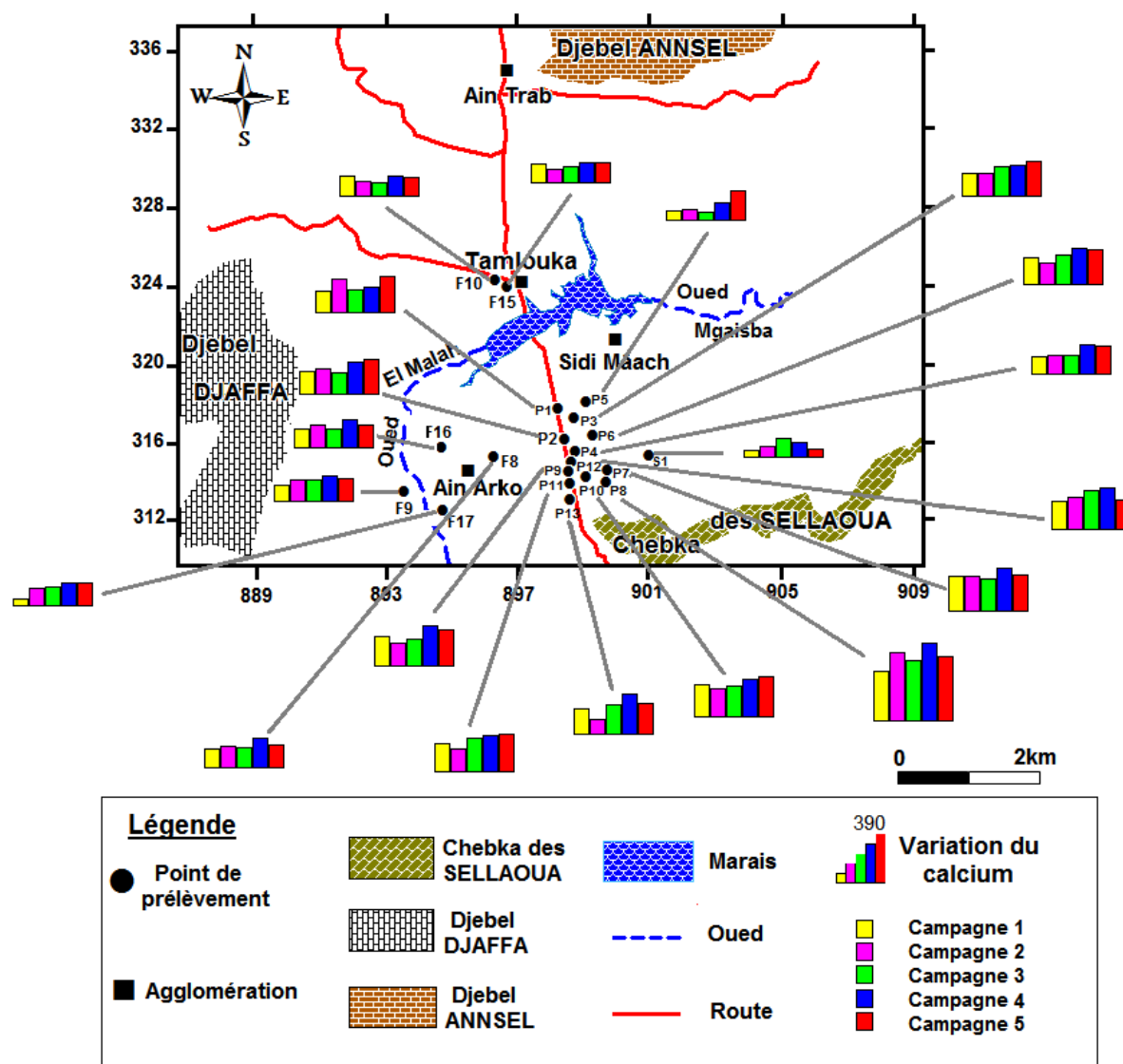


Figure 67 : Variation spatiale du calcium (Avril2012-Mai 2013).

10-1-3. Carte de la variation spatiale du sodium

L'observation de la figure 68 montre des teneurs à un degré moins élevée pour toute la région d'étude, à l'exception de la première campagne (Avril 2012) où on note des valeurs très élevées au Sud de la plaine, notées pour les puits : P9, P10, P11, P12 et P13. La dilution par les eaux de pluies surtout contribue à la diminution des teneurs en sodium, provenant de la dissolution des évaporites. La modélisation géochimique a montré que les eaux de la plaine de Tamlouka sont largement sous-saturées vis-à-vis de l'halite, donc une dissolution de ce minérale dans ces eaux explique les teneurs élevées en sodium enregistrées.

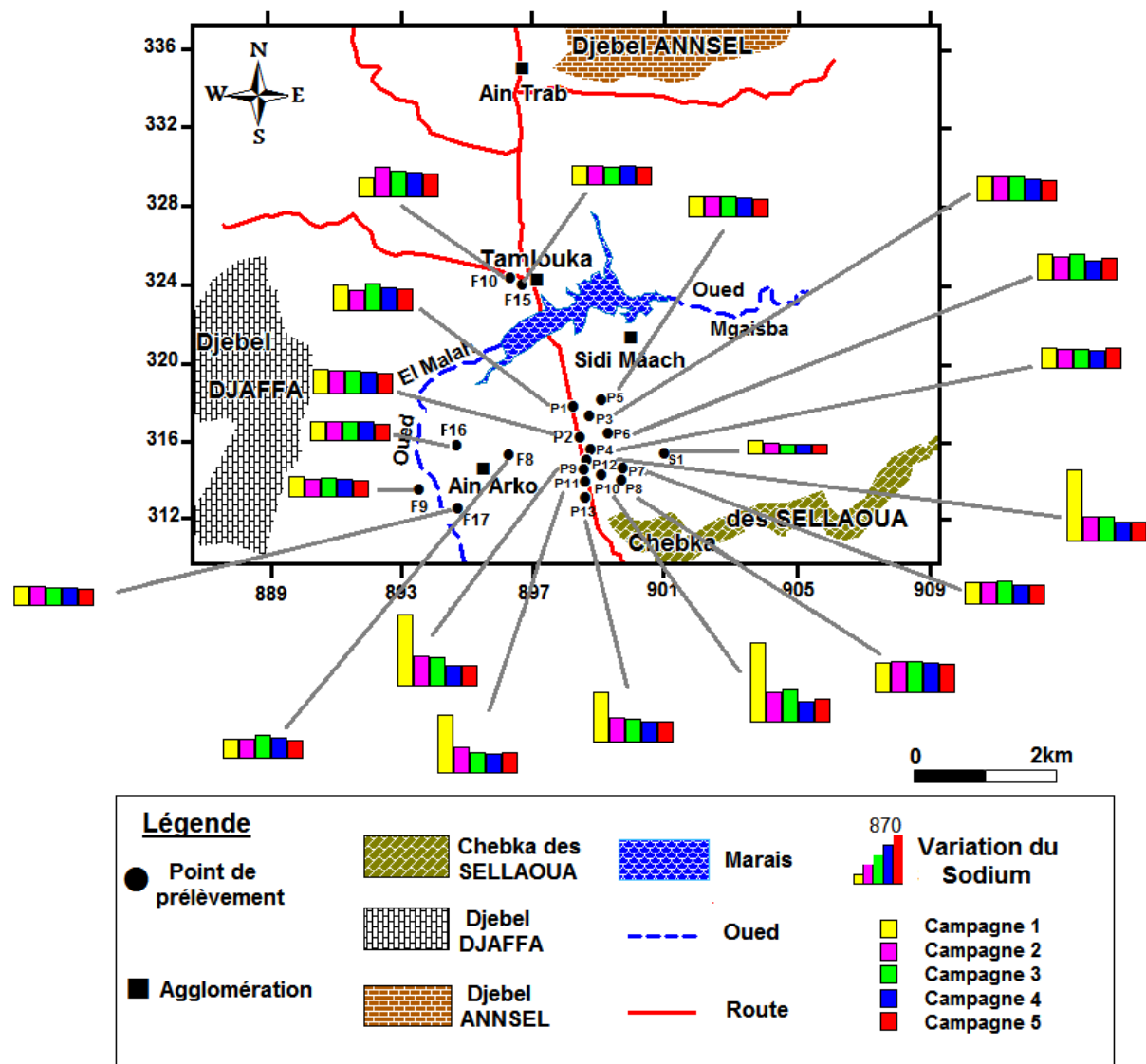


Figure 68 : Variation spatiale du sodium (Avril2012-Mai 2013).

10-1-4. Carte de la variation spatiale des bicarbonates

Suivant la carte de la variation des bicarbonates (Fig. 69), les concentrations sont relativement importantes pour tous les points avec des concentrations élevées notées pour tous les forages situés au centre et au Sud de la plaine. Cette variation des teneurs par endroit est liée à la proximité de la zone d'alimentation et de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines. D'autre part les fortes teneurs enregistrées au niveau des forages peuvent être liées aux massifs du Djebel DJAFFA et celui d'Ain Arko, qui sont essentiellement des calcaires fissurés représentant l'origine principale des bicarbonates.

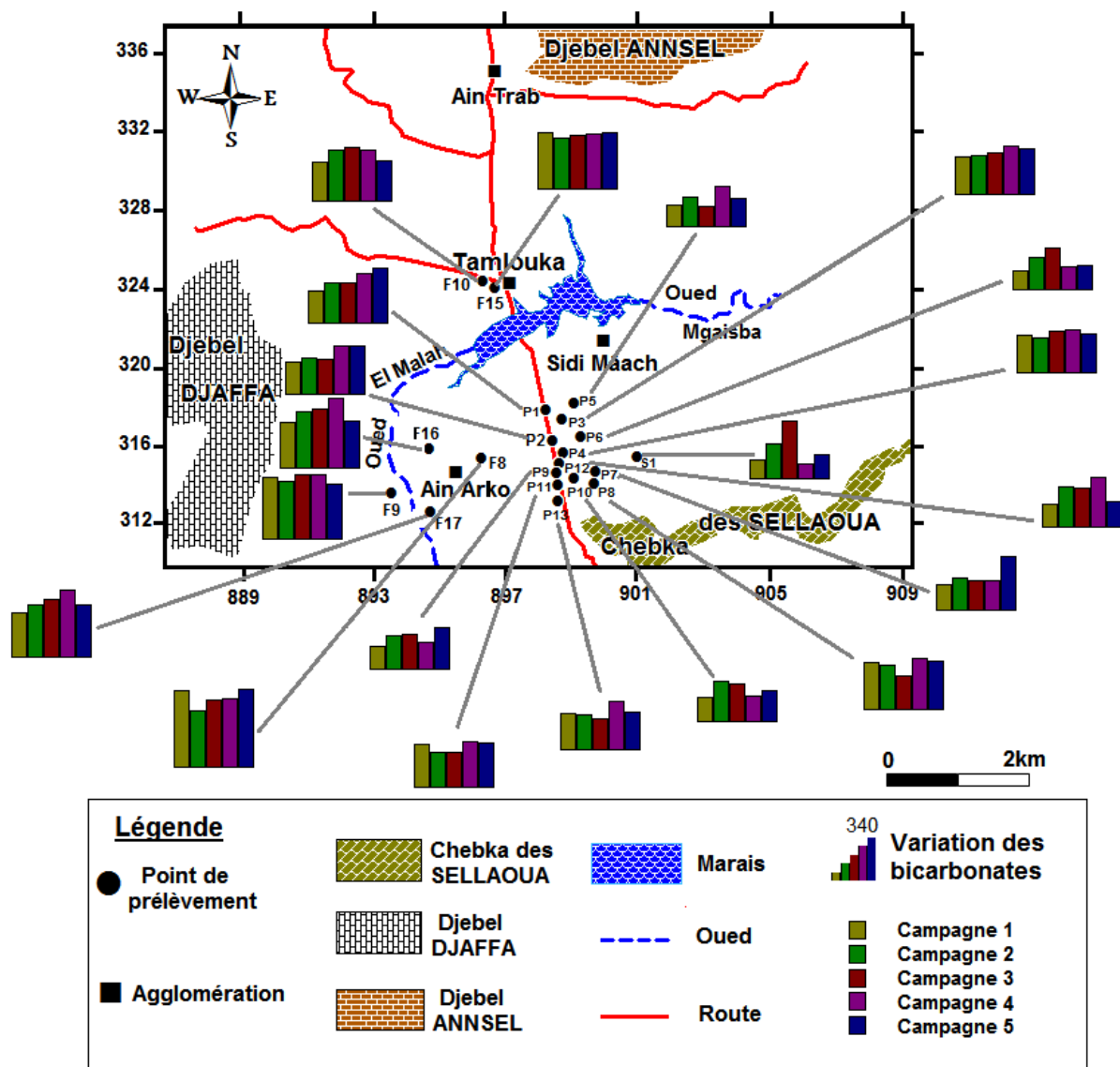


Figure 69 : Variation spatiale des bicarbonates (Avril2012-Mai 2013).

10-1-5. Carte de la variation spatiale des chlorures

L'observation de la carte des chlorures (Fig. 70), montre des teneurs importantes pour toute la plaine surtout au Sud où elles peuvent aller jusqu'à 542 mg/l. Dans la partie Sud, l'origine des fortes concentrations est due principalement au lessivage des argiles du Mio-Pliocène contenant des sels de l'halite. Par contre, au centre de la plaine au niveau des forages F10 et F15, les valeurs élevées enregistrées sont liées aux interactions marneuses repérées au sein de la lithologie de ces derniers.

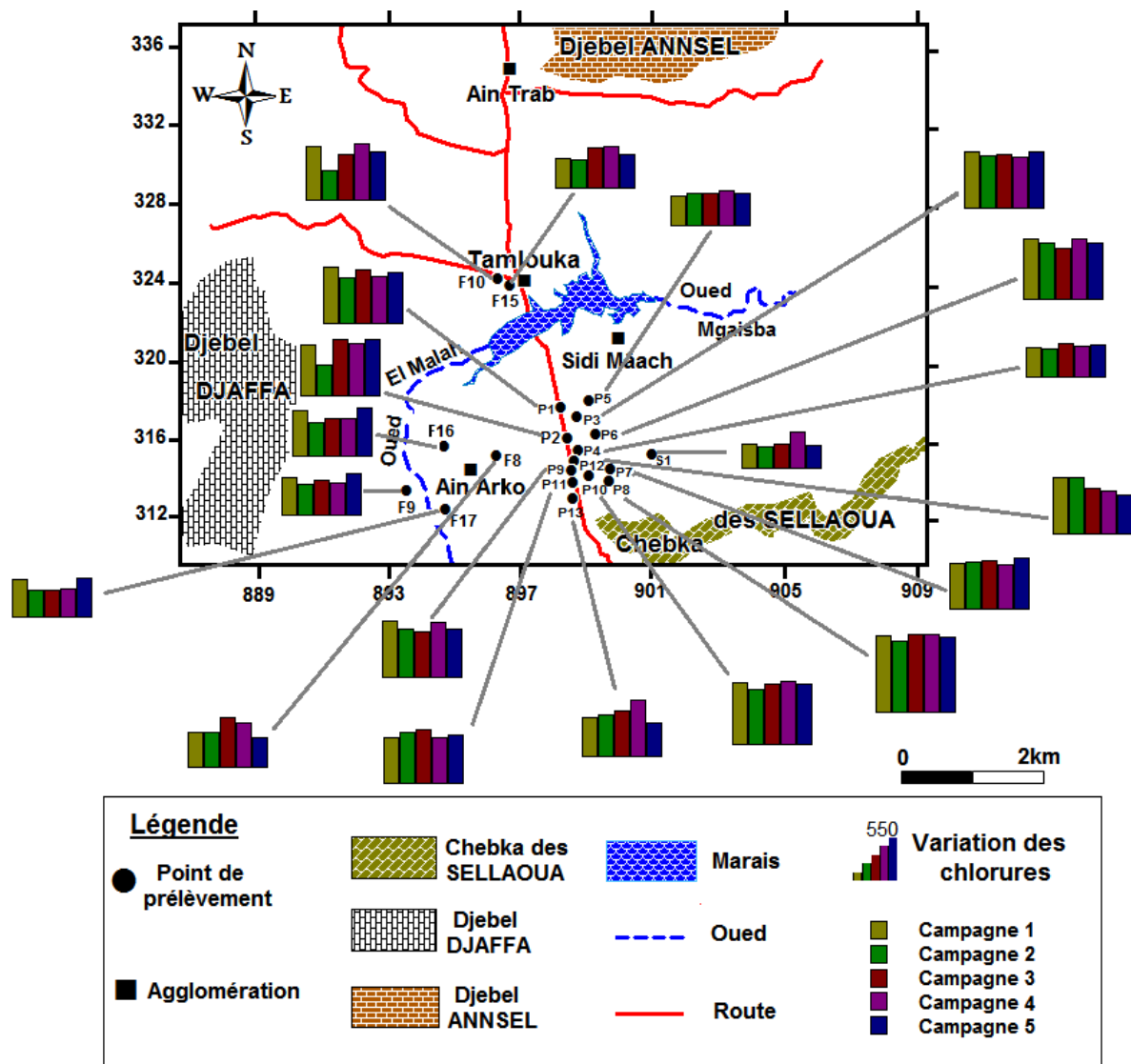


Figure 70 : Variation spatiale des chlorures (Avril2012-Mai 2013).

10-1-6. Carte de la variation spatiale des sulfates

La carte d'évolution des sulfates (Fig. 71), indique une diminution des teneurs en sulfates dans la partie centre et Sud-Ouest de la plaine. Ces teneurs augmentent pour atteindre des valeurs élevées au niveau des puits avec un maximum noté au niveau du point P8.

L'origine de cette augmentation peut être liée à la présence de plusieurs sels (le gypse, le sulfate de calcium et le sulfate de sodium) dans les formations géologiques de la région, notamment les passages gypsifères dans les argiles du Mio-Pliocène et les marno-calcaires.

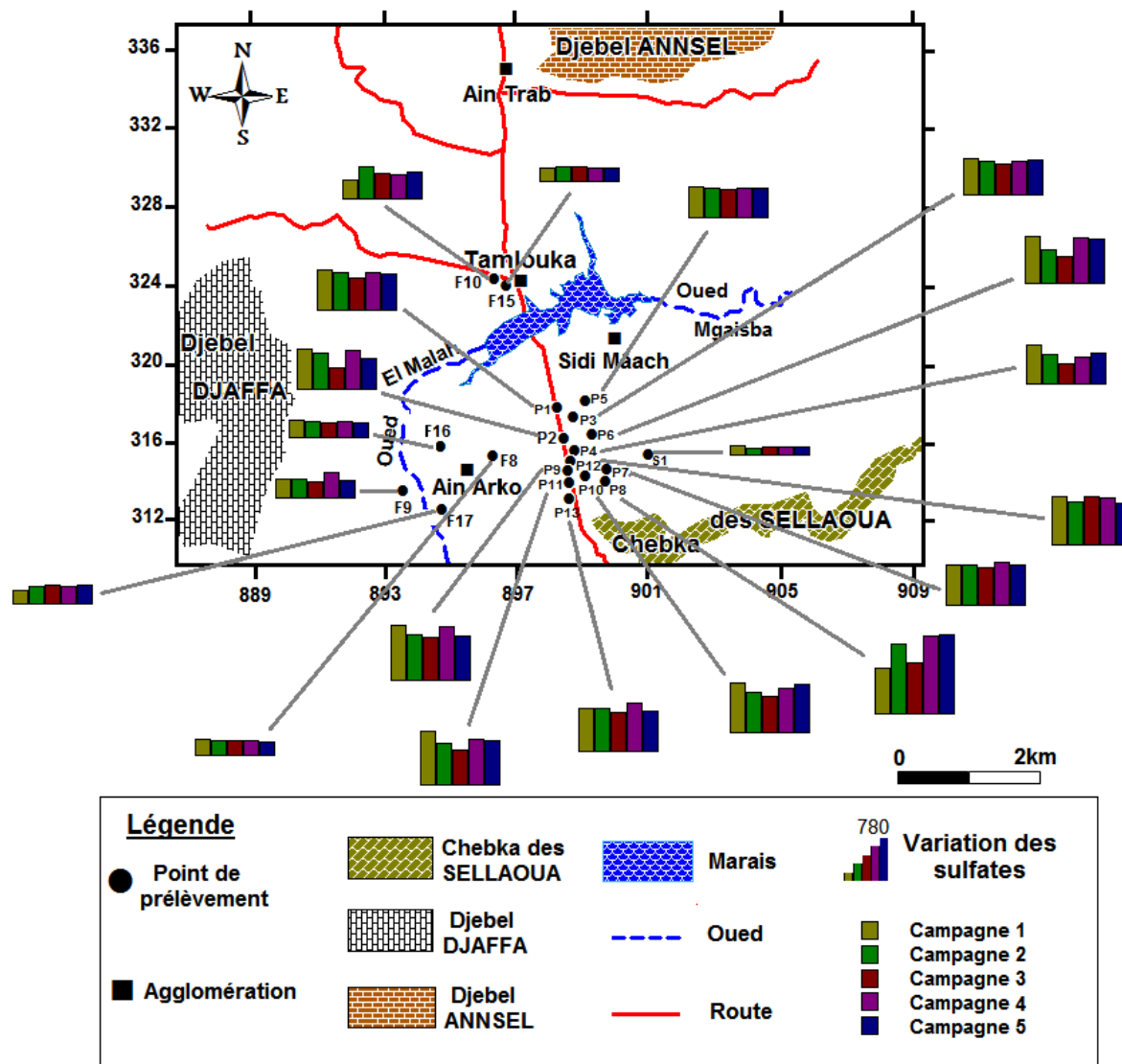


Figure 71 : Variation spatiale des sulfates (Avril2012-Mai 2013).

10-1-7. Carte de la variation spatiale des nitrates

La carte des nitrates (Fig. 72) montre des valeurs assez élevées au centre et au Sud et à un degré moins au Sud-Ouest de la plaine. L'absence des réseaux d'assainissements et l'utilisation excessive des engrais, avec la mauvaise protection des puits dans la région contribuent à une pollution des eaux souterraines à partir de la surface.

Dans les régions rurales, l'utilisation des fertilisants dans l'agriculture et les eaux usées sont considérées comme les deux principales sources anthropiques de la contamination des eaux par les nitrates, les pesticides et les microorganismes. Les concentrations élevées des nitrates peuvent conduire à une méthémoglobinémie, et à long terme elles deviennent cancérigènes (Bonton et al. 2010).

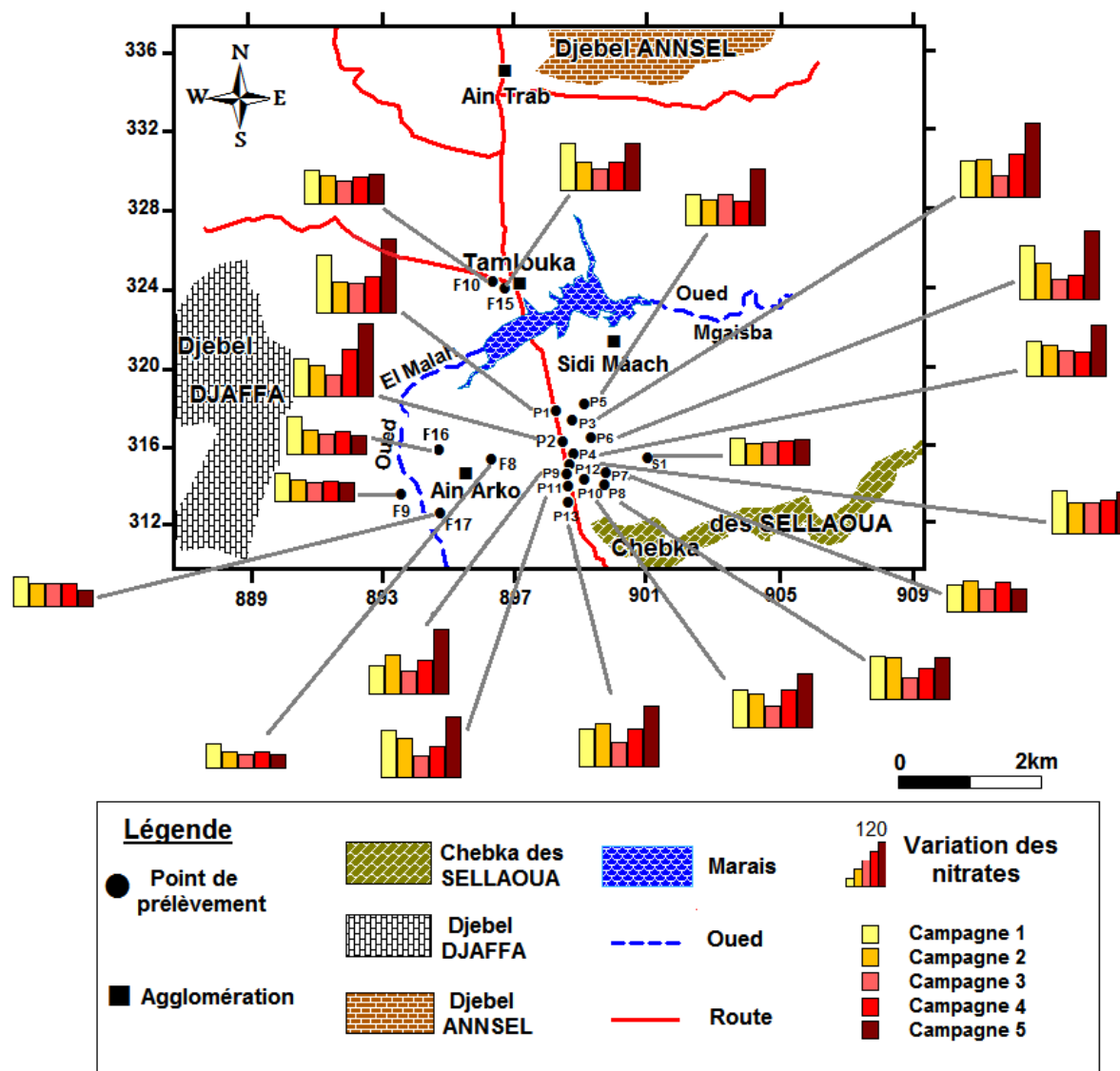


Figure 72 : Variation spatiale des nitrates (Avril 2012-Mai 2013).

11- Aptitude des eaux à l'irrigation

La plaine de Tamlouka s'étale sur une superficie de plus de 300 km², dont la plus grande partie est à vocation agricole. Cette activité agricole demande beaucoup d'eau afin de subvenir aux besoins des diverses cultures.

La qualité chimique de l'eau destinée à l'irrigation tiennent compte non seulement des caractères chimiques de l'eau, mais également de la nature des cultures, du type de sols, du climat, des méthodes d'irrigation et des propriétés de drainage du sol. La salinité crée divers problèmes pédologiques et agronomiques, ces sels altèrent la perméabilité du sol ce qui modifie son aération et affecte le développement des plantes. Pour classer les eaux d'irrigation, il est important d'évaluer les concentrations de ces sels et particulièrement le sodium. Les fortes teneurs en cet élément provoquent un changement de la structure physique du sol tout en modifiant leur perméabilité et rendre la circulation de l'eau plus lente au sein du sol. Le Sodium Absorption Ratio (SAR) est défini comme étant une mesure du pouvoir de remplacement des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} par le Na^+ dans les argiles et les colloïdes. Il est défini par la relation suivante :

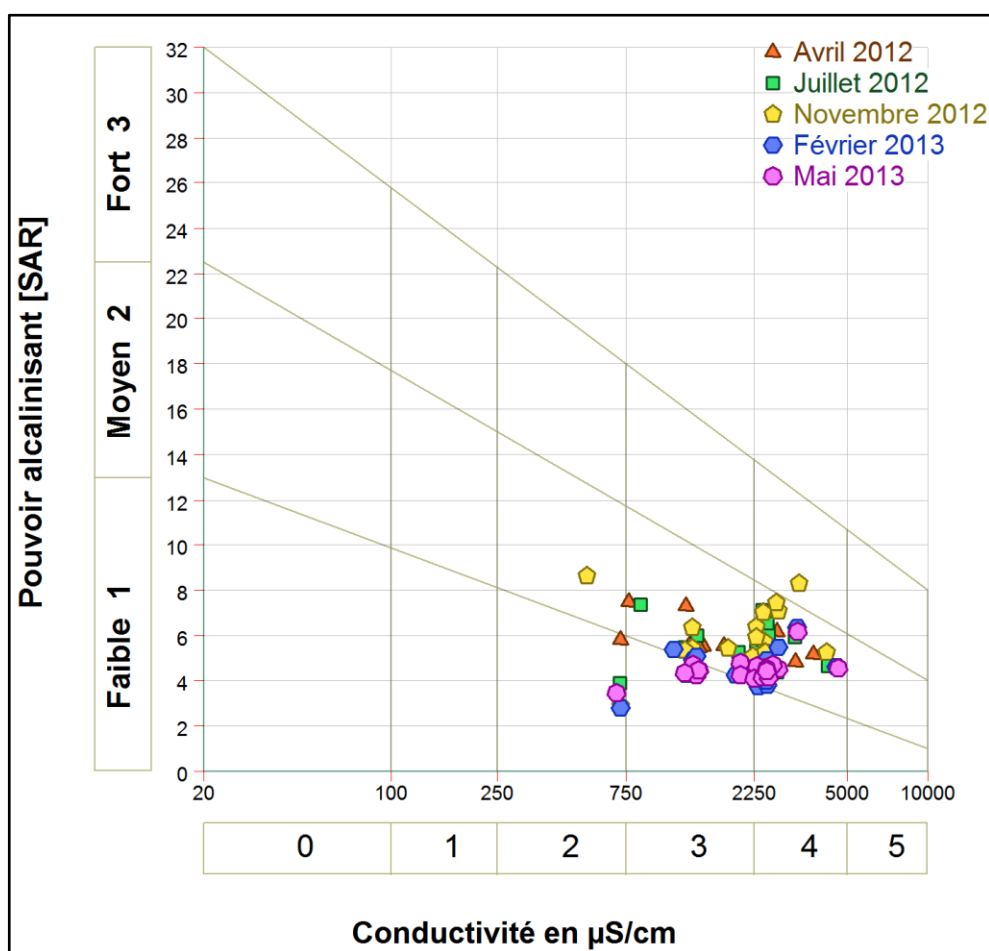
$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} (mg/l)$$

En 1954 le laboratoire de salinité de Département de l'agriculture (U.S.A) a proposé un diagramme délimitant les cinq classes (Tableau 29) fondées sur la minéralisation totale et le Sodium absorbé par le sol. Le diagramme de Richards est établi en fonction du rapport entre le SAR et la conductivité électrique de l'eau (Fig. 73).

Tableau 29 : Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du SAR (Louvrier, 1976).

Degrés	Qualité	Classe	Etat d'utilisation
1	Excellente	C1-S1 C1-S2	Utilisation sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols.
2	Bonne	C2-S1 C2-S2	Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles
3	Admissible	C3-S1, C2-S3, C3-S2	La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainés.
4	Médiocre	C4-S1, C4-S2, C3-S3	Eau fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité.
5	Mauvaise	C3-S4, C4-S3, C4-S4	Inutilisable.

D'après la figure 73, on remarque que l'ensemble des points d'eau se situe dans les trois classes du 2, 3 et 4 dont le risque de salinisation est moyen à fort. Il ressort de cette classification que dans l'ensemble, les eaux sont d'une bonne qualité pour quelques points et admissible pour d'autres points, mais pour la plupart des eaux de la plaine de Tamlouka sont très chargées et sont donc de qualité médiocre mais pouvant être utilisées sous certaines conditions : sols très perméable, bon lessivage, plantes tolérantes très bien le sel.



Conclusion

L'étude hydrochimique des eaux souterraines de la plaine de Tamlouka permet de dire que :

- ✓ Généralement, les eaux souterraines de la région d'étude présentent une forte minéralisation traduisant la prédominance des faciès chlorurée sulfatée sodique et chlorurée sulfatée calcique.
- ✓ Sur le plan statistique, les éléments chimiques des eaux de la plaine de Tamlouka présentent une bonne corrélation entre le calcium et les chlorures, le calcium et les sulfates, les chlorures et les sulfates et le sodium avec les sulfates ce qui confirme l'origine évaporitique du chimisme des eaux de la région.
- ✓ L'analyse en composante principale a révélé la présence de trois facteurs influencent la qualité des eaux souterraines, à savoir un facteur f1 de minéralisation et deux facteurs f2 et f3 de pollution.
- ✓ L'étude thermodynamique en utilisant la modélisation géochimique appliquée sur 100 échantillons, nous a permis d'obtenir les indices de saturation suivants :
 - Une sursaturation vis-à-vis le groupe des carbonates, à savoir la dolomite suivi de la calcite et l'aragonite ce qui exerce une précipitation rapide des éléments chimiques.
 - Une sous-saturation par rapport à l'anhydrite, le gypse et largement sous-saturées vis à vis de l'halite (-6,29 à 5,36) montre une dissolution de ces minéraux.
 - Le groupe des silicates (Quartz, Chalcédoine) présente toujours un état de sous saturation, lié à la dissolution des formations géologique (Mio-Plio-Quaternaire).
 - L'étude de l'origine des éléments chimiques par les rapports caractéristiques montre l'influence des formations du Mio-Pliocène sur la dominance de l'halite.
- ✓ Après analyse des cartes thématiques de la conductivité électriques, calcium, sodium, bicarbonates, chlorures, sulfates, et les nitrates à l'aide de système d'information géographique, nous avons pu de dire :
 - Des fortes minéralisations notées au Sud et à un degré moins élevée au centre de la plaine.
 - La variation spatiale des éléments chimiques diffère. La carte d'évolution du calcium montre des faibles teneurs au centre et à l'Est qui augmente progressivement vers le Sud de la plaine, alors que le sodium présente des teneurs à un degré moins élevée pour toute la région d'étude, à l'exception de la première

campagne où on note des valeurs très élevées au Sud de la plaine, notées pour les puits : P9, P10, P11, P12 et P13.

- Suivant la carte de la variation des bicarbonates et les chlorures les concentrations sont relativement importantes pour toute la plaine, tandis que la carte des sulfates indique une diminution des teneurs dans la partie centre et Sud-Ouest de la plaine.
 - La variation spatiale des nitrates montre des valeurs assez élevées au centre et au Sud et à un degré moins au Sud-Ouest de la plaine. Ces teneurs élevées en nitrates sont attribuées à une pollution organique diffuse à partir de la surface.
- ✓ Selon le diagramme de RICHARDS, les eaux souterraines de la plaine de Tamlouka sont d'une bonne qualité pour quelques points et admissible pour d'autres, mais pour la plupart elles sont très chargées et sont donc de qualité médiocre pour être utilisées à des fins agricoles.

Chapitre IV : Étude bactériologique

A. Introduction

L'eau potable est un besoin fondamental pour le développement humain, la santé et le bien-être, et pour cette raison, il est considéré comme un droit de l'homme. C'est une ressource limitée, essentielle pour l'agriculture, les animaux, l'industrie, et encore plus importante pour l'existence humaine. L'utilisation des eaux souterraines comme source d'eau potable est souvent préféré en raison de sa bonne qualité microbienne dans son état naturel. La pollution microbienne de ces eaux représente l'un des aspects les plus inquiétants entraînant des perturbations environnementales et qui a de profondes implications pour la santé publique, en particulier dans les pays en développement où l'eau souterraine est la seule source d'eau potable et d'irrigation. Universellement, la pollution bactériologique de l'eau est évaluée par la recherche et le dénombrement des germes indicateurs de contamination fécale dont la présence en nombre élevé indique une pollution d'origine fécale et la présence probable de microorganismes pathogènes (Bricha et al., 2007 ; Aboukacem et al., 2007 ; Papaioannou et al., 2010 ; Lugoli et al., 2011).

B- Résultats des analyses bactériologiques de l'eau

Les analyses bactériologiques des eaux souterraines de la plaine de Tamlouka nous montrent une contamination bactérienne variable, dépassant les normes de potabilité pour la plupart des échantillons, les données seront représentées sous deux formes pour mieux comprendre et interpréter cette variation : l'une présentant les normes de potabilité microbiologique, établies par des pays ou organisations ; et l'autre forme est statistique, présentant les valeurs maximales, moyennes, minimales et les écarts types (Tableau 30, et 31). L'identification des germes pathogènes et la discussion des résultats seront traitées après.

Tableau 30 : Norme de potabilité de l'eau.

Paramètres microbiologiques	Unités	Valeurs limites		
		Algérie ⁽¹⁾	France ⁽²⁾	OMS ⁽³⁾
Germes aérobies revivifiables à 22 °C et à 37 °C	UFC/ml	/	/	/
Coliformes totaux	CT/100 ml	/	/	10
Coliformes fécaux	CF/100 ml	0	0	0
Streptocoques fécaux	SF/100 ml	0	0	0
Anaérobies sulfito-réducteurs	ASR/20 ml	0	0	0

⁽¹⁾ : Selon le décret du 22 mars 2011 (J.O.R.A.), Algérie.

⁽²⁾ : Selon l'arrêté du 11 janvier 2007 (J.O.R.F.), France.

⁽³⁾ : Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.), 2004.

Tableau 31 : Résultats des analyses bactériologiques des eaux souterraines de plaine de Tamlouka.

Paramètres microbiologiques		FT à 22 °C	FT à 37 °C	CT	CF	SF	ASR
Paramètres statistiques	Moyenne	46,76	67,88	74,97	16,77	14,07	2,3
	Ecart-type	92,66	132,26	84,31	28	14,13	6,3
	Minimum	0	0	0	0	0	0
	Maximum	456	740	240	160	54	32
Normes		/	/	10 (3)	(1), (2) et (3)	(1), (2) et (3)	(1), (2) et (3)
Nombre d'observation		80	80	80	80	80	80

1- Prélèvements

Des prélèvements saisonniers sont régulièrement effectués au niveau des stations choisies durant la période allant du mois d'Avril 2012 au mois de Février 2013, soit un total de 80 prélèvements. Les prélèvements sont effectués entre 7:30 h et 11:00h dans des conditions d'asepsie rigoureuse, en utilisant des flacons stériles de 250 ml en verre pyrex munis d'un large col et d'un bouchon à vis métallique.

Les techniques de prélèvement sont variables en fonction l'origine de l'eau à analyser. Pour les eaux des puits, le prélèvement est effectué au moins à 30 cm au-dessous de la surface à l'aide d'un flacon muni d'un cordon tout en évitant de toucher les bords et le fond de puits. Nous ouvrons le flacon un peu et nous l'introduisons dans le puits ; ensuite nous le retirons rempli d'eau et nous détachons le cordon. Enfin, nous refermons le flacon aseptiquement. Pour les forages, ils sont munis de pompes et le prélèvement de l'eau est effectué après un flamage du robinet et un pompage prolongé dans le but d'avoir une eau de qualité permanente. Pour les eaux d'une source jaillissante comme notre cas, il convient d'isoler en premier lieu le point d'émergence de l'eau, et de préparer un emplacement de captage. Le flacon est placé dans une position où l'ouverture soit dans la direction d'où provient le flux (Guiraud, 1998 ; Thierrin et al., 2001 ; Bricha et al., 2007 ; Rodier, 2009). Les échantillons sont ensuite conservés en glacière réfrigérée (4 °C) et transmis directement au laboratoire, il est important de procéder à l'analyse dans un délai très court (inférieur à 8 heures).

2- Méthodes d'analyses

Les analyses bactériologiques ont été réalisées au niveau du laboratoire de microbiologie de la direction de la santé de la wilaya de Guelma et le laboratoire de biotechnologie microbienne de l'Université SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH à Fès, Maroc.

2-1. Recherche et dénombrement des germes revivifiables

La recherche et le dénombrement des germes revivifiables se réalisent à deux températures différentes afin de cibler à la fois les microorganismes à tendance psychrophiles soit à 22 °C et ceux mésophiles soit 37 °C. (Rejsek, 2002). A partir d'une solution mère (l'eau à analyser), porter aseptiquement deux fois une quantité de 1 ml au fond de deux boîtes de Pétri vides, préparées et numérotées à l'avance pour cet usage (Fig. 74). Ensuite, compléter ces deux boîtes avec une quantité d'environ 15 à 20 ml de gélose TGEA fondue, refroidir à 45°C, et maintenir une agitation délicate en utilisant un mouvement circulaire et de va-et-vient en forme de (8) pour permettre à l'eau de se mélanger à la gélose. Laisser le milieu 10 minutes sur la palliase pour se solidifier, puis rajouter une deuxième couche d'environ 5 ml de la même gélose. L'incubation se fait à 37 °C pendant 48h pour la première boîte et à 22 °C pendant 72h, tout en assurant :

- Une première lecture à 24 heures ;
- Une deuxième lecture à 48 heures ;

- Et une troisième lecture à 72 heures.

Les germes revivifiables se présentent dans les deux cas sous forme de colonies lenticulaires poussant en masse. Pour le dénombrement de ces derniers, on prend en considération les remarques suivantes :

- ✓ Dénombrer seulement les boîtes contenant entre 15 et 300 colonies ;
- ✓ Les résultats sont exprimés en unités formatrices de colonies (UFC) par ml d'eau à analyser à 22 °C et 37 °C.

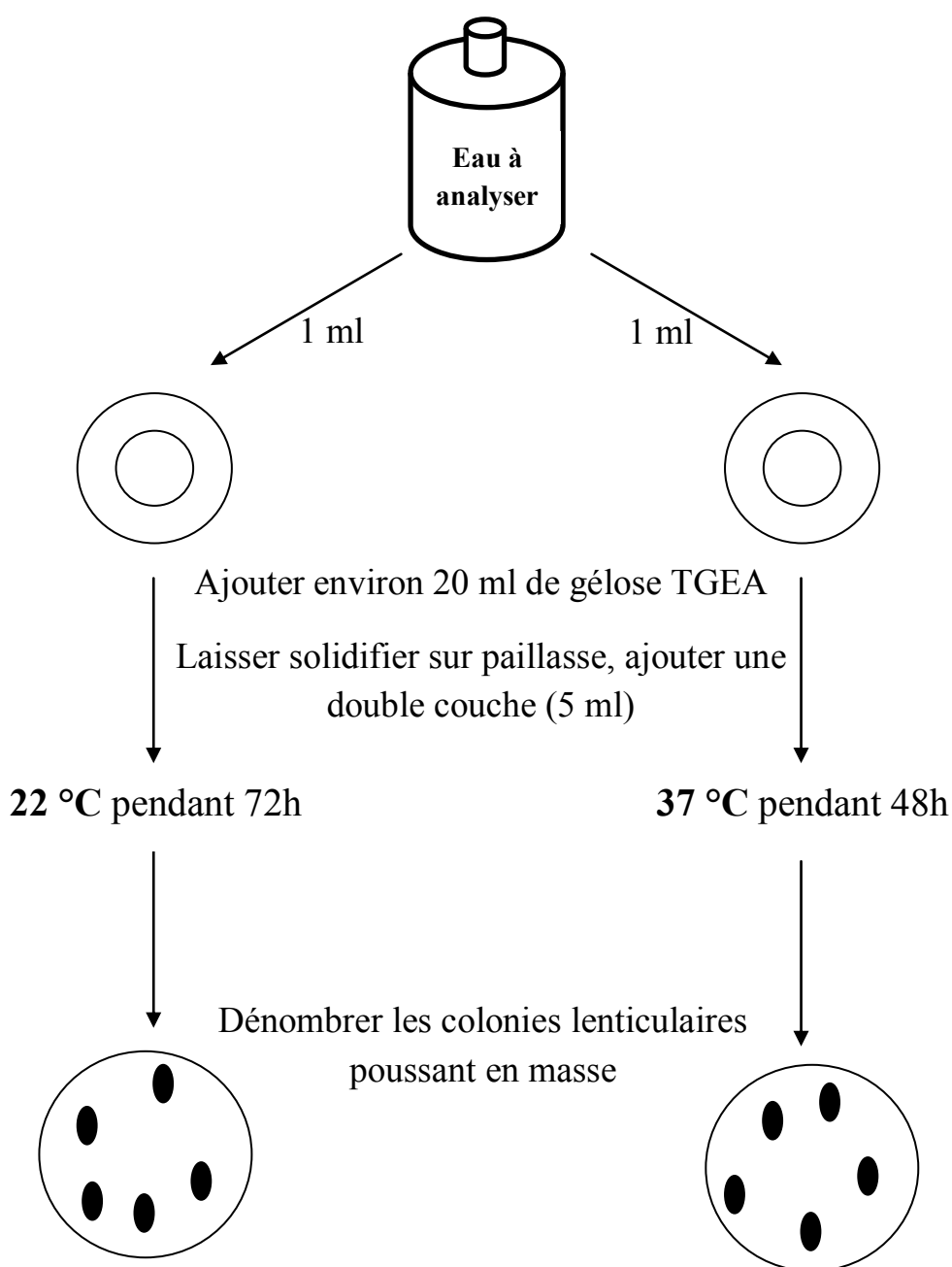


Figure 74 : Recherche et dénombrement des germes revivifiables.

2-2. Recherche et dénombrement des germes indicateurs de contamination fécale

2-2-1. Recherche et dénombrement des coliformes

Le terme de « coliformes » est regroupé un certain nombre d'espèces bactériennes appartenant à la famille des *Enterobacteriaceae* et qui partagent certaines caractéristiques biochimiques. Elles se présentent sous forme de Bacilles Gram négatifs, non sporogènes, oxydase négative, aéro-anaérobies facultatifs, capables de croître en présence de sels biliaries et capables de fermenter le lactose avec production d'acides et de gaz en 48 heures, à des températures de 35 à 37 °C. Les coliformes fécaux ou coliformes thermotolérants représente un sous-groupe des coliformes totaux capables de fermenter le lactose à une température de 44,5 °C. L'espèce la plus importante est *Escherichia coli* (*E. coli*) et à un degré moins certaines espèces des genres *Citrobacter*, *Enterobacter* et *Klebsiella* (Rodier, 2009 ; Elmund et al., 1999 ; Emmanuel, 2004). Pour la recherche et le dénombrement des coliformes, nous avons utilisé la méthode en milieu liquide sur BCPL par la technique du Nombre le Plus Probable (NPP). Elle se réalise en deux étapes (Fig. 75):

- Le test de présomption pour la recherche des coliformes totaux. A partir de la solution mère porter aseptiquement :
 - 50 ml dans un flacon contenant 50 ml de milieu BCPL D/C.
 - 5 fois 10 ml dans 5 tubes contenant 10 ml de milieu BCPL D/C.
 - 5 fois 1 ml dans 5 tubes contenant 10 ml de milieu BCPL S/C.
- Le flacon et les tubes sont munis de cloches de Durham pour repérer le dégagement éventuel du gaz dans le milieu. Chassez ce dernier présent éventuellement dans ces cloches et bien mélanger le milieu et l'inoculum. L'incubation se fait à 37 °C pendant 24 à 48 heures.
- Les tubes considérés comme positif montrent un dégagement gazeux et un aspect trouble avec virage du milieu au jaune. Ces deux caractères représentent le témoin de la présence des coliformes totaux.
- La lecture se fait selon la table du Mac Grady par la méthode (1.5.5) pour déterminer le nombre le plus probable (N.P.P) de coliformes totaux par 100 ml d'échantillon.
- Le test de confirmation (test de Mac Kenzie) est utilisé pour la recherche de coliformes thermotolérants et surtout la présence d'*Escherichia coli*. Les tubes trouvés positif précédemment sont repiqués (deux à trois gouttes) dans un tube contenant le milieu Schubert (milieu indole mannitol) muni d'une cloche de Durham. L'incubation se fait à une température de 44 °C ± 0,5 °C pendant 24 heures. Pour les tubes

présentant à la fois un trouble et un dégagement gazeux ajouter quelques gouttes de réactif Kowacks. La formation d'anneau rouge à la surface de tube indique que la réaction est positive et révèle la présence des coliformes fécaux (*E. coli*). La lecture finale se fait selon la table du Mac Grady par la méthode (1.5.5) pour déterminer le nombre le plus probable (N.P.P) de coliformes fécaux dans 100 ml d'échantillon (Lebres, 2005).

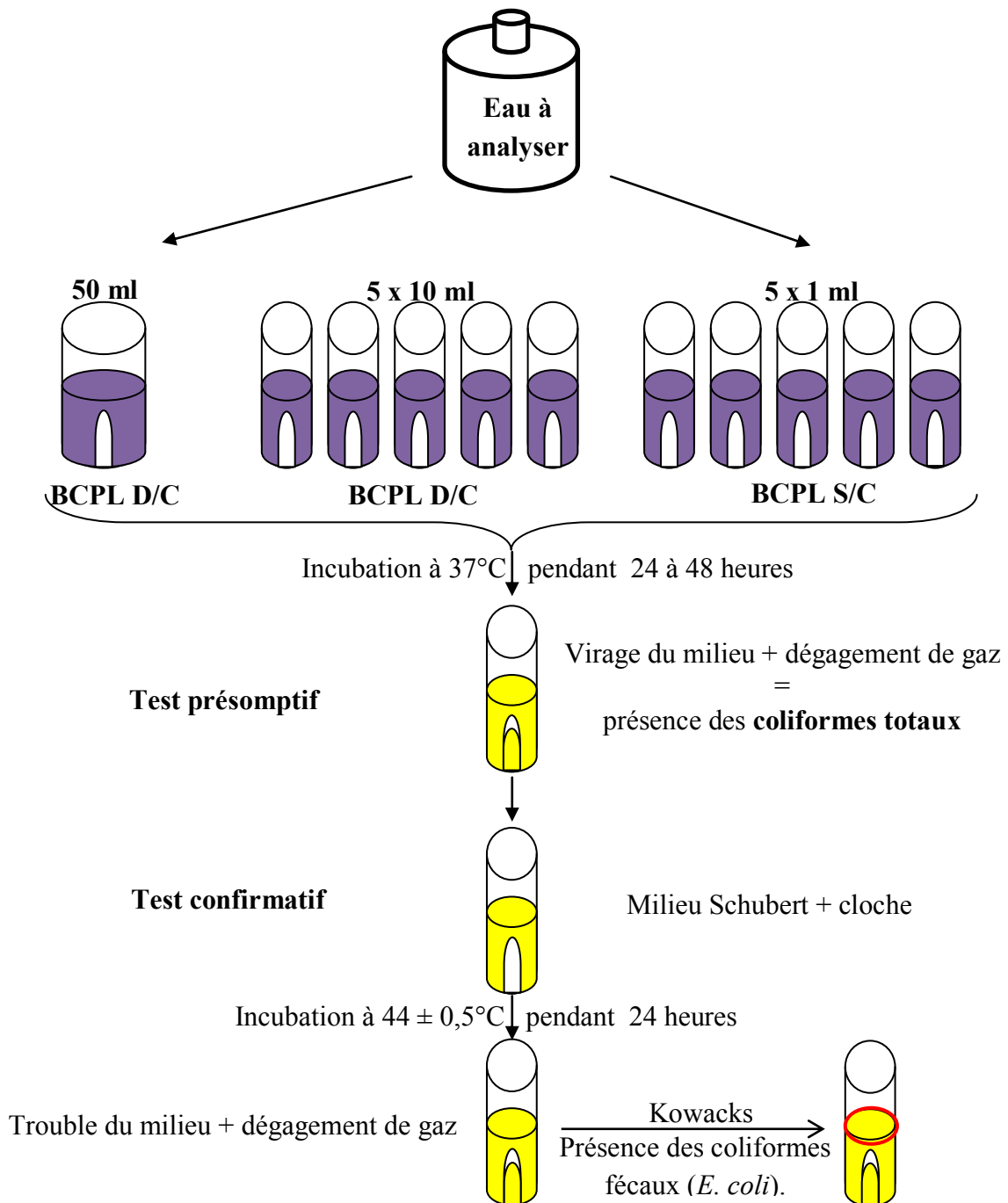


Figure 75 : Recherche et dénombrement des coliformes.

2-2-2. Recherche et dénombrement des Streptocoques fécaux

Sous la dénomination générale d'Entérocoques, les Streptocoques fécaux sont en grande partie d'origine humaine. Certaines bactéries de ce groupe proviennent des fèces des animaux tel que : *Streptococcus bovis*, *S. equinus*, *S. gallolyticus*, *S. alactolyticus*, ou se rencontrent même sur des végétaux. Ce sont des bactéries sphériques, en paires ou en chaînettes, à Gram positif, catalase négatif, anaérobies facultatives qui hydrolysent l'esculine en présence de bile (Clausen et al., 1977 ; Farrow et al., 1984 ; Bitton, 1999 ; CEAEQ, 2006). Cependant, elles sont considérées comme indicateurs d'une pollution fécale dont leur principal intérêt est la résistance à la dessiccation et persistent plus longtemps dans l'eau (Gleeson et Gray, 1997). La présence des Streptocoques fécaux est évaluée par dénombrement en milieu liquide à l'aide de deux bouillons de culture (milieu de Rothe et le milieu Eva Litsky) comme suit (Fig. 76):

- **Le test présomptif** : à partir de l'eau à analyser ensemercer :
 - 50 ml dans un flacon contenant 50 ml de milieu Rothe D/C.
 - 5 fois 10 ml dans 5 tubes contenant 10 ml de milieu Rothe D/C.
 - 5 fois 1 ml dans 5 tubes contenant 10 ml de milieu Rothe S/C.

- Après le mélange du milieu et l'inoculum, l'incubation se fait à 37 °C pendant 24 à 48 heures.

- Les tubes considérés comme positif montrent un trouble microbien, et ils font l'objet d'un test de confirmation sur le milieu Eva Litsky.

- **Le test confirmatif** : à partir des tubes de Rothe trouvés positifs, ensemercer 2 ou 3 gouttes dans un tube contenant le milieu LITSKY EVA. L'incubation se fait à 37°C pendant 24 heures. Les tubes positifs montrent un trouble microbien une pastille violette (blanchâtre) au fond desquels. La lecture se reporte à la table de Mac Grady par la méthode (1.5.5) pour déterminer le nombre le plus probable (N.P.P) de Streptocoques fécaux dans 100 ml d'échantillon.

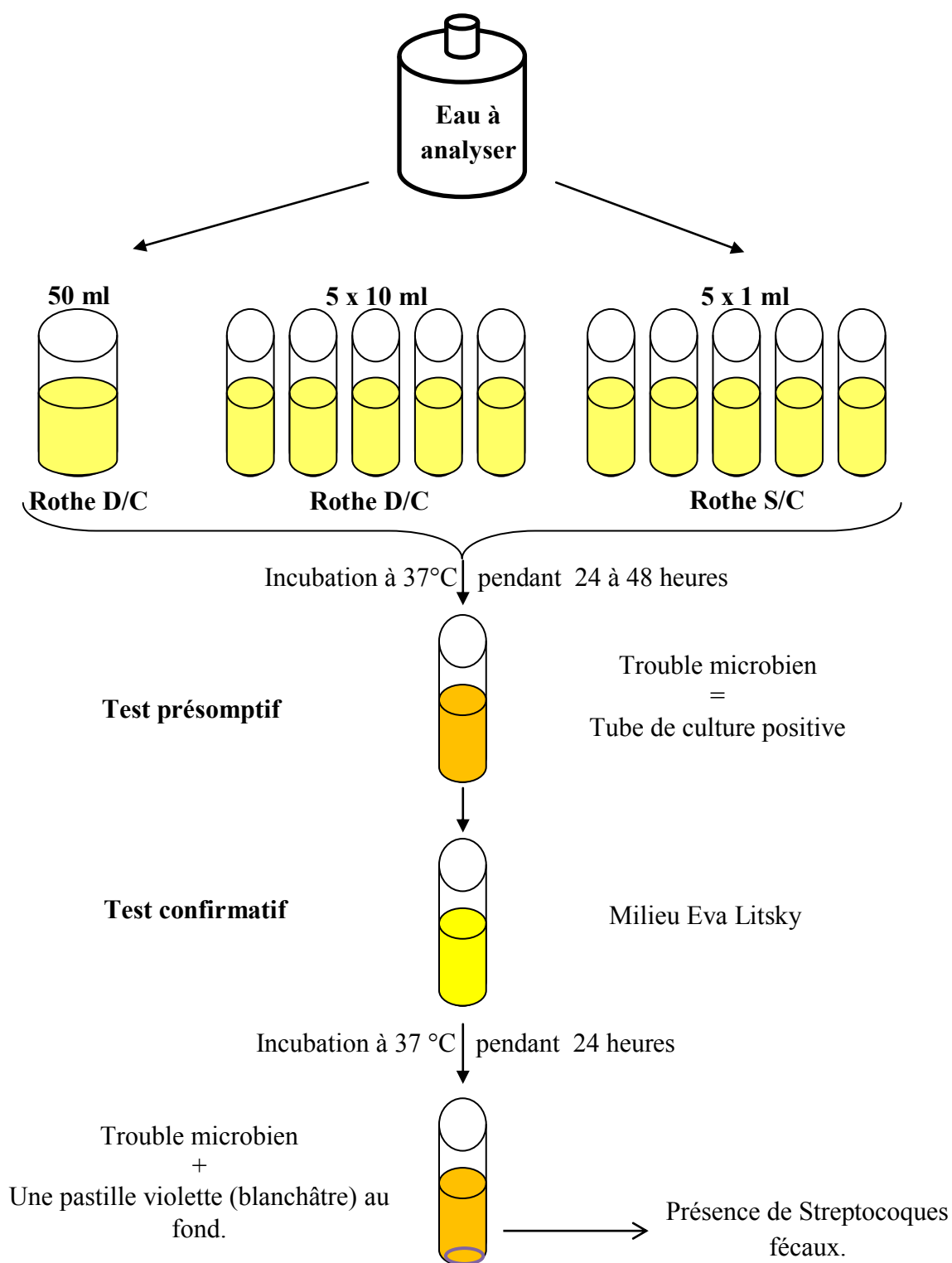


Figure 76 : Recherche et dénombrement des Streptocoque fécaux.

2-2-3. Recherche et dénombrement des spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices

Les bactéries anaérobies strictes à Gram + et sporulées ont la capacité de réduire les sulfites en sulfures d'hydrogène. Les spores résistent au stress environnemental et en particulier aux radiations solaires. Parmi ces spores sulfito-réductrices, on trouve *Clostridium perfringens*, une espèce le plus souvent associée aux fèces d'animaux à sang chaud (Henze et al., 2008). A partir de l'eau à analyser, introduire 25 ml dans un tube stérile et placer celui-ci dans un bain d'eau à 80°C pendant 10 minutes dont le but de détruire toutes les formes végétatives de ces bactéries éventuellement présentes, puis refroidir immédiatement le tube. Répartir ensuite le contenu de ce tube, dans 4 tubes stériles, à raison de 5 ml par tube. Ajouter à chaque tube 20 ml de gélose Viande Foie (VF) fondue, puis refroidir à $45 \pm 1^\circ\text{C}$, additionnée ensuite une quantité de 1 ml de la solution de sulfite de sodium et 4 gouttes de la solution d'alun de fer. Mélanger doucement en évitant les bulles d'air l'introduction d'oxygène (Fig. 77). Laisser solidifier sur paillasse pendant 30 minutes environ, puis incubé à 37°C, pendant 24 à 48 heures (Lebres, 2005). Le dénombrement se fait pour toute colonie noire entourée d'un halo noir exprimée en nombre de spore par 20 ml d'échantillon.

2-3. Recherche et isolement des germes pathogènes

Plusieurs milieux de culture sont employés : gélose nutritive (GN), gélose Mac Conkey, gélose Hektoen, gélose Salmenelles-Schigelles (SS), gélose Chapman, et gélose GNAB. Dans le but d'isolement des germes, l'ensemencement se fait par des stries sur des boîtes de pétri qui seront étiquetées et incubées à 37 °C pendant 24 - 48 heures. Les milieux de culture feront l'objet d'un repiquage de colonies suspectes ou désirées dans des nouvelles boîtes gélosées. Cette opération est répétée (au moins 3 fois) dans le but de vérifier la pureté des souches. Ces milieux seront ensemencés par des stries et incubés à 37 °C pendant 24 heures.

a- L'identification

a-1. Caractères morphologiques

L'analyse des caractères morphologiques des bactéries consiste à décrire les différents aspects des microorganismes par des observations macroscopiques (la forme de colonie, son contour, sa surface, sa couleur, son diamètre et élévation) et des observations microscopiques :

- **Examen microscopique à l'état frais** : une méthode rapide consiste à observer entre lame et lamelle une suspension bactérienne à l'objectif 40. Les renseignements obtenus par cette observation concernent principalement la mobilité, la morphologie,

le mode de groupement et la quantité approximative de bactéries (Denis et al., 2007; Delarras et al., 2003).

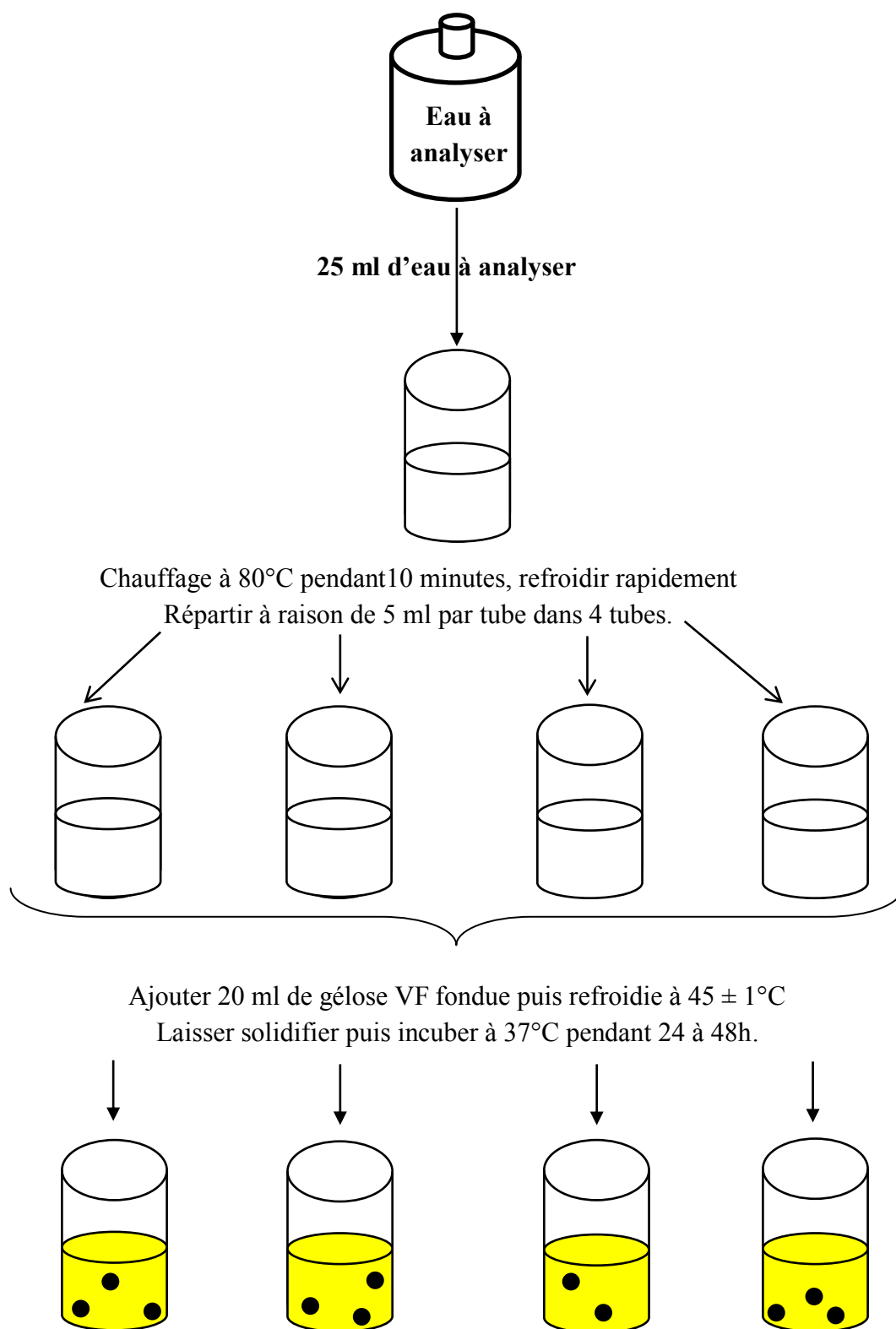


Figure 77 : Recherche et dénombrement des Spores d'Anaérobies Sulfito-réductrices.

➤ **Examen microscopique après coloration de Gram** : C'est la coloration de référence en bactériologie. Elle permet de mettre en évidence les propriétés de la paroi des bactéries, et d'utiliser ces propriétés pour les distinguer et les classer. Son avantage est de donner une information rapide sur les bactéries présentes dans un produit ou un milieu tant sur le type que sur la forme. L'observation microscopique permet de distinguer les bactéries à Gram positif qui sont colorées en violet, de celles à Gram négatif colorées en rouge (Mostakim, 2012). Elle se déroule en plusieurs étapes successives:

- Préparation d'un frottis bactérien.
- Recouvrir le frottis par la solution de cristal violet, laisser agir 1 min et laver à l'eau.
- Mordançage : recouvrir la préparation de Lugol et laisser agir pendant 1 min et laver à l'eau.
- Décoloration avec l'alcool à 95° pendant 30 secondes et laver à l'eau.
- Recoloration avec la solution de Fuschine pendant 30 à 40 secondes, laver à l'eau et sécher (Delarras et al., 2003).

a-2. Identification biochimique

Actuellement les tests biochimiques d'identification sont effectués plus souvent sur des automates. Les systèmes « bioMérieux » utilisent des cartes plastiques renfermant des micro-cupules, chaque cupule contenant un substrat spécifique déshydraté. Nous avons procédé à l'identification par la galerie API 20 E, qui permet de différencier les espèces de la famille des *enterobacteriaceae*, la galerie API 20 NE pour les espèces qui n'appartiennent pas à la famille des *enterobacteriaceae* et la galerie API Staph pour les espèces appartenant à la famille des Staphylocoques. Son principe consiste à incuber dans les micro-cupules à l'aide d'une pipette pasteur, une suspension bactérienne homogène. L'incubation se fait à 37 °C pendant 24h et se traduit par les virages colorés spontanés ou révélés par l'addition de réactifs. L'identification se fait selon le profil numérique à l'aide du catalogue analytique de chaque système API.

a-3. Identification moléculaire

Elle a été réalisée au niveau du laboratoire de biotechnologie microbienne de l'Université SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH à Fès, Maroc.

a-3-1. Extraction de l'ADN génomique

La méthode d'extraction de l'ADN des bactéries utilisée dans cette étude est la lyse directe par un procédé mécanique (Choc thermique), puis l'ADN extrait sert de matrice pour l'amplification in vitro d'un fragment de 1500 pb (paires de bases) du gène de l'ARNr 16S de ces bactéries.

Protocole:

A partir d'une culture fraîche (24 heures) sur le milieu solide LB (Luria-Bertani), un inoculum est transféré au bout de l'anse dans un volume de 50 µl d'eau distillée dans un tube eppendorf de 1,5 ml. Le tube est ensuite congelé à - 20 °C pendant 30 minutes, puis chauffé à 94 °C pendant 3 minutes. Ce choc thermique est réalisé une deuxième fois à - 20 °C pendant 30 minutes, puis le tube est chauffé à 94 °C pendant 3 minutes. Après centrifugation à 7 000 rpm pendant 10 minutes, 2 µL du surnageant (contenant de l'ADN) est utilisé pour la réalisation de la réaction d'amplification (PCR).

a-3-2. PCR (Polymerase Chain Reaction)

La PCR permet l'amplification spécifique d'un fragment de l'ADN cible en présence d'oligonucléotides. Le principe de la PCR consiste en la répétition d'un cycle tri-phasique : dénaturation de l'ADN à amplifier, hybridation de deux amorces de part et d'autre de la séquence cible et enfin, élongation des amorces par l'activité d'une ADN polymérase en présence de dNTP (Désoxynucléoside Triphosphate). La Taq ADN polymérase possède une activité terminal- transférase qui a pour effet l'ajout d'une désoxyadénosine aux extrémités 3' des fragments amplifiés. Cette particularité permet facilement le clonage de ces fragments dans des vecteurs commerciaux.

a-3-2-1. Conditions de PCR

La réaction d'amplification par PCR est réalisée dans un appareil (Thermocycleur), permettant de programmer les durées et les températures des trois étapes d'un cycle ainsi que le nombre de cycles désirés.



Figure 78 : Le Thermocycleur.

➤ **Amorces utilisées**

Pour l'amplification spécifique de la petite sous-unité ribosomique 16S, un jeu d'amorces universelles pour les bactéries a été choisi (Weisberg et al., 1991), Fd1: 5' AGAGTTTGATCCTGGCTCAG 3' et RS16: 5' TACGGCTACCTTGTTACGACTT 3'. Le terme d'amorce universel signifie qu'il peut être utilisé pour différents types de bactéries. La séquence de ces amorces n'est ainsi pas spécifique à un organisme donné. Les réactions d'amplification du gène cible sont réalisées selon le protocole décrit ci-dessous.

➤ **Mélange réactionnel**

Dans un tube eppendorf adapté au thermocycleur (0,5 ml), le mélange réactionnel est réalisé tel que présenté dans le tableau suivant :

Tableau 32 : Mélange réactionnel pour la PCR.

Réactifs	Volume (µl)	Concentration finale
Tampon Taq (5X)	4	1 X
MgCl ₂ (25 mM)	1,2	1,5 mM
dNTPs (1 mM)	4	0,2 mM
fD1 (10 µM)	2	1 µM
Rs16 (10 µM)	2	1 µM
Taq polymérase (5 U/µl)	0,2	0,05 U/µl
H ₂ O pure	4,6	-
ADN	2	-
Volume final	20	-

Pour contrôler les réactions PCR, on a utilisé deux témoins : un témoin négatif (T-) où l'ADN du mélange réactionnel est remplacé par l'eau et un témoin positif (T+) qui correspond à un fragment d'ADN déjà amplifié et les amorces nécessaires à sa réamplification.

➤ **Amplification**

Après avoir placé les tubes dans le thermocycleur, une prédénaturation des bactéries est réalisée à 94 °C pendant 5 minutes. Ensuite, le programme d'amplification est exécuté selon trois étapes durant 35 cycles :

- Une première étape de dénaturation de l'ADN à 94 °C pendant 30 secondes ;
- Hybridation à 55 °C pendant 30 secondes ;
- Elongation à 72 °C pendant 1 min 30 secondes ;

Et une étape d'élongation finale de 10 min à 72 °C qui achève l'amplification par PCR.

a-3-3. Electrophorèse sur gel d'agarose

Les produits amplifiés sont ensuite analysés par électrophorèse sur gel d'agarose à 1 %.

a-3-3-1. Préparation du gel

Une solution d'agarose à 1 % est préparée dans le tampon de migration TAE (Tris, Acétate, EDTA) (1 X), chauffée jusqu'à dissolution complète puis refroidie à 60 °C, une température adéquate pour ajouter directement un colorant fluorescent appelé Bromure d'Ethidium (BET) (0,5 µg / ml) à la solution d'agarose avant de la couler dans la cuve d'électrophorèse. Le gel est coulé dans une moule muni d'un peigne à 16 cupules. Après polymérisation, le gel est placé dans une cuve d'électrophorèse et immergé dans une solution de TAE (1 X).

a-3-3-2. Dépôt des produits d'amplification

Afin de suivre la migration du produit d'amplification dans le gel d'agarose, 4 µl de ce produit est mélangé à 2 µl d'une solution de migration avant de le déposer dans les puits du gel. Cette solution contient essentiellement :

- Un marqueur de mobilité : 2.5 mg de bleu de bromophénol qui permet de suivre la migration.
- Un alourdisseur : 300 µL de glycérol pour entraîner l'ADN au fond des puits.
- 700 µL de l'eau distillée stérile.

a-3-3-3. Migration

La migration est réalisée au moyen d'un générateur de courant sous un voltage de 70 Volts pendant 5 minutes pour permettre la sortie de l'ADN du puits, ensuite à 50 Volts durant le reste de l'électrophorèse. Celle-ci est arrêtée lorsque le témoin de migration (bleu de bromophénol) atteint les trois-quarts de la longueur du gel.



Figure 79 : Le générateur de courant qui assure la migration.

a-3-3-4. Visualisation

La visualisation de l'ADN sur le gel d'agarose est réalisée grâce à la fluorescence du Bromure d'Ethidium (BET). Ce composé possède la propriété de s'intercaler entre les paires de base des acides nucléiques. Le gel est visualisé à l'aide d'un Trans-illuminateur à UV puis photographié.

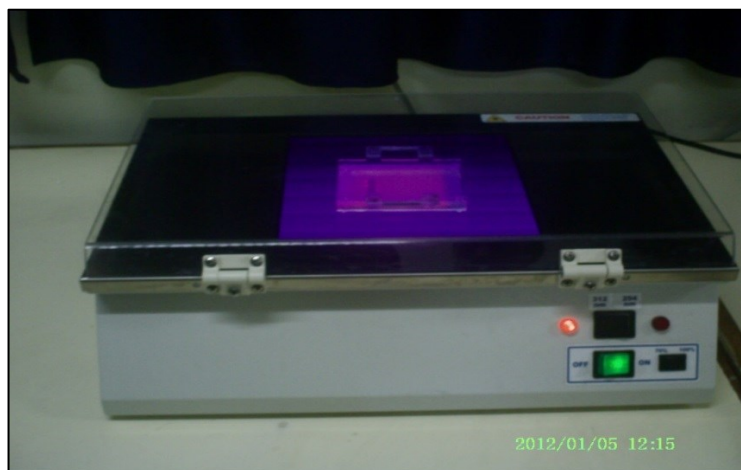


Figure 80 : Le Trans-illuminateur à UV.

a-3-4. Séquençage des ADN amplifiés

Il est été réalisé au niveau du Centre Universitaire Régional d'Interface (C.U.R.I), Fès, Maroc. La réalisation de la PCR permet alors de réaliser un pool pour ainsi effectuer le séquençage des ADN amplifiés, et de ce fait, identifier les souches sélectionnées. Le séquenceur « Applied Biosystems 3130 » est alors utilisé selon les instructions du fabricant.



Figure 81 : Le séquenceur « Applied Biosystems 3130 ».

a-3-4-1. Purification des produits de PCR

Dans un tube de 0,5 ml on met: 10 μ l produit de PCR additionnés 90 μ l (MagneSil Yellow) après avoir agité vigoureusement, le mélange est mélangé par pipetage 4 fois et incubé à la température ambiante pendant 45 seconds. Puis, on mélange par pipetage 4 fois, et on place les tubes dans le portoir magnétique et on les laisse pendant 10 seconds. Le surnageant est éliminé sans toucher les billes.

a-3-4-2. Lavage

Les tubes sont replacés dans un portoir normal et additionnés de 200 μ l de la solution de lavage (Wash solution). Ils sont ensuite mélangés par pipetage (4 fois) et incubés à une température ambiante pendant 60 secondes. Ensuite, ils sont mélangés quatre fois par pipetage. Les tubes sont placés dans le portoir magnétique pendant 10 secondes. Le surnageant est éliminé sans toucher les billes. Ces dernières sont lavées avec 100 μ l de l'éthanol à 80 % en répétant tous les étapes précédentes.

Un deuxième lavage par l'éthanol (80 %) est effectué de la même manière. Les tubes sont séchés à une température ambiante pendant 10 min.

a-3-4-3. Elution de l'ADN

Les tubes sont replacés dans un portoir normal et sont additionnés de 100 µl de la solution de lavage (Eau ultra-pure), puis on mélange par pipetage (4 fois). L'incubation se fait à une température ambiante pendant 60 secondes, ensuite on mélange par pipetage (4 fois). Après, Les tubes sont placés dans le portoir magnétique pendant 10 secondes.

a-3-4-4. Réaction de séquençage

Le séquençage est accompli sur les produits de PCR préalablement purifiés. Il est réalisé selon la technique automatisée de Sanger. Cette méthode consiste à faire une amplification spécifique (PCR) dans laquelle on utilise des didésoxynucléosides triphosphates (ddNTPs) généralement marqués par des fluorochromes. Ces dérivés ne possèdent pas d'OH en position 3' du désoxyribose. L'incorporation de ce didésoxyribonucléotide par l'ADN polymérase bloque l'élongation de la molécule d'ADN en cours de copie. On a donc toute une famille de fragments d'ADN synthétisés avec des longueurs différentes selon qu'un désoxynucléoside monophosphate (dNMP) ou un didésoxynucléoside monophosphate (ddNMP) a été, au hasard, incorporé. Mais dans tous les cas, toutes les molécules se terminent obligatoirement par un ddNMP. Ces fragments nucléiques sont séparés par électrophorèse selon leur longueur, les plus petits migrent le plus vite. Le pouvoir discriminant du gel de polyacrylamide est tel qu'il permet de différencier des brins d'ADN ne différant en longueur que par un seul nucléotide. La séquence de l'ADN amplifié est alors lue par un balayage automatique qui permet de distinguer grâce à différents fluorochromes les quatre bases A, T, C ou G. L'utilisation de logiciels informatiques permet de fournir un tracé électrophorétique avec des couleurs différentes pour chaque base élémentaire. L'identification est réalisée par comparaison de cette séquence avec les bases de données des séquences connues.

Protocole :

Dans un tube de 0.2 ml on met:

- 10 µl du produit de PCR purifié (200-300 ng).
- 1 µl du Kit de séquençage.
- 3.2 pmol d'une des amorces, soit 0.3 µl d'une solution à 10 µM.

Puis, nous complétons à 20 µl avec l'eau ultra-pure, et on place les tubes dans un thermocycleur selon le programme suivant:

- 96 °C pendant 1 min.
- 25 cycles: 96 °C pendant 10 secondes, 50 °C pendant 5 secondes et 60 °C pendant 4 minutes.
- 72 °C pendant 7 minutes.

Enfin, on conserve le produit à l'obscurité à une température de + 4 °C.

Purification des produits de séquence :

Le (MagneSil Green) est agité vigoureusement. Puis, dans un tube de 0,5ml on met: 10 µl produit de la réaction de séquençage et on ajoute 90 µl (MagneSil Green). L'incubation se fait à une température ambiante en mélangeant par pipetage pendant 2.5 minutes à 5 minutes. Ensuite, les tubes sont placés dans le portoir magnétique pour éliminer le surnageant. Après, ils sont transférés dans un portoir normal et additionnés de 100 µl de l'éthanol à 90 % en répétant toutes les étapes précédentes. Un autre lavage par l'éthanol 90 % est effectué de la même manière. Enfin, les tubes sont séchés à une température ambiante pendant 10 minutes. Après 2 minutes d'incubation à une température ambiante, l'ADN est élué avec 25 µl de Formamide Hi-Di et récupéré dans un nouveau tube à fin d'être séquençé.

a-3-5. Analyse informatique des séquences

L'étude des séquences ainsi obtenues est alors permise grâce un logiciel spécifique Sequence Scanner v 1.0, d'Applied Biosystems. Une comparaison de ces séquences est donc réalisée afin de caractériser chaque souche grâce à l'interface de recherche NCBI. La comparaison est réalisée grâce à un Blast N, c'est-à-dire une comparaison de séquences nucléotidiques entre elles afin de rechercher l'homologie. Notre séquence requête sera alors comparée à toutes les séquences nucléotidiques appartenant à la banque de données. La ressemblance est déterminée grâce aux insertions, délétion et identité/substitution. Le résultat obtenu est présenté sous forme d'un classement de hits, c'est-à-dire, une paire de séquences ayant une homologie. Le classement s'effectue selon un score qui représente le degré de similarité. Ainsi, plus le score augmente, meilleur est l'alignement des deux séquences. La valeur de la e-value intervient également dans l'analyse des résultats. En effet, cette valeur représente la probabilité d'obtenir, par hasard, un alignement de score supérieur à celui

obtenu. Elle décrit donc le bruit aléatoire qui existe lors de l'alignement de deux séquences. La significativité de la similarité augmente alors quand la valeur E se rapproche de zéro.

3- Analyse des résultats

3-1. Dénombrement des germes totaux

Les résultats du tableau 31 montrent que la concentration moyenne de la flore mésophile aérobie totale pour tous les sites confondus est de l'ordre de 46,76 et 67,88 UFC/ml respectivement pour la FT 22 °C et la FT 37 °C. L'écart –type est de l'ordre de 92,66 et 132,26 UFC/ml, reflète la variation de la charge bactérienne, qui oscille de 1 UFC/ml à 456 UFC/ml et de 1 UFC/ml à 740 UFC/ml respectivement pour la FT 22 °C et la FT 37 °C. Les variations spatiales des nombres de bactéries dans les différentes stations sont représentées dans les figures 82 et 83.

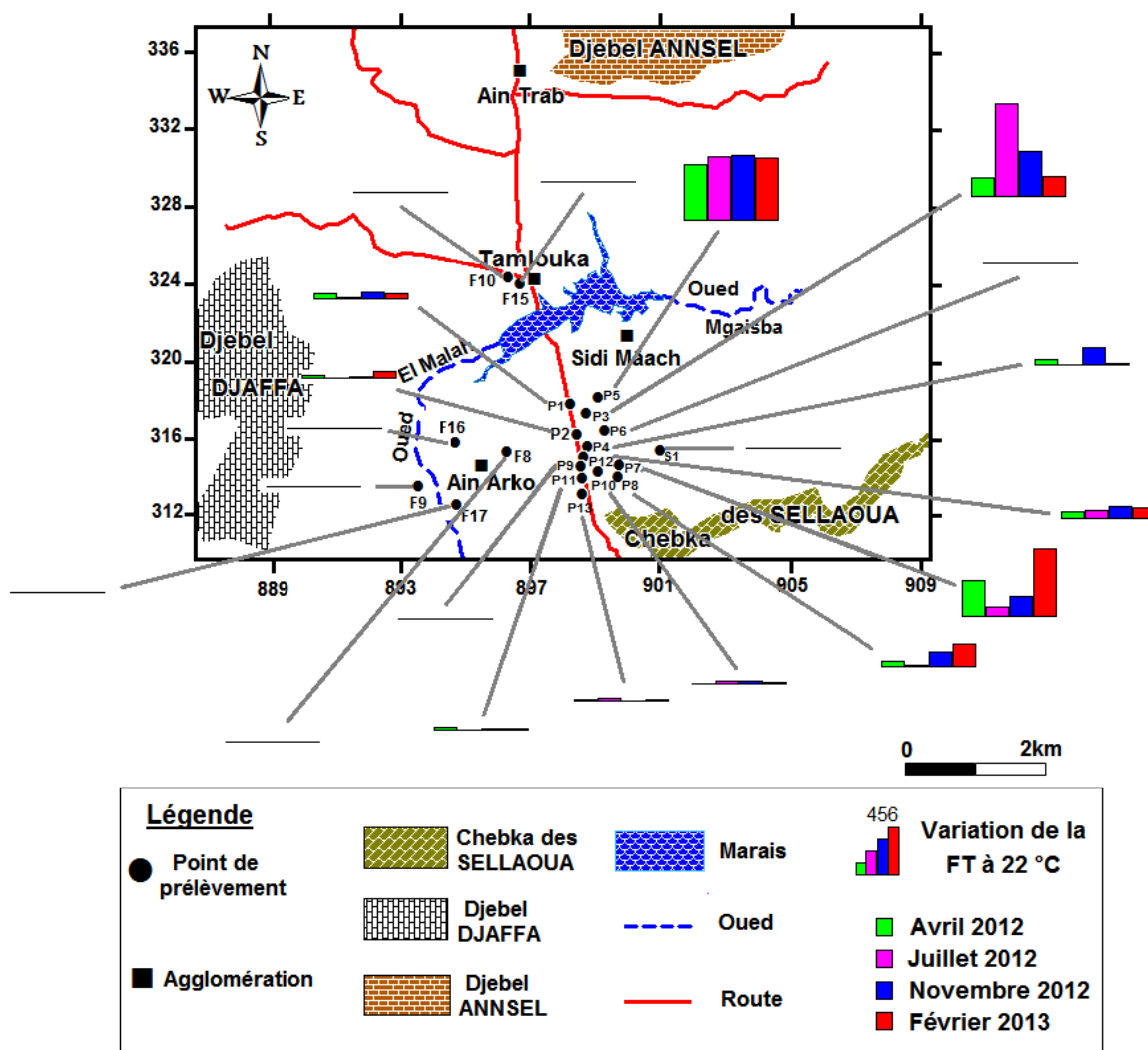


Figure 82 : Variation spatiale de la flore totale à 22 °C.

Les concentrations les plus élevées sont enregistrées dans la partie Sud-Est de la plaine, notamment au niveau des puits P3, P5 et P7 formant ainsi des stations distinctes des autres les moins chargées en bactéries. Nous constatons que la flore totale subit de légères fluctuations au cours de la période d'étude, où les concentrations les plus élevées sont notées au mois de Juillet avec un maximum repéré au niveau du puits P3. Pour la plupart des points étudiés, la densité de la flore totale énumérée à 22 °C et à 37 °C n'est pas assez importante, ceci peut être expliqué qu'une grande partie de ces bactéries, dans les environnements naturels, ne se développent pas sur les milieux de culture et à des températures habituellement utilisées pour l'isolement au laboratoire, ou peut également être due à la présence de prédateurs bactériens tels que les protozoaires, comme elle peut être liée aux rejets de produits toxiques d'origine industrielle (Goni-Urriza et al., 1999 ; Servais et al., 1985 ; Aboukacem et al., 2007).

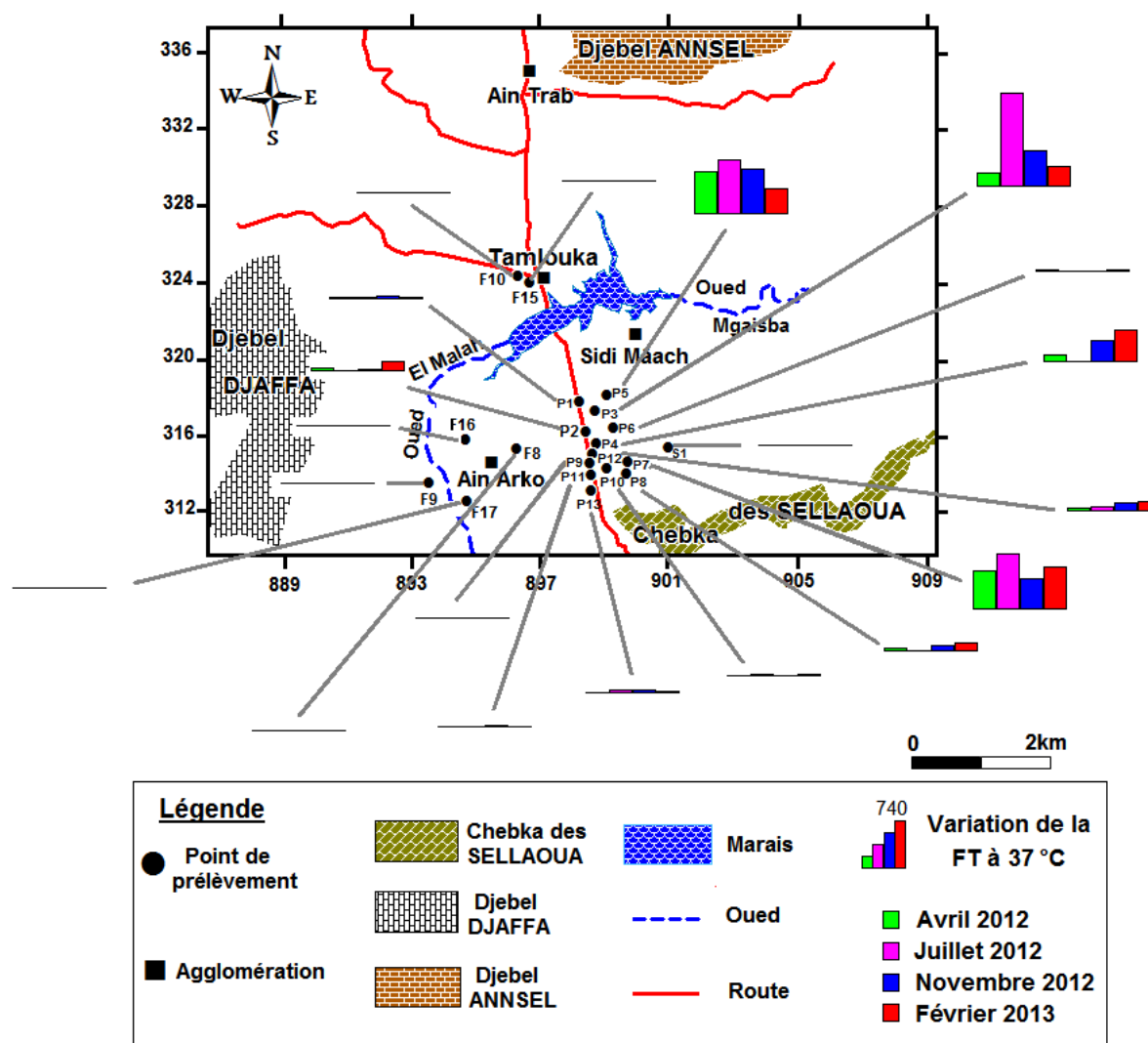


Figure 83 : Variation spatiale de la flore totale à 37 °C.

3-2. Dénombrement des Coliformes totaux

Les coliformes constituent avec les Streptocoques fécaux le groupe de bactéries le plus fréquemment utilisé pour l'examen bactériologique de l'eau. Ils sont recherchés dans l'eau comme témoins de contamination fécale (Poole et Hoberson, 1979 ; Gaujous, 1995). Les résultats obtenus varient de 1 à 240 CT/100 ml avec une moyenne de 74,97 CT/100 ml. Parmi 80 échantillons analysés, 65 % desquels dépassent les normes de potabilité (10 CT/100 ml) exigées par l'O.M.S (2004).

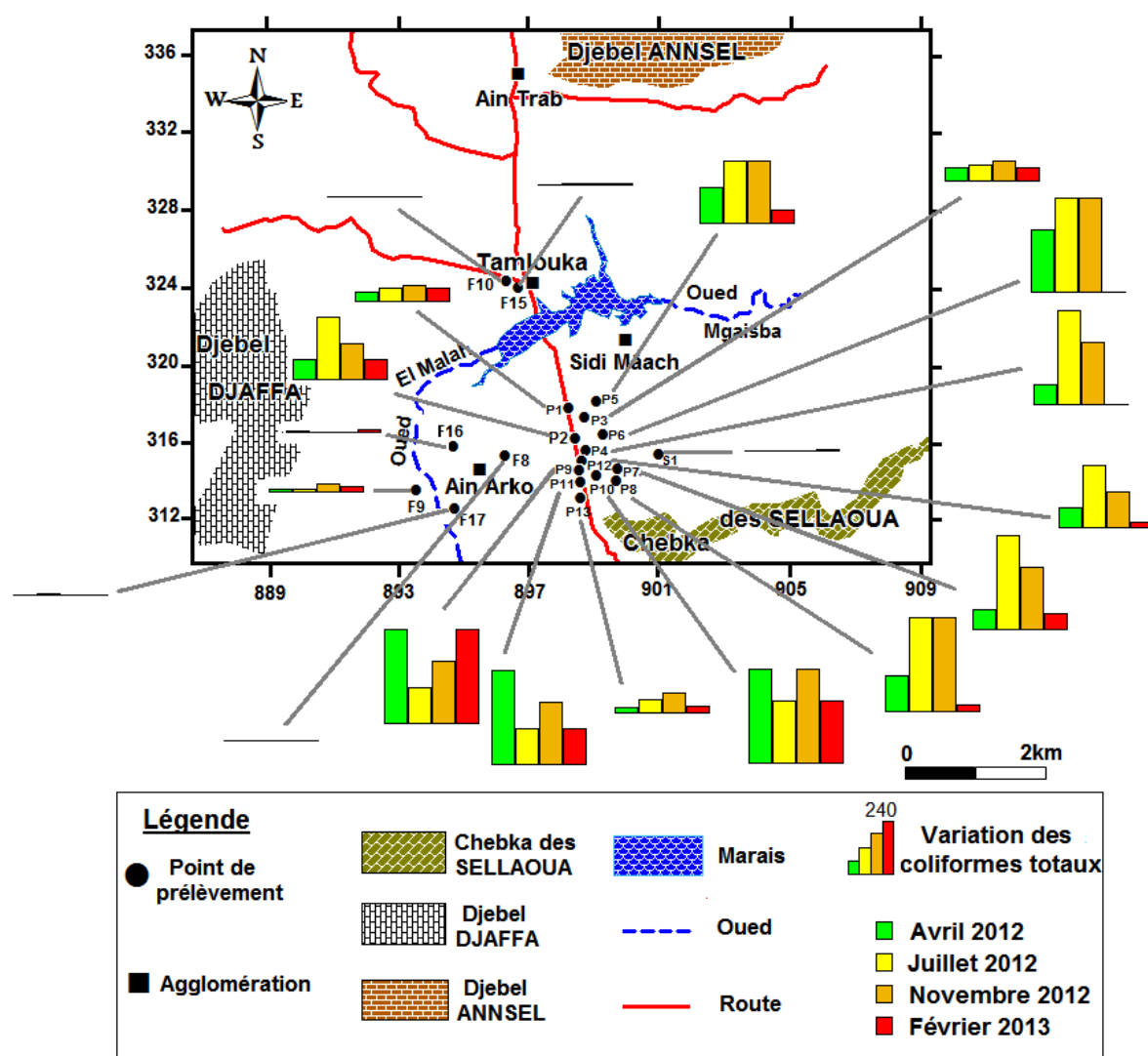


Figure 84 : Variation spatiale des Coliformes totaux.

D'après la figure 84, la variation temporelle des CT montre des concentrations élevées en été et en automne avec un maximum de 240 CT/100 ml. L'évolution spatiale a révélé des concentrations presque rapprochées entre les puits constituant les points les plus pollués, au contraire des forages et sources où les concentrations sont minimales et dans les normes.

En effet la forte concentration en coliformes totaux au niveau des puits peut être attribuée à l'influence des rejets domestiques et la mauvaise protection de l'entourage. L'intensité de la pollution des eaux souterraines dépend du type du sol et de la dose en polluants (White et al., 1986). Pour les forages, les faibles concentrations enregistrées peuvent être liées à la faible perméabilité du remplissage du Mio-Plio- Quaternaire. Le nombre des germes dans l'eau diminue avec la profondeur (Bojomolov, 1975).

3-3. Dénombrement des Coliformes fécaux

Les résultats obtenus montrent que le nombre de coliformes fécaux dans 86,25 % des eaux analysées dépasse la norme de (0 CF/100 ml) l'OMS (2004). L'écart -type est de l'ordre 28 CF/100 ml, reflète la variation de la charge bactérienne en coliformes fécaux, qui fluctue entre 1 et 160 CF/100 ml avec une moyenne de l'ordre de 16,77 CF/100 ml.

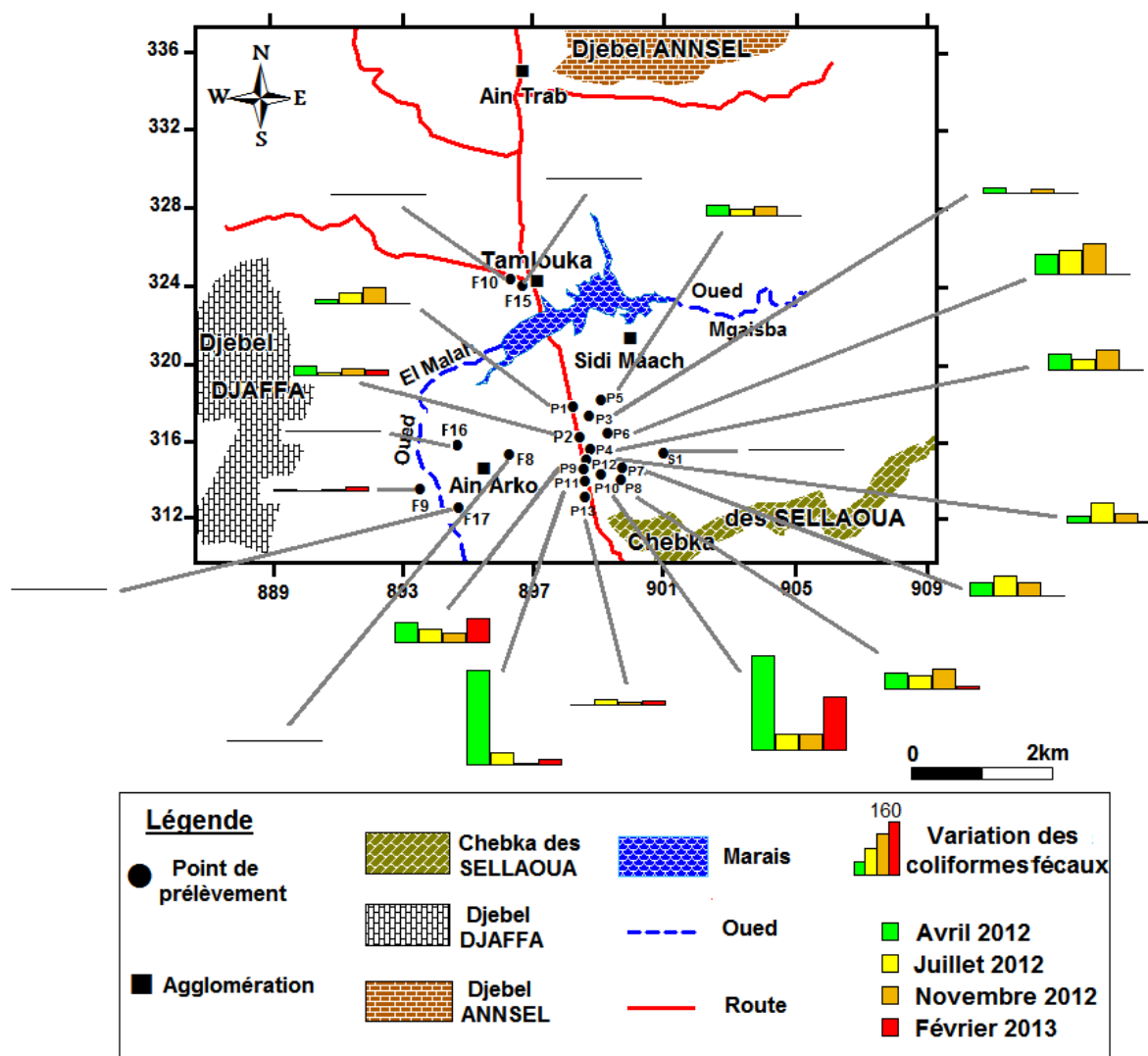


Figure 85 : Variation spatiale des Coliformes fécaux.

Les densités de ces bactéries subissent d'amples fluctuations spatio-temporelles (Fig. 85) entre les puits et les forages au niveau des eaux de la plaine de Tamlouka. En effet, les fortes concentrations (160 CF/100 ml) sont enregistrées au Sud de la plaine au niveau des puits P10 et P11 au mois d'Avril. Ces fortes concentrations en coliformes fécaux sont dues au fait que pendant la période printanière après la chute de pluie en Hiver, l'augmentation du niveau piézométrique accélère la propagation des polluants microbiologiques qui se trouvent sur le sol ou piégés dans la zone insaturée. Par contre, la présence des coliformes d'origine fécale dans les eaux de puits de notre région indique une pollution ou une contamination fécale dépendant de l'absence d'un réseau d'assainissement autour des puits ainsi que la présence de quantité importante de rejets d'élevages ; non valoriser dans les opérations de fertilisations

3-4. Dénombrement des Streptocoques fécaux

Les streptocoques fécaux sont considérés comme des indicateurs spécifiques de contamination fécale. Ils se multiplient rarement dans l'environnement et résistent mieux aux conditions défavorables que les coliformes (Gantzer et al., 1998). L'écart type (14,13 SF/100 ml) nous montre que les concentrations de ces bactéries fécales sont variables, allant de 1 SF/100 ml à 54 SF/100 ml avec une moyenne de l'ordre de 14,07 SF/100 ml. Plus de trois quart (77,5 %) des échantillons analysés montrent des valeurs supérieures aux normes de potabilité (0 SF/100 ml). L'examen de la figure 86 montre une légère fluctuation de la charge bactérienne entre les saisons avec un maximum de 54 SF/100 ml enregistré au mois de Février au niveau des puits P5 et P7. En effet, toute la zone d'étude semble être contaminée à l'exception de la ville de Tamlouka. Cette contamination pourrait être due à la mauvaise protection des puits (puits à ciel ouvert) qui est très répandue dans cette région ; aussi par des pollutions avoisinantes : lessivage des terres agricoles chargées d'énormes quantités de fumier, l'existence des fosses septiques et l'élevage de bétails.

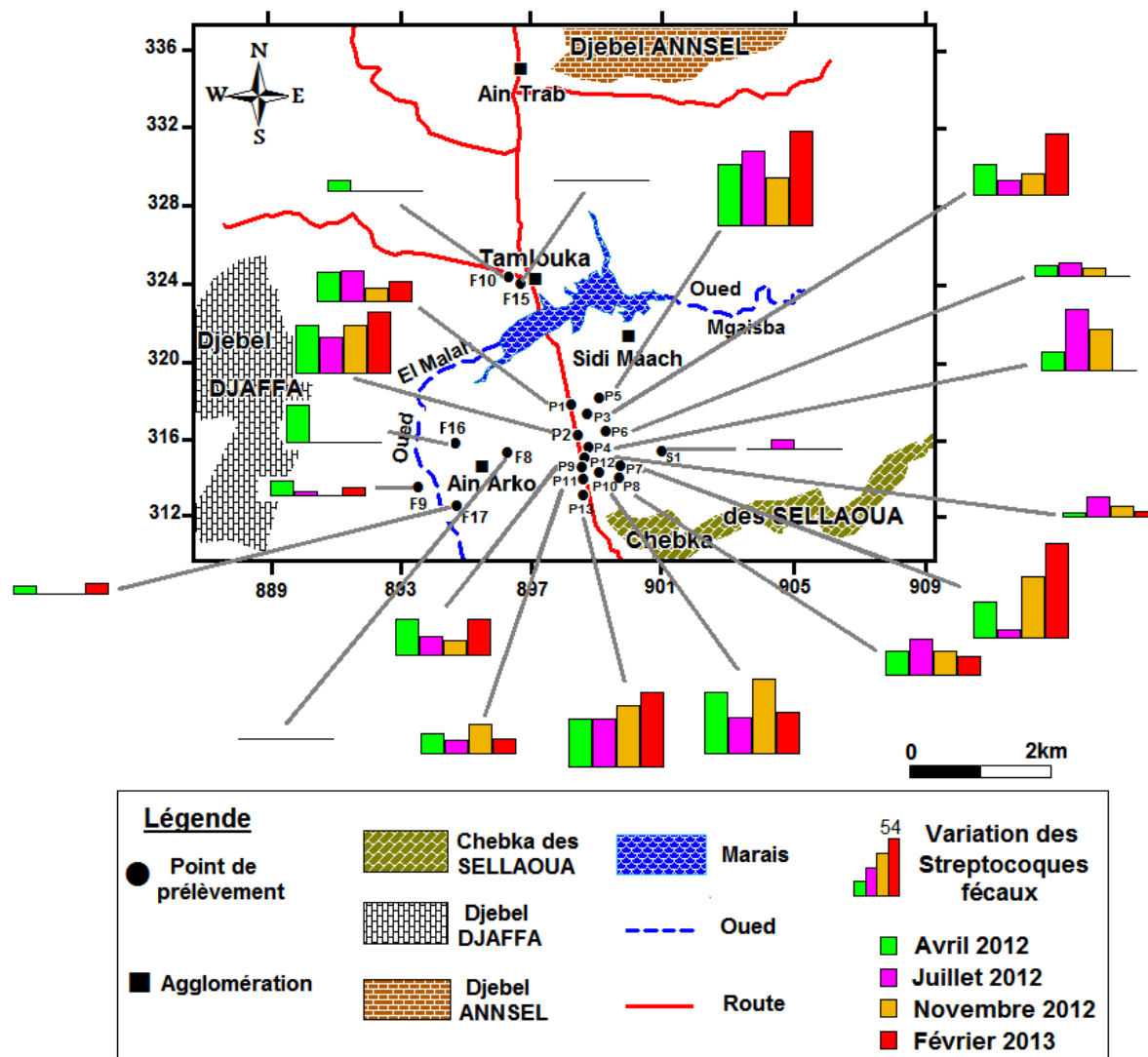


Figure 86 : Variation spatiale des Streptocoques fécaux.

3-5. Le rapport coliformes fécaux/ streptocoques fécaux (CF/SF)

Le rapport CF/SF a été utilisé en 1969 par Geldreich et Kenner où un ratio supérieur à 4 ($CF/SF > 4$) indique une origine humaine, tandis qu'une valeur plus petite que 0,7 ($CF/SF < 0,7$) montre une origine animale de la pollution (Tableau 33).

Tableau 33 : Origine de la pollution fécale selon le rapport CF/SF (Borrego et Romero, 1982).

Rapport CF/SF	Source de Contamination
$R < 0.7$	Principalement ou entièrement d'origine animale
$0.7 < R < 1$	Mixte à prédominance animale
$1 < R < 2$	Origine incertaine
$2 < R < 4$	Mixte à prédominance humaine
$R > 4$	Source exclusivement humaine

L'analyse du tableau 34 montre que 40 % des échantillons analysés ont un rapport CF/SF inférieur à 0,7. Ceci explique bien que l'origine de la contamination des eaux de la plaine de Tamlouka est strictement animale. D'autre part, 3,75 % des échantillons montrent une contamination mixte à prédominance animale, 36,25 % une origine incertaine, 11,25 % une origine mixte à prédominance humaine et 8,75 % desquels montrent une source de contamination purement humaine.

Tableau 34 : Détermination du rapport coliformes fécaux/streptocoques fécaux.

Campagnes	Avril 2012	Juillet 2012	Novembre 2012	Février 2013
Sites				
F8	0	/	/	/
F9	0,55	1	/	1,6
F10	0,14	1	/	/
F15	1	/	/	/
F16	0,04	/	/	/
F17	0,2	0	/	0,14
P1	0,52	1,16	3,5	0,25
P2	0,6	0,28	0,5	0,28
P3	0,61	0,11	0,61	0,08
P4	2,54	0,6	1,45	/
P5	0,6	0,32	0,6	0,01
P6	5	5,37	10,8	/
P7	1,14	7	0,68	0,05
P8	2	1,14	2,5	0,63
P9	1,66	2,18	2	2,04
P10	4,57	1,33	0,65	3,83
P11	13,33	2,75	0,29	1,22
P12	4,33	2,91	2,57	1,25
P13	0,10	0,35	0,2	0,18
S1	/	0,16	/	/

3-6. Dénombrement des bactéries anaérobies sulfito-réductrices

Les spores des ASR constituent généralement des indices de contamination ancienne. Les résultats obtenus montrent que 23,75 % des échantillons analysés ont des valeurs supérieures aux normes de potabilité (0 ASR/20 ml). Les concentrations varient de 1 à 32 ASR/20 ml avec une moyenne de 2,3 ASR/20 ml. La figure 87 révèle des fluctuations irrégulières entre les saisons avec un maximum noté au mois de Novembre au niveau du puits P8.

La recherche des ASR a révélé que la région de Sidi Mâach est considérée comme la zone polluée. Cette pollution dans une eau naturelle nous fait penser à une contamination fécale et, en l'absence de bactéries Coliformes, à une contamination déjà ancienne. Par contre, leur absence dans les autres endroits de la plaine peut constituer un signe d'efficacité de la filtration naturelle (O.M.S, 1994).

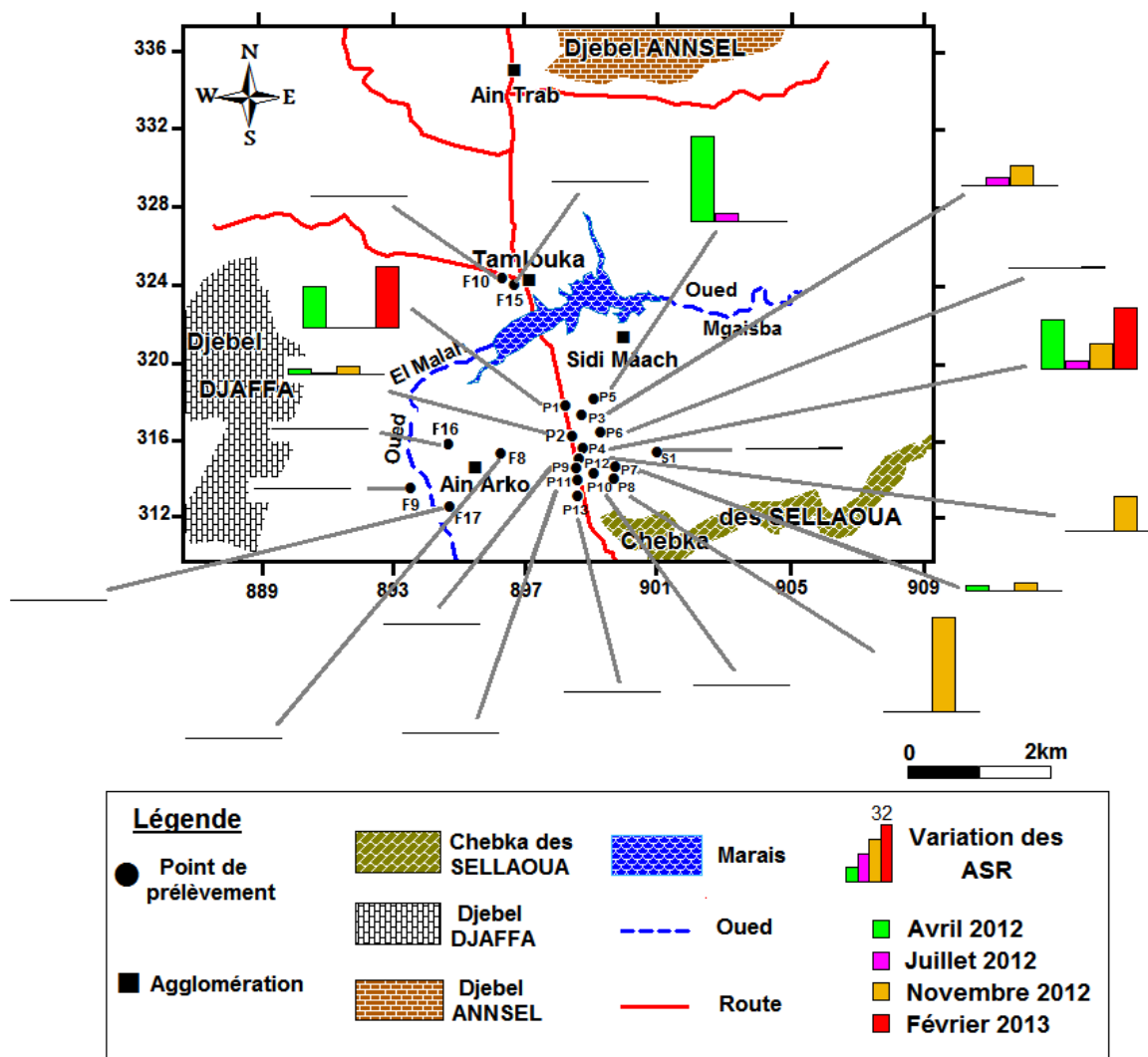


Figure 87 : Variation spatiale des Anaérobies sulfito-réductrices.

3-7. Identification des souches bactériennes

Les germes pathogènes du genre *Salmonella* ainsi que le *Vibrio cholérique* ont été systématiquement recherchés au niveau de toutes les stations. Aucun prélèvement ne s'est révélé positif pour les bactéries du genre *Salmonella* ni pour l'espèce *Vibrio cholerae* du groupe sérologique O1 qui est connu être pathogène. Cependant, *Vibrio cholerae* non-O1 a été détecté aux mois de juillet 2012 au niveau du P8. Nous avons aussi isolé et identifié d'autres espèces pathogènes telles que *Pseudomonas aeruginosa* et *Shigella spp.*

Le repiquage utilisé dont le but de purifier les souches, nous a permis de distinguer les caractères des colonies sur leurs milieux d'isolement. Cependant, l'examen cytologique nous a révélé que les Bacilles Gram (-) sont plus représentés par rapport aux Cocci Gram (+) qui demeurent faiblement représentés.

3-7-1. Résultats de l'identification biochimique

L'étude biochimique réalisée par trois types du système bioMérieux (API 20 E, API 20 NE, API Staph) nous a permis d'identifier 32 espèces bactériennes (Tableaux 35, 36, 37) dont 15 appartenant à la famille des Enterobacteriaceae. Nous constatons une présence majoritaire de trois espèces : *Citrobacter braakii*, *Aeromonas hydrophila* et *Serratia marcescens*. En effet, le puits P5 est considéré comme le point ou un nombre important d'espèces est identifiée suivi respectivement des puits P3, P2, et P12.

Tableau 35 : Résultats de l'identification par la galerie API 20E.

Espèces bactériennes identifiées	Code	Points de prélèvement
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	2206046	P1
<i>Shigella spp.</i>	0044042	P4
<i>Vibrio cholerae</i>	5347124	P8
<i>Escherichia coli 1</i>	5144552	P3, P10
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	1215773	P5
<i>Morganella morganii</i>	0174000	P2, P4
<i>Citrobacter freundii</i>	1644572	P5, P8
<i>Citrobacter braakii</i>	3704553	P12, P10, P13, P4
<i>Pseudomonas luteola</i>	3204002	P3, P5
<i>Pseudomonas fluorescens/putida</i>	2201000	P3
<i>Aeromonas hydrophila gr.1</i>	3246127	P3
<i>Aeromonas hydrophila gr.2</i>	3301000	P10
<i>Pantoea spp 2</i>	3245573	P1
<i>Proteus mirabilis</i>	0577020	P2
<i>Serratia marcescens</i>	5317161	P12, P5, P2
<i>Serratia ficaria</i>	1607573	P5
<i>Serratia liquefaciens</i>	5207563	P5
<i>Enterobacter sakazakii</i>	3345573	P3
<i>Enterobacter amnigenus 2</i>	3304150	P7

Pour les germes pathogènes, nous avons pu à identifier deux espèces pathogènes: *Pseudomonas aeruginosa* et *Shigella spp.* La présence de ces bactéries avec des concentrations assez importantes peut être considérée comme un risque sanitaire.

Tableau 36 : Résultats de l'identification par la galerie API 20 NE.

Espèces bactériennes identifiées	Code	Points de prélèvement
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0054575	P6
<i>Vibrio cholerae</i>	7076745	P8
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	0354457	P5
<i>Pseudomonas putida</i>	0143455	P3
<i>Aeromonas hydrophila/caviae</i>	7777750	P2, P1, S1
<i>Burkholderia cepacia</i>	5356577	P12
<i>Shewanella putrefaciens group</i>	1210344	P6
<i>Pasteurella pneumotropica</i>	7262444	P12, P7

Les tests effectués sur les staphylocoques nous ont permis d'identifier six espèces différentes considérés comme non pathogènes.

Tableau 37 : Résultats de l'identification par la galerie API Staph.

Espèces bactériennes identifiées	Code	Points de prélèvement
<i>Staphylococcus hominis</i>	6336012	P1, P6
<i>Staphylococcus saprophyticus</i>	6630152	F17
<i>Staphylococcus xylosus</i>	6736452	F16, P1, P5, P7
<i>Staphylococcus lentus</i>	6731770	P1, P7
<i>Staphylococcus sciuri</i>	6730440	P5
<i>Staphylococcus cohnii spp urealyticum</i>	6776142	P5

3-7-2. Résultats de l'identification moléculaire

Parmi 30 souches bactériennes testées, l'étude moléculaire réalisée nous a permis d'identifier 12 espèces. Après extraction de l'ADN génomique par le choc thermique, le gène codant pour l'ARNr 16S était amplifié par PCR en utilisant les deux amorces fD1 et Rs16. Ensuite, les produits d'amplification étaient visualisés sous UV après électrophorèse sur gel d'agarose à 1%. Ce gel montre la présence d'une bande unique de 1500 paires de bases, ce qui correspond à la taille de notre cible d'amplification (Fig. 88).

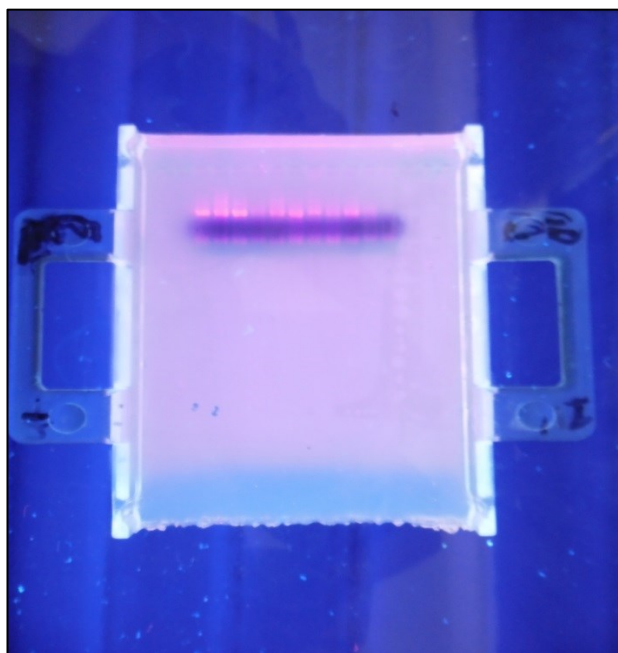


Figure 88 : Electrophorèse en gel d'agarose des produits PCR.

Le produit de PCR est bien purifié suite à l'élimination totale des amorces et des autres produits de PCR, ce qui permet de réaliser le séquençage. On a pu amplifier ce même gène ARNr 16S en utilisant les mêmes amorces soit fd1 soit Rs16. L'identification moléculaire des bactéries repose sur un constat : chaque bactérie possède un génome qui lui est propre. Les mutations s'accumulent progressivement au cours des générations et permettent l'évolution des gènes et des espèces. La séquence d'un gène résulte de l'héritage d'un gène ancêtre et de l'accumulation de mutations au cours du temps. L'ARN ribosomique 16S (ARNr 16S) a été choisi comme marqueur phylogénétique du fait de son universalité liée à son rôle clé dans la traduction de l'ARNm en protéines, de sa structure mosaïque incluant des régions conservées, variables et hypervariables, et de son abondance dans les cellules (Woese, 1987). Pour déduire leur position taxonomique, les différentes séquences obtenues ont été comparées avec celles disponibles dans la banque des données (Gen Bank) en utilisant le programme Blast N à travers le Centre National d'Information pour la Biotechnologie (NCBI). Les résultats sont présentés sous forme d'un pourcentage de ressemblance entre nos séquences d'ADN ribosomal 16S et les séquences disponibles dans la banque des données. Seuls les résultats avec un pourcentage d'identité supérieur à 98 % ont été retenus (Tableau 38).

Tableau 38: Pourcentage d'homologie de L'ARNr 16S de nos isolats avec celle de la base de donné (GenBank).

Espèces bactériennes	Produit séquencé (Fd1/Rs16)	Pourcentage d'homologie	Numéro d'accession
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	365/375	98 %	JX286673
<i>Escherichia coli</i>	427/430	98 %	/
<i>Shigella dysenteriae</i>	481/495	98 %	/
<i>Bacillus licheniformis</i>	273/279	98 %	/
<i>Pseudomonas putida</i>	337/345	98 %	/
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	212/239	98 %	/
<i>Acinetobacter baumannii</i>	377/380	98 %	/
<i>Enterobacter aerogenes</i>	352/397	98 %	/
<i>Morganella morgani</i>	255/263	98 %	/
<i>Citrobacter koseri</i>	389/392	98 %	/
<i>Citrobacter freundii</i>	132/150	98 %	/
<i>Bacillus subtilis</i>	120/151	98 %	/

La comparaison des séquences du gène ARNr 16S avec celles de la base de données GenBank nous a permis d'identifier 12 souches bactériennes comme étant les germes pathogènes de *Pseudomonas aeruginosa* sous le nombre d'accession JX286673 (Fig. 89).

Score	Expect	Identities	Gaps	Strand
634 bits(343)	2e-178	365/375(98%)	4/375(1%)	Plus/Plus
Query 12	GGGGTAGCCGTA-ACATGTAGTTCGAGCGCGTGACTGGAGCTTGCTCCTGGATTACAGCGG	70		
Sbjct 3	GGGGCAGCC-TACACATGCAG-TCGAGCGGATGAAGGGAGCTTGCTCCTGGATTACAGCGG	60		
Query 71	CGGACGGGTGAGTAATGCCTAGGAATCTGCCTGGTAGTGGGGGATAACGTCCGGAAACGG	130		
Sbjct 61	CGGACGGGTGAGTAATGCCTAGGAATCTGCCTGGTAGTGGGGGATAACGTCCGGAAACGG	120		
Query 131	GCGCTAATACCGCATACTGAGGGAGAAAGTGGGGGATCTTCGGACCTCACGCTATC	190		
Sbjct 121	GCGCTAATACCGCATACTGAGGGAGAAAGTGGGGGATCTTCGGACCTCACGCTATC	180		
Query 191	AGATGAGCCTAGGTCTGATTAGCTAGTTGGTGGGGTAAAGGCCTACCAAGGCGACGATCC	250		
Sbjct 181	AGATGAGCCTAGGTCTGATTAGCTAGTTGGTGGGGTAAAGGCCTACCAAGGCGACGATCC	240		
Query 251	GTAACGGTCTGAGAGGATGATCAGTCACACTGGAAGTGGAGACACGGTCCAGACTCCTAC	310		
Sbjct 241	GTAACGGTCTGAGAGGATGATCAGTCACACTGGAAGTGGAGACACGGTCCAGACTCCTAC	300		
Query 311	GGGAGGCAGCAGTGGGGAATATTGGACAATGGGCGAAAGCCTGATCCAGCCATGCCCGCG	370		
Sbjct 301	GGGAGGCAGCAGTGGGGAATATTGGACAATGGGCGAAAGCCTGATCCAGCCATG-CCGCG	359		
Query 371	TGTGTGAAGAAGGTC	385		
Sbjct 360	TGTGTGAAGAAGGTC	374		

Figure 89 : La séquence partielle de la souche bactérienne *Pseudomonas aeruginosa*.

Conclusion

Pendant notre étude, nous avons procédé à l'examen de la qualité microbienne des eaux souterraines de la plaine de Tamlouka. Les principaux groupes de germes indicateurs de la qualité des eaux ont été explorés dans ces eaux. Il s'agit de la flore aérobie mésophile totale, Coliformes totaux, Coliformes fécaux, Streptocoques fécaux et les Anaérobies sulfito-réducteurs ainsi que les germes pathogènes. La lecture des résultats de cette étude montre que la majorité des points notamment les puits présentent des eaux plus ou moins contaminées. Seule les forages et la source présentent des eaux de qualité bactériologique relativement bonne. Les dénombrements bactériens montrent que la concentration en germes est variable d'un puits à l'autre. Il apparaît donc que les teneurs en germes indicateurs de contamination fécale dépassent largement les normes fixées par l'O.M.S. Malgré la forte charge des bactéries indicatrices de contamination fécale, les germes pathogènes du genre *Salmonella* ainsi que le *Vibrio cholerae*, n'ont pas été détectés. Par contre, d'autres germes pathogènes ont été repérés tel que *Pseudomonas aeruginosa* possédant un risque sanitaire posé. Cette forte charge bactérienne reflète la contamination de ces puits à partir des ordures ménagères et de l'infiltration des eaux usées à partir des fosses septiques, les rejets d'élevages souvent abandonnés sans valorisation constituent certainement les causes principales de la contamination des eaux souterraines dans cette région. Cette contamination locale peut être diffuse pour la nappe étudiée. Aussi l'utilisation de ces eaux, sans traitement préalable, pour l'irrigation et plus encore pour l'alimentation présente un risque sanitaire majeur.

Chapitre V : Modèle neuronal

A- Réseaux de neurones artificiels

1- Présentation de la méthode neuronale

Les réseaux de neurones artificiels (RNA ou ANN) est une nouvelle approche d'approximation des systèmes complexes difficiles à modéliser à l'aide des méthodes stochastiques classiques. Ils présentent un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques. Les réseaux de neurones artificiels sont issus des premiers travaux réalisés dans le domaine de l'intelligence artificielle fondés sur des modèles qui tentent d'expliquer comment les cellules du cerveau et leurs interconnexions parviennent, d'un point de vue global, à exécuter des calculs complexes. Il s'agit d'un modèle empirique non linéaire (Fortin et al., 1997). Dans les réseaux de neurones artificiels de nombreux processeurs appelés cellules ou unités, capables de réaliser des calculs élémentaires pour résoudre un problème spécifique, sont structurés en couches successives capables d'échanger des informations au moyen de connexions qui les relient. Selon R. Hecht Nielsen 1990, un réseau de neurones constitue un système de calcul composé d'éléments de traitement simples fortement interconnectés, qui traitent l'information par leur changement d'état dynamique en réponse à une entrée externe.

2- Connexions entre les neurones

Les réseaux de neurones sont organisés en couches composés d'un certain nombre de neurones reliés entre eux et qui contiennent une fonction d'activation. Ils calculent la somme de ses entrées puis cette valeur passe à travers la fonction d'activation pour produire sa sortie : les entrées (X_1, X_i, \dots, X_n) sont présentées au niveau du réseau par l'intermédiaire de la couche d'entrée ; cette dernière sert à les communiquer aux d'autres couches cachées où il y aura un traitement à travers des connexions pondérées. Ensuite, la réponse sera transmise à partir de ces couches cachées à la couche de sortie (S). Une connexion entre deux neurones a une valeur numérique associée appelée poids de connexion (W_1, W_i, \dots, W_n) (Fig. 90).

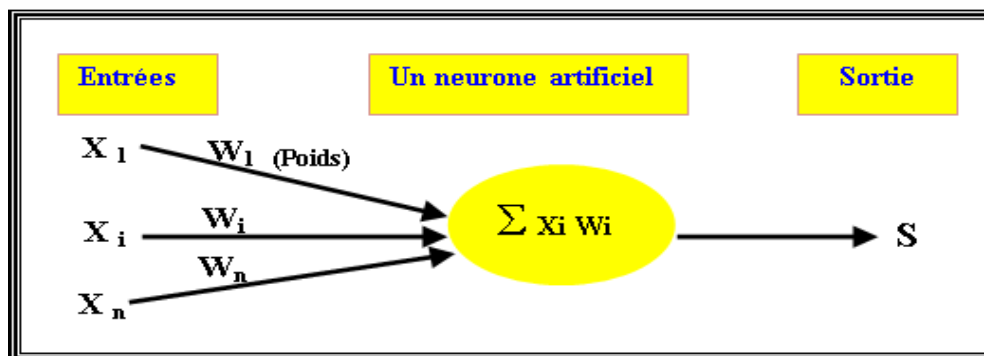


Figure 90 : Schéma d'un neurone artificiel.

Le fonctionnement d'un neurone artificiel simule le fonctionnement schématisé du neurone humain (Fig. 91).

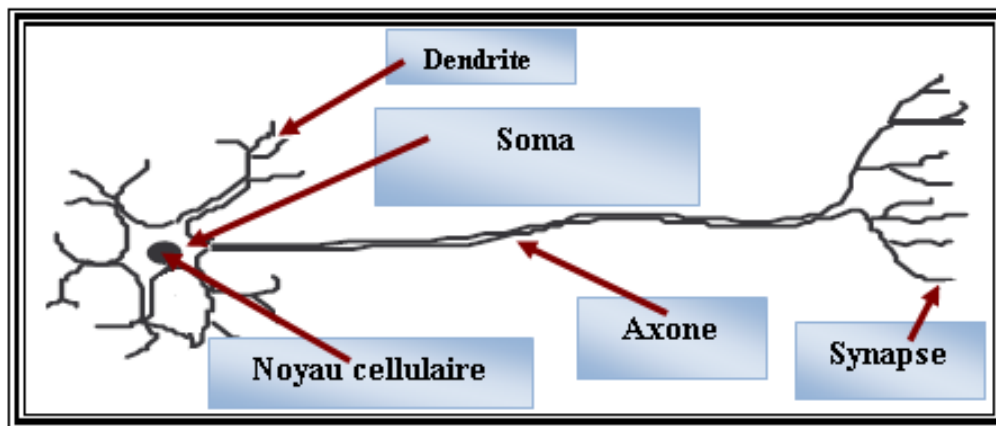


Figure 91 : Schéma d'un neurone biologique.

Le tableau 39 donne un aperçu analogique entre les neurones biologiques et artificiels.

Tableau 39 : Analogie entre les neurones biologiques et artificiels.

Neurone biologique	Neurone artificiel
Soma	Neurone
Dendrite	Entrée (Input)
Axone	Sortie (Output)
Synapse	Poids

Il existe plusieurs catégories de réseaux chacune ayant des caractéristiques propres, mais le type de réseau le plus utilisé est le Perceptron Multicouche (PMC). Il est un réseau de neurones pour lequel les neurones sont organisés en couches successives, les connections sont toujours dirigées des couches inférieures vers les couches supérieures. Il comporte une ou plusieurs couches de neurones artificiels pour capter les entrées, une ou plusieurs couches cachées (MLP ou MultiLayers Perceptron) et une couche de neurones artificiels pour émettre les sorties du modèle. Les couches cachées sont celles qui ne sont ni en entrée ni en sortie d'un réseau. Choisir l'architecture d'un MLP consiste à fixer le nombre de couches, le nombre de cellules par couche, la nature des différentes connexions entre les neurones et la nature des neurones sur chaque couche.

Chaque couche contient des unités de calcul (neurones) connectées à d'autres neurones par la voie des poids (W_{ij} et W_{jk}) (Najjar et Zhang, 2000 ; Najjar et Ali, 1998a et 1998b). La fonction de transfert ou d'activation de non linéarité peut avoir plusieurs formes distinctes.

La fonction la plus utilisée est en général une somme pondérée de type sigmoïde. Il s'agit d'une fonction continue, non décroissante, différentiable et bornée, mais aussi elle introduit du non linéarité et dérivée d'elle-même.

A chaque connexion entre les neurones de deux couches successives, il est associé un poids modifiable au cours de l'apprentissage en fonction des jeux de données en entrée et en sortie.

Un PMC peut contenir plusieurs couches cachées, mais le plus souvent une car il a été montré que quel qu'en soit le nombre, il existe un MLP équivalent avec une seule couche cachée. Cependant, quelques travaux théoriques ont montré que l'utilisation d'une seule couche cachée est suffisante pour l'ANN pour se rapprocher de toute fonction complexe non linéaire (Cybenko, 1989 ; Hornik et al., 1989). Ainsi, on se limitera dans cette étude à l'utilisation de MLP comportant une seule couche cachée. Si les états des neurones de la couche d'entrée sont déterminés par les variables à l'entrée du réseau, les autres neurones (de la couche cachée et de sortie) doivent estimer l'intensité de la simulation en provenance des neurones de la couche précédente par la relation suivante :

$$S_j = \sum_{i=1}^n X_i W_{ij} + b_j$$

Avec :

S_j : somme des poids entre les entrées du $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche cachée ;

X_i : valeur de sortie du $i^{\text{ème}}$ neurone de couche précédente ;

W_{ij} : poids synaptique du neurone i de la couche d'entrée au neurone j de la couche cachée ;

b_j : le biais ou le seuil d'activation du neurone j .

La réponse des neurones est une fonction d'activation non linéaire de type sigmoïde qui est défini par la formule suivante :

$$f(S_j) = \frac{1}{1 + e^{-S_j}}$$

Où $f(S_j)$ est pratiquement linéaire entre 0 et 1.

Les valeurs des variables d'entrée ont été normalisées entre (0, 1) par le modèle selon l'équation suivante :

$$\bar{X} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

Avec :

\bar{X} : La valeur de la variable d'entrée ;

X_{\min} : Sa valeur minimale ;

X_{\max} : Sa valeur maximale ;

X : La valeur de la variable normalisée.

3- Application de la méthode Neuronale

Les réseaux de neurones artificiels, connus généralement sous l'abréviation ANN (Artificial Neural Network), sont des modèles mathématiques non linéaires de type (boîte noire) capables d'établir des relations entre les entrées et les sorties d'un système. Cette technique est utilisée dans de nombreux aspects de la science et de l'ingénierie vu son succès dans la modélisation des systèmes linéaire et non linéaire. Pour un certain nombre de problèmes hydrologiques, les réseaux neuronaux sont utilisés pour modéliser la relation Pluie - Débit, pour déterminer les paramètres d'un aquifère, pour modéliser l'interaction nappe - rivière. ...etc. Dans le domaine de la qualité de l'eau, cette méthode est appliquée pour la prévision des paramètres de la qualité de l'eau (Maier & Dandy, 1996).

3-1. Architecture du réseau

Elle a pour but de préciser le nombre de couches qui le composent, le nombre de neurones dans chaque couche et le poids des connexions. Chacune des couches comportent plusieurs neurones, qui se présentent comme unité de calcul autonome et relié à la totalité ou à certains neurones de la ou des couches précédentes par l'imposition de poids.

Dans le cadre de ce travail, nous appliquons un modèle de réseau à trois couches : une couche d'entrée qui recevra les données source utilisées pour l'analyse, une seule couche cachée constituée par l'ensemble de neurones des sorties de la couche d'entrée et une couche de sortie qui donne le résultat obtenu après compilation par le réseau des données entrant dans la première couche. La fonction de transfert appliquée est de type sigmoïde. Le réseau de neurones utilisé est l'algorithme de rétropropagation de l'erreur qui correspond au Perceptron multicouche (Rumelhart et al., 1986).

3-2. Critères de performance du modèle

L'application de ce modèle a été effectuée sur les paramètres de la qualité des eaux souterraines analysées sur une année (2012/2013) au laboratoire de Génie Civil et Hydraulique de l'Université 8 Mai 1945, Guelma, pour créer le modèle du RNA en utilisant le logiciel STATISTICA neural network version 4.0.

La base de données a été divisée en trois phases : une phase d'apprentissage, une phase de test et une phase de validation. L'apprentissage est considéré comme la propriété la plus intéressante du modèle neuronale. Pour apprendre, le réseau doit connaître la réponse qu'il aurait dû donner. C'est la phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Elle consiste à calculer les pondérations optimales des différentes liaisons, en utilisant un échantillon. La phase de test a comme intérêt, la propriété d'arrêter l'apprentissage (la minimisation) au bon moment. Autrement dit, elle est utilisée pour tester le raisonnement des réseaux neuronaux et évaluer la qualité de la procédure d'apprentissage. Une fois le réseau calculé, il faut procéder à des tests pour vérifier que le réseau réagit bien comme on le souhaite : c'est la validation. Les paramètres statistiques utilisés dans ce travail sont : L'erreur moyenne des carrée RMSE (Root Mean Square Error), et le coefficient de détermination R^2 . Ces paramètres sont donnés par les relations suivantes :

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \hat{X}_i)^2}{N}} \qquad R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}$$

Où :

X_i : La valeur mesurée de l'élément ;

\hat{X}_i : La valeur calculée de l'élément par le modèle ;

\bar{X} : La moyenne de l'élément mesurée ;

N : le nombre de données de l'ensemble de calage.

Le coefficient de détermination R^2 montre la variation de la valeur de l'élément calculé ou estimé par le modèle de la régression linéaire. En outre, le RMSE a été employé pour comparer l'exécution de MLP à d'autres types communs du RNA comprenant le RBF, le GRNN et le linéaire.

4- Création du modèle

Parmi les réseaux neuronaux les plus utilisés et les plus sophistiqués on y trouve les Perceptrons Multicouches (MLP) qui ont été choisis dans ce travail. En effet, les réseaux de type Perceptrons Multicouches ont montré leur efficacité entant qu'outil de modélisation appliqué aux données empiriques. A l'entrée du réseau nous avons utilisé les paramètres suivants:

La concentration en ions de : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-), Nitrate (NO_3^-), Nitrite (NO_2^-), Ammonium (NH_4^+), Phosphate (PO_4^-), ainsi que des paramètres physiques à savoir: le potentiel hydrogène (pH), la température (T), l'oxygène dissous (O_2) et la salinité (Sal). La conductivité électrique (CE) est utilisée comme sortie. La structure du modèle RNA peut être représentée par la forme suivante :

$$\{\text{CE}\} = \text{ANN} [\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^-, \text{NO}_3^-, \text{NO}_2^-, \text{NH}_4^+, \text{PO}_4^-, \text{pH}, \text{T}, \text{O}_2, \text{Sal}].$$

Le diagramme schématique de ce réseau neuronal est illustré dans la figure 92. Il montre une structure typique avec des signaux qui découlent des nœuds d'entrée, traversant les nœuds cachés, atteignant par la suite le nœud de sortie.

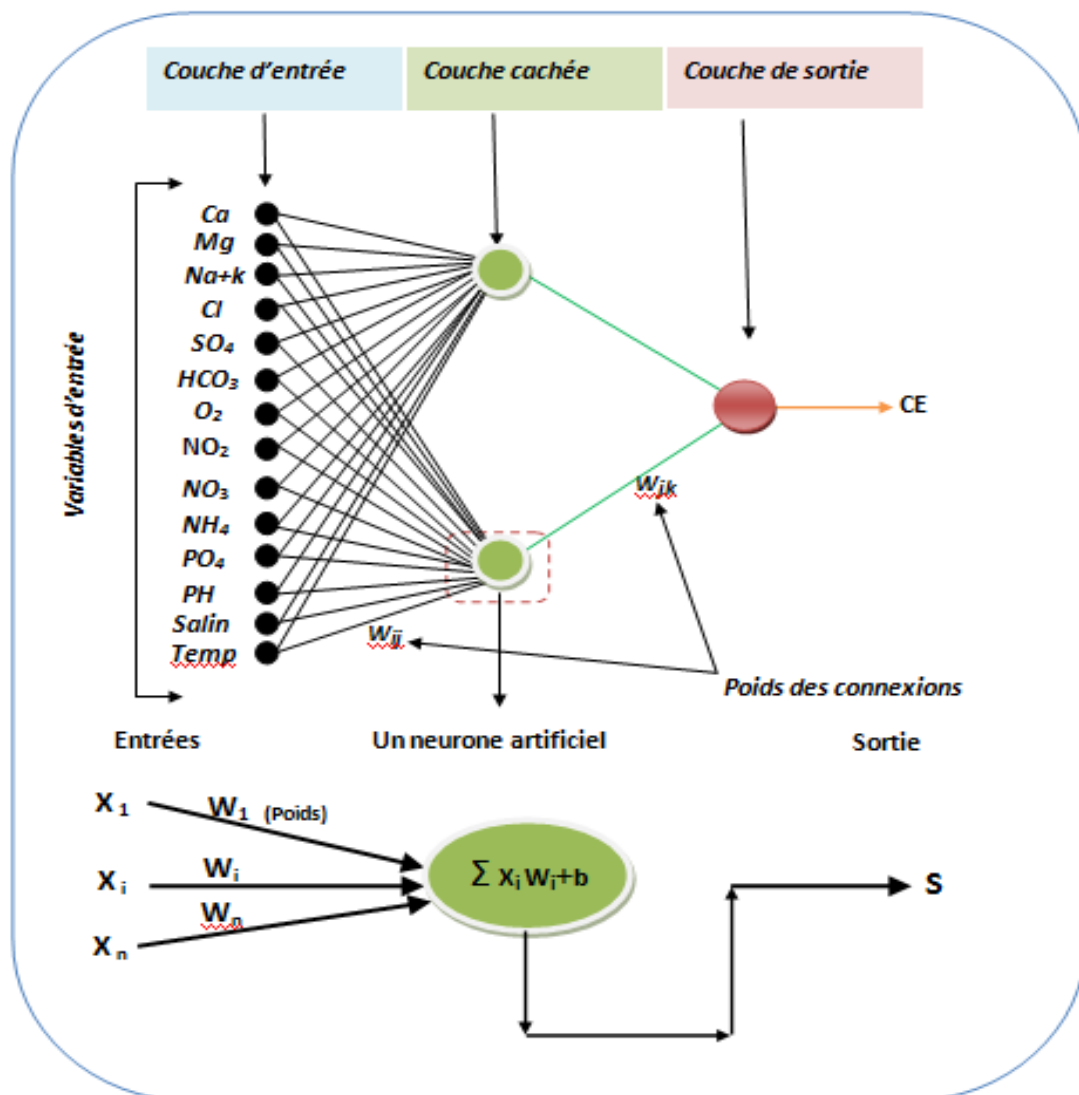


Figure 92 : Illustration du réseau à 3 couches (MLP).

Un poids numérique est associé à chacun de raccordements d'entre-nœud. Le poids de W_{ij} représente la force des raccordements des nœuds entre l'entrée et la couche cachée tandis que W_{jk} représente la force des raccordements des nœuds entre la couche cachée et la sortie. Chaque nœud caché (j) reçoit des signaux de chaque nœud d'entrée (i) qui porte des valeurs standard (X_i) d'une variable d'entrée. Chaque signal vient à travers une connexion à un poids (W_{ij}). Le signal entrant net reçu par un nœud caché (Net_j) est la somme de poids des signaux entrants, X_i , et les poids correspondants (W_{ij}), plus une constante reflétant la valeur seuil de nœud (TH_j).

$$Net_j = \sum_{i=1}^n \overline{X}_i W_{ij} + TH_j$$

Le signal net dans un nœud caché (Net_j) est transféré de sa part à un nœud de sortie (O_j) en utilisant une fonction de transfert non linéaire (f) de type sigmoïde, donné par l'équation suivante:

$$O_j = f(Net) = \frac{1}{1 + e^{-Net_j}}$$

O_j passe comme un signal au nœud de sortie (k). Les signaux nets d'un nœud de sortie (Net_k) :

$$Net_k = \sum_{i=1}^n O_j W_{jk} + TH_k$$

Les signaux nets d'un nœud de sortie (Net_k) sont transformés en utilisant une fonction de type sigmoïde à un résultat standard ou de mesure (O_k) qui est :

$$\overline{OK} = f(Net_k) = \frac{1}{1 + e^{-Net_k}}$$

Où : \overline{X} est un standard pour produire le résultat de sortie.

$$OK = \overline{OK}(O_{\max}(k) - O_{\min}(k) + O_{\min}(k))$$

La fonction sigmoïde devrait être continue, différentiable et limitée entre un intervalle de (0, 1), (Riad et al., 2006). La figure 93 montre le graphique de la fonction sigmoïde. L'erreur calculée entre la valeur réelle observée et la valeur calculée de la même variable est propagée par le réseau et les poids sont ajustés.

Les processus cycliques de l'alimentation et de la propagation d'erreur sont répétés jusqu'à ce que l'erreur de vérification soit minimale (Liu et al., 2003).

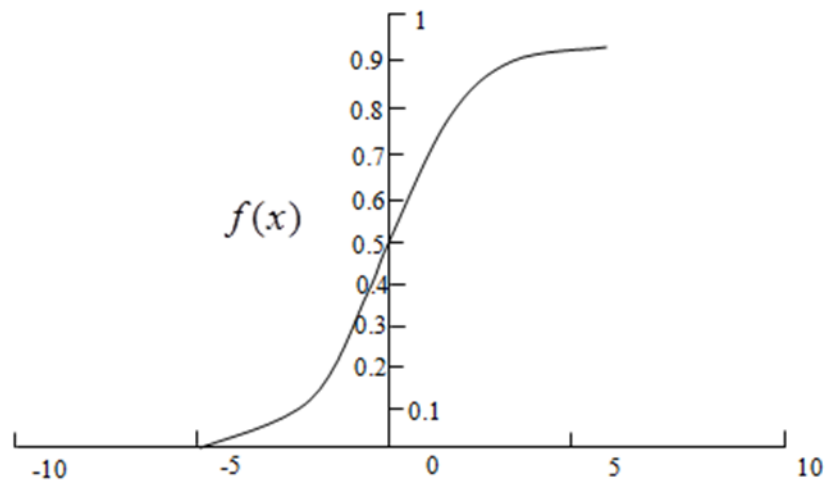


Figure 93 : Fonction de transfert sigmoïde.

5- Calibrage et vérification du modèle

La vérification est une technique utilisée généralement en modèles d'ANN, elle possède un impact significatif sur la division des données (Bruden et al., 1997). Cette technique a pour but de former le réseau en utilisant un ensemble de données, et à comparer la performance par rapport à un modèle vérifié non utilisé dans l'apprentissage. Ceci examine la capacité du réseau de généraliser correctement sur l'ensemble des données, tout en observant si l'erreur est raisonnablement basse pour la vérification. Cette dernière a été employée pendant l'arrêt des critères de détermination du nombre optimal de nœuds de la couche caché (Braddock et al., 1997) en évitant l'excès dans l'apprentissage (Campolo et al., 1999). Lorsque l'erreur de vérification commence à augmenter, l'apprentissage sera arrêté (Lallahem et Mania, 2002). Le Modèle a été divisé en sous-ensembles, un pour le calibrage (apprentissage), un pour la vérification en travers du réseau et un pour l'essai (validation). Nous avons sélectionné 50 % des données pour la formation, 25 % pour la vérification et les 25% restant pour examiner la validité de la prévision de réseau.

5-1. Détermination des modèles d'entrées

Les modèles d'ANN sont utiles principalement pour des problèmes complexes où le nombre d'entrées est grand où aucune connaissance *a priori* n'est disponible pour déterminer les entrées appropriées (Lachtermacher et Fuller, 1994). Dans ce travail, une analyse de sensibilité a été effectuée pour identifier l'importance des variables d'entrée. Ceci a indiqué quelles variables sont considérées les plus utiles pour être maintenues par le modèle RNA.

Les modèles RNA ont également la capacité d'éliminer les variables de basse sensibilité qui n'ont aucun effet significatif sur l'exactitude du modèle.

5-2. Résultats et discussion

{CE} = ANN [Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^- , pH, T, O_2 , Sal].

Les types de réseaux considérés sont : MLP (3 couches), RBF, GRNN, et linéaire. Pendant l'analyse, 183 réseaux ont été examinés. Le meilleur modèle optimal du RNA trouvé est le MLP (3 couches) avec 4 nœuds cachés (Fig. 94).

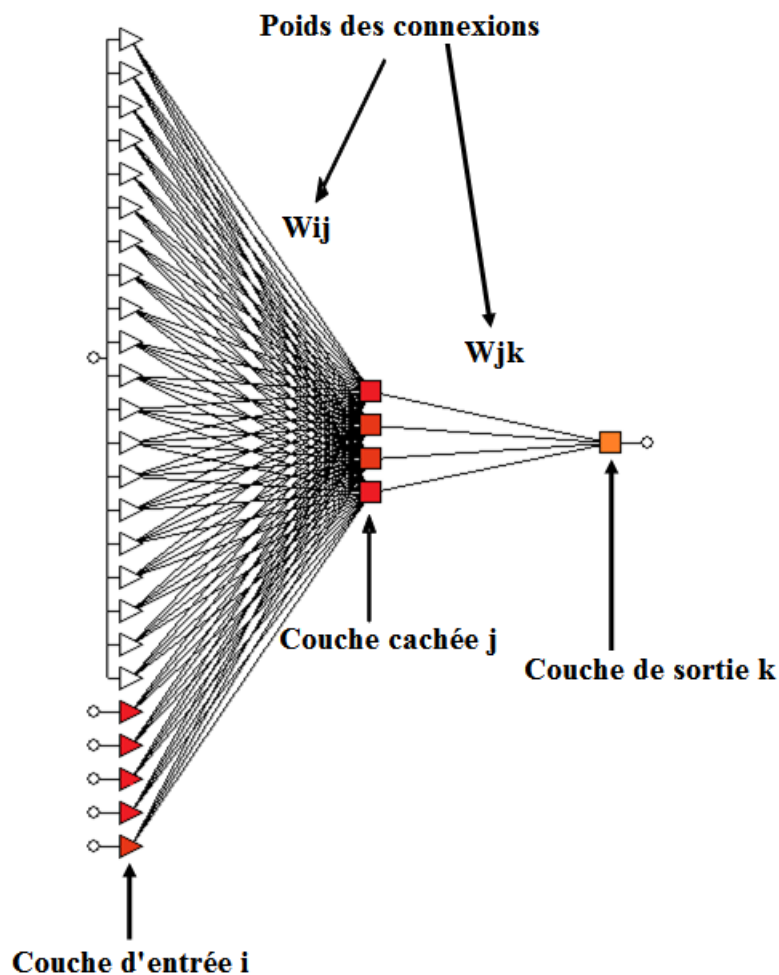


Figure 94 : Architecture du modèle RNA.

L'erreur minimale est de 0.1160 comparée aux autres types de réseaux RNA (Tableau 40).

Tableau 40 : L'erreur RMS dans différents réseaux de neurone.

Type de réseau	Erreur (RMS)
MLP (3 couches)	0,1160
GRNN	0,1337
RBF	0,5899
Linear	0.1243

Le modèle a une très bonne performance dans la vérification avec un rapport de régression de 0.1214 et un coefficient de corrélation de 0.9929 pour l'apprentissage, la vérification et la validation (Tableau 41). Il montre un excellent accord entre la conductivité observée et simulée (Fig. 95).

Tableau 41 : Paramètres statistiques de régression.

	Te.CE	Ve.CE	Te. CE
Data Mean	2214.66	1974.56	2077.84
Data S.D	806.0372	865.5469	892.8858
Error Mean	0.4941411	-13.85742	-36.93676
Error S.D	79.21983	105.1284	331.8226
Abs E. Mean	50.49697	77.26047	166.5138
S.D. Ratio	0.0982831	0.121459	0.3716294
Corrélation	0.9951609	0.992929	0.9333046

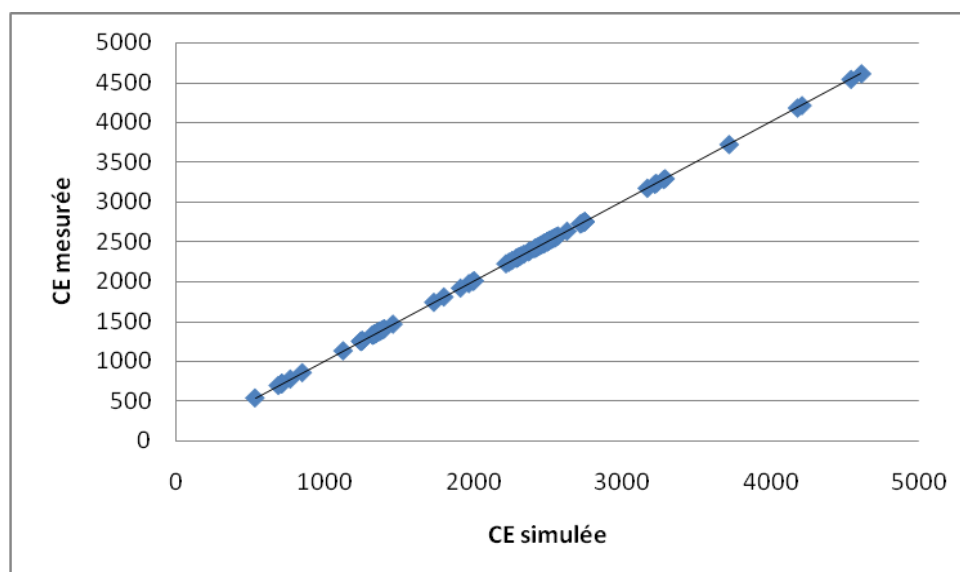


Figure 95 : Corrélation entre la conductivité simulée et mesurée.

L'analyse de la sensibilité du RNA des variables de qualité de l'eau en phases d'apprentissage et de vérification indique que 05 sur 15 éléments respectivement selon le degré de sensibilité à savoir : le potentiel hydrogène (pH), les sulfates (SO_4^{2-}), la Salinité (Sal), les chlorures (Cl^-) et le sodium (Na^+), sont les facteurs les plus importants influençant la conductivité électrique dans les eaux souterraines (Tableau 42).

Tableau 42 : Classement des variables par analyse de sensibilité.

	pH	SO_4^{2-}	Sal	Cl^-	Na^+
Rank	1	2	3	4	5
Ratio	8,95	1,88	1,38	1,15	1,12

Conclusion

Dans ce travail, le modèle neuronal représente une méthode originale de modélisation réside dans l'utilisation des réseaux neuronaux (approche connexionniste), qui sont fondés sur des modèles qui tentent d'établir des relations entre les paramètres d'entrée et de sortie par interconnexions des neurones. L'intérêt de ces modèles demeure dans leur capacité d'apprendre des relations complexes à partir de données numériques. Donc, le choix et l'application d'un modèle neuronal reste un domaine de recherche très actif à l'inverse des autres modèles stochastiques classiques. Le recours à ces méthodes neuronales plus complexes constitue en conséquence une alternative pleinement justifiée et privilégiée dans le domaine de la gestion et de la qualité des eaux. Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que ce sont les réseaux de MLP qui s'avèrent être la meilleure structure du RNA pour modéliser et prévoir l'interaction des éléments influençant la qualité des eaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les eaux souterraines jouent un rôle fondamental dans la stabilité des populations rurales dans la région de Tamlouka. Elles sont exploitées par des puits, des sources et des forages ; drainées par différentes techniques traditionnelles et modernes utilisées pour extraire les eaux des nappes pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation. Elles font donc l'objet de notre étude qui porte essentiellement sur la qualité physicochimique et bactériologique de ces eaux.

Avec un climat continental semi-aride, la région de Tamlouka est caractérisée par une pluviométrie moyenne annuelle qui oscille entre 500 et 600 mm, avec une saison estivale chaude et sèche et un hiver froid et humide. Ce climat influe sur le bilan hydrique qui montre des valeurs très élevées de l'évapotranspiration favorisant l'accumulation des sels.

L'étude géologique permet d'identifier les diverses formations qui constituent le terrain notamment, celles des calcaires fissurés du Jurassique et des calcaires Crétacé-Eocènes au Nord de la plaine et les bordures de la cuvette. La plaine de Tamlouka occupe une situation structurale permettant de ressortir trois domaines, Tellien, la plateforme Néritique Constantinoise et le Sillon des Sellaoua. Elle comprend le Plio-quaternaire composé principalement par une croûte de calcaire, d'argile et parfois de sables et graviers.

La corrélation entre la géologie et la géophysique montre que les formations hydrogéologiques considérées comme intéressantes se trouvent au niveau d'Ain Arko, le Nord de Tamlouka et les bordures de la cuvette. En effet, deux systèmes aquifères distincts ont été déterminés. Le premier se trouve au niveau du remplissage Mio-Plio-Quaternaire constitue la nappe superficielle ; l'autre constitue la nappe profonde situé au niveau des formations carbonatées Jurassique-Crétacé. Le traitement des données piézométriques fait ressortir un écoulement d'eau souterrain de l'Ouest vers l'Est. L'examen du modèle numérique de terrain, réalisé par trois méthodes différentes d'interpolation dévoile que les écoulements sont orientés du Sud-Ouest vers le Nord-Est.

Du point de vue hydrochimique, le faciès dominant est chloruré sulfaté sodique et chloruré sulfaté calcique. Les bonnes corrélations entre le calcium et les chlorures, le calcium et les sulfates, les chlorures et les sulfates et le sodium avec les sulfates confirment l'influence des formations évaporitiques sur le chimisme des eaux de la région.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La modélisation géochimique nous a permis d'obtenir :

- Une large sous saturation vis-à-vis de l'halite (-6,29 à 5,36).
- Une sous-saturation par rapport à l'anhydrite, le gypse confirmant une tendance à la dissolution de ces minéraux.
- Une sursaturation vis-à-vis le groupe des carbonates exerçant une précipitation rapide des éléments chimiques.

Les cartes thématiques réalisées, nous ont permis de constater une minéralisation élevée au Sud et au centre de la plaine. La variation spatiale des éléments chimiques diffère d'un élément à autre, tandis que la variation spatiale des nitrates montre des valeurs assez élevées indiquant une pollution organique diffusante de la surface. L'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation nous a montré que les eaux souterraines de la plaine de Tamlouka sont généralement de qualité médiocre pour l'utilisation à des fins agricoles.

L'examen de la qualité microbienne des eaux souterraines de la plaine de Tamlouka montre une contamination importante des puits. Les dénombrements bactériens basés sur la recherche de la flore aérobie mésophile totale, Coliformes totaux, Coliformes fécaux, Streptocoques fécaux et les Anaérobies sulfite-réducteurs a révélé que les teneurs en germes indicateurs de contamination fécale dépassent largement les normes de potabilité. L'identification des germes pathogènes en utilisant des différentes techniques biochimique et moléculaire, a montrée l'existence de 38 espèces différentes parmi lesquelles on trouve des germes pathogènes ce qui constitue un risque sanitaire qui n'est pas rassurant du tout.

A l'exception de quelques points, les eaux souterraines de la plaine de Tamlouka ne sont pas aptes à la consommation humaine. La contamination bactérienne et par les nitrates des puits captant la nappe superficielle est liée à différentes origines, nécessite des mesures d'hygiène et de sensibilisation, incluant la protection de ces points, un traitement d'épuration et de désinfection préalables des eaux suspectes et l'utilisation modérée des fertilisants. Pour l'agriculture, la forte minéralisation des eaux nécessite le choix des plantes à cultiver. Les résultats obtenus à travers le modèle appliqué, indiquent que ce sont les réseaux de MLP qui s'avèrent être la meilleure structure du RNA pour modéliser et prévoir l'interaction des éléments influençant la qualité des eaux.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Aboukacem A., Chahlaoui A., Soulaymani A., Rhazi-filali F. et Benali D. (2007) : Etude comparative de la qualité bactériologique des eaux des oueds Boufekrane et Ouislane à la traversée de la ville de Meknès (Maroc). Rev. Microbiol. Ind. San et Environn. N°1, p:10-22.

A.N.D.I. (2013). Agence Nationale de Développement de l'Investissement : Rapport interne, monographie de la wilaya de Guelma. 19p.

Archambault C., Combe M. et Ruhard J.P. (1975) : Le plateau des phosphates in ressources en eau du Maroc. Notes et Mém. Serv. Géol. Rabat XI 231, 232-25.

Bagnouls F. et Gaussen H. (1953) : Saison sèche et indice thermique xérothermique. Doc. Carte product. Végét., sér. Généralités, 3(1), 47 p.

Barbier A.M. (2006) : Elaboration de méthodologies innovantes de traitements des données satellitaires dans un cadre agroenvironnemental. Rapport de Stage Master 2 Professionnel en Géomatique (SIGMA), INP ENSAT Université de Toulouse, France. 44p.

Berger A., Lacroix P., Lavenu G., Lesellier S., Reynaud I., Tournadre G. et Gonzalez O. (2005) : ArcView 9 Niveau 1. Support de cours avec exercices pratiques et données. Edition ESRI France, Meudon, p. 388.

Bitton G. (1999): Wastewater microbiology. 2e éd. John Wiley & Sons, NY. 578p.

Bojomolov J. (1975): Hydrogéologie et principes de la géologie appliquée.

Bonton A., Rouleau A., Bouchard C. and Rodriguez M. (2010): Assessment of groundwater quality and its variations in the capture zone of a pumping well in an agricultural area. Agric Water Manag 97:824-834.

Borrego A.F. et Romero P. (1982): Study of the microbiological pollution of a Malaga littoral area II. Relationship between fecal coliforms and fecal streptococci. VI^e journée étude pollutions, Cannes, France, 561-569.

Bouchet R.J. (1963) : Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. IAHS Publ, 62, 134-142.

Bounouira H. (2007) : Etude des qualités chimiques et géochimiques du bassin versant du Bouregreg. Thèse de Doctorat, Université d'Ibn Tofail, Maroc. 272p.

Braddock R.D., Kremmer M.L. and Sanzogni L. (1997): Feed-forward artificial neural network model for forecasting rainfall run-off. Proceedings international congress on modelling and simulation (Modsim). The modelling and simulation society of Australia Inc., Hobart, Australia, pp. 1653-1658.

Bremond R. et Perrodon C. (1979) : Paramètres de la qualité des eaux, 2^{ème} édition. Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie. 259p.

Bricha S., Ounine K., Oulkheir S., El Haloui N. et Attarassi B. (2007) : Etude de la qualité physicochimique et bactériologique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). Afrique Science 03(3) (2007) 391 – 404.

Burden F.R., Brereton R.G. and Walsh P.T. (1997): Cross- validatory selection of test and validation sets in multivariate calibration and neural networks as applied to spectroscopy. Analy. 122 (10), 1015-1022.

Campolo M., Andreussi P. and Soldati A. (1999) : River flood forecasting with a neural network model. Water Resources Research 35 : 1191-1197.

CEAEQ (2006). Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec: Recherche et dénombrement des entérocoques: méthode par filtration sur membrane, MA. 700-Ent 1.0, Rév. 3, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. 23p.

Clausen E.M, Green B.L. and Litsky W. (1977): Fecal streptococci: indicators of pollution. Dans: Hoadley, A.W. et B.J. Dutka, édit., Bacterial Indicators/Health hazards associated with water. Am. Soc. Test. Mat. (ASTM). 635: 247-264.

Cybenko G. (1989): Approximation by superposition of sigmoidal functions, Mathematics of control, signals and systems, 2, p 303-314, p.377-403.

Davies C.W. (1962): Ion association, Ed. Butterworths .Washington .190p.

Debieche T.H. (2002) : Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse Nord-Est Algérien. Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie. 235p.

Debye P. et Hückel E. (1923): The theory of electrolytes. I. Lowering of freezing point and related phenomena. Phys Z 24:185-206.

Delarras C. et Trebaol B. (2003) : Surveillance sanitaire et microbiologique des eaux: réglementation - prélèvements - analyses. TEC & DOC. 269p.

Denis F., Poly M.C., Martin C., Bingen E. et Quentin R. (2007): Bactériologie Médicale : technique usuelles. Elsevier L'Esson SAS.

Detay M. (1993): The use of artificial recharge to improve groundwater quality and quantity: the Lyonnaise des Eaux-experience, in International Workshop: Groundwater quality and quantity and water supply in Lithuania - Vilnius -Druskininkai pp. 18-19.

Direction Générale des Forêts (2008) : Carte des formations forestières de la wilaya de Guelma.

Djidjel et Djorfi (1992) : Contribution à l'étude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine de Tamlouka. Mémoire d'ingénieur, Université d'Annaba, Algérie. 149p.

D.P.A.T. (2008). Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire : Rapport interne, monographie de la wilaya de Guelma. 36p.

El Morhit M. (2009): Hydrochimie, éléments traces métalliques et incidences Ecotoxicologiques sur les différentes composantes d'un écosystème estuarien (bas Loukkos) Maroc. Thèse de Doctorat, Faculté des sciences Rabat, 260p.

Elmund G.K., Allen M.J. and Rice E.W. (1999): Comparison of Escherichia Coli, Total Coliform, and Fecal Coliform Populations as Indicators of Wastewater Treatment Efficiency. Water Environment Research 71(3):332-3.

Emmanuel E. (2004) : Evaluation des risques sanitaires et écotoxicologiques liés aux effluents hospitaliers. Thèse de Doctorat, Lyon: INSA de Lyon. 260p.

Farrow J.A.E., Kruze J., Phillips B.A., Bramley A.J. and Collins M.D. (1984): Taxonomic studies of *S. bovis* and *S. equinus*: description of *S. alactolyticus* sp. no. and *S. saccharolyticus* sp. nov. System. Appl. Microbiol. 5:467-482.

Fortin V., Ouarda T., Rasmussen T.P. et Bobée B. (1997) : Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits. Revue des Sciences de l'Eau, 4 : pp. 461-487.

Galego Fernandes P., Carreira P. et Bahir M. (2010) : Mass balance simulation and principal components analysis applied to groundwater resources: Essaouira basin (Morocco). *Environ Earth Sci* 59: 1475-1484.

Gantzer C., Lucena F., Schwartzbrod L. and Jofre J. (1998): *Virologie*. Volume 2, numéro 2. 117p.

Gaujous D. (1995) : La pollution des milieux aquatiques : aide-mémoire. 2^{ème} Ed. 217p.

Geldreich E.E. and Kenner B.A. (1969): *J. WPCF*41, R. 336.

Gleeson C. and Gray N. (1997): The coliform index and waterborne disease. E & FN Spoon. 194p.

Goni-Urriza M., Capdepuy M., Raymond N., Quentin C. et Caumette P. (1999) : Impact of an urban effluent on the bacterial community structure in the Arga River (Spain), with special reference to culturable Gram-negative rods. *Can. J. Microbiol.* 45 (10) : 826-832.

Gramont M. et Lombard J.P. (1966) : Observations stratigraphiques et tectoniques dans la région du Djebel Djaffa. Publication du service de cartes géologiques, N.S., Alger, Algérie. Bull. No 35:27-49.

Guiraud J.P. (1998) : Microbiologie alimentaire. Dunod, Paris. 651p.

Guiton M. (1994) : Ruissellement et risque majeur. Crue centennale en milieu urbanisé. Etudes de cas ; le Grand-Bornand, Nîmes, Paris et Vaison-la-Romaine. Thèse de Doctorat, l'École Nationale des Ponts et Chaussées, France. 679p.

Hecht Nielsen R. (1990): *Neuro-computing*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA. Solution for a distributed hydrological model and applications, pp. 89-93.

Hemila M. et Kowalski W. (2002) : Synthèse géoélectrique appliquée à la caractérisation des contacts entre nappes de charriage et son apport hydrogéologique dans la Plaine de Tamlouka « Région de Guelma, Est Algérien ». *Can Geotech J* 39:725-737.

Henze M., Van Loosdrecht M.C.M., Ekama G. and Brdjanovic D. (2008): Biological wastewater treatment: principles, modelling and design. *Technol Eng.* 511p.

Hessas N. (2005) : Evaluation cartographique et évolution diachronique par télédétection du risque incendie de forêt. Simulation de la propagation du feu dans le bassin versant du Paillon, Nice, Alpes – Maritimes. Thèse de Doctorat, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier – GRENOBLE I, France, 378 p.

Hornik K. Stinchcombe M. and White H. (1989): Multilayer feed ward networks are universal approximators. *Neural Networks* 2, 359-366.

J.O.R.A. (2011). Journal Officiel de la République Algérienne : Décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

J.O.R.F. (2007). Journal Officiel de la République Française : Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine.

Lachtermacher G., and Fuller J.D. (1994): Backpropagation in hydrological time series forecasting. In : K. W. Hipel, A.I. MacLeod, U.S. Panu & V. P. Singh (eds), *Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering*, Vol. 3, Time series analysis in hydrology and environmental engineering : 229-242.

Lallehem S.et Mania J. (2002): A linear and non-linear rainfall-runoff model using neural network technique: Example in fractured porous media. *Journal of Mathematical and Computer Modelling*. N°1, Vol. 55, N° 615.

Lebres E. (2005) : Cours d'hygiène et de microbiologie des eaux (manuel de travaux pratiques des eaux). Institut Pasteur d'Algérie. 60p.

Liu J., Savenije H.H.G. and Xu J. (2003): Forecast of waterdemand in Weinan City in China using WDF-ANN model. *Phys. and chemist. of the Earth* 28, 219-224.

Louamri A. (2013) : Le bassin-versant de la Seybouse (Algérie orientale): Hydrologie et aménagement des eaux. Thèse de Doctorat, Université de Constantine 1, Algérie. 300p.

Louvrier M. (1976) : Acquisition et traitement des données hydrogéochimiques, exemples d'application. Rapport BRGM 76 SGN 093 AME.

Lugoli F., Leopizzi M.I., Bagordo F., Grassi T., Guido M. and De Donno A. (2011): Widespread microbiological groundwater contamination in the South-eastern Salento (Puglia-Italy). *J. Environ. Monit.*, 2011, 13, 192.

Maier H.R. and Dandy G.C. (1996): The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters. *Water Resour. Res.*, 32(4), 1013-1022.

Maoui A. (2007) : Evolution et origine du chimisme des eaux de l'aquifère superficiel de Zaâfrane : région de la steppe Sud Algéroise .Etude de la variation spatiale de la salinité et ses risques sur les sols et la végétation. Thèse de Doctorat, Université d'Annaba, Algérie. 249p.

Maoui A., Kherici N. et Derradji F. (2010) : Hydrochemistry of an Albian sandstone aquifer in a semi-arid region, Ain oussera, Algeria. *Environ Earth Sci* 60:689-701.

MC Bride G.B. et Rutherford J.C. (1983): Handbook on estimating dissolved oxygen depletion in polluted rivers. *Water and Soil Misc Publ, Wellington* 51:1-69

Mostakim M. (2012) : La mouche d'olive *Bactrocera oleae* principal ravageur de l'olivier: élevage, isolement et caractérisation des bactéries et des levures entomopathogènes contre ce ravageur. Thèse de Doctorat, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès. 109p.

Mostarih R. (2006): Elaboration de phases hydroxydes doubles lamellaires intercalant des anions sulfate: Etude de leur évolution structurale thermique et hygrométrique. Thèse de Doctorat, Université de Blaise Pascal, France. 168p.

Najjar Y. and Ali H. (1998a): On the Use of BPNN in Liquefaction Potential Assessment Tasks. *Artificial Intelligence and Mathematical Methods in Pavement and Geomechanical Systems*, Attoh-Okine (Editor): pp. 55-63.

Najjar Y. and Ali H. (1998b): CPT-Based Liquefaction Potential Assessment : A Neuronet Approach. *ASCE Geotechnical Special Publication No.75*, Dakoulas, P. et. Al. (Editors), (1): pp. 542-553.

Najjar Y. and Zhang X. (2000): Characterizing the 3D Stress-Strain Behavior of sandy Soils: A Neuro-Mechanistic Approach. *ASCE Geotechnical Special Publication No. 96*, Filz, G. and Griffiths, D. (Editors): pp. 43-57.

Références bibliographiques

O.M.S. (2004). Organisation Mondiale de la Santé : Guidelines for drinking water quality. Vol. 1. Recommendation, 3rd edn. World Health Organization, Geneva.

O.M.S. (2011). Organisation Mondiale de la Santé : Guidelines for drinking water quality, 4th edn. World Health Organization, Geneva.

O.N.M. Guelma (2013). Office National de Météorologie : Station de Guelma 2013.

O.N.M. Oum El Bouaghi (2013). Office National de Météorologie : Station d'Oum El Bouaghi 2013.

O.N.S. (2008). Office National des Statistiques : Quelques statistiques et indicateurs sociaux. Données 2008.

Papaoannou A., Mavridou A., Hadjichristodoulou C., Papastergiou P., Pappa O., Dovriki E. and Rigas I. (2010): Application of multivariate statistical methods for groundwater physicochemical and biological quality assessment in the context of public health. Environ Monit Assess (2010) 170:87–97.

Poole N.J. et Hobson P.N. (1979): Water pollution and its prevention. Microbial Ecology. 226-245.

Rejesk F. (2002) : Analyse des eaux ; Aspects Réglementaires Et Techniques. Sceren, Paris. 360p.

Riad, S., Mania, J. et Bouchaou, L., (2006). Variabilité hydroclimatique dans les bassins versants de du Haut Atlas de Marrakech (Maroc). Revue de Sécheresse, N° 3: 443-6.

Rodier J. (2009) : L'Analyse de l'eau. 9^{ème} édition. Dunod, Paris. 1511p.

Romantchouk L. (1974) : Etude hydrologique de l'aménagement hydraulique de l'Oued Kébir-Est et du lac Oubeira. A.N.R.H 74. SHYL 29 rapport inédit pp16-35.

Rumelhart D.E., Hinton G.E. and Williams R.J. (1986): Learning internal representations by error propagation. In Rumelhart D.E., McClelland J. L. and the PDP Research Group, editors, Paralled Distributed Processing. Explorations in the Microstructure of Cognition. Volume 1: Foundations, pages 318-362. The MIT Press, Cambridge, M.A..

Références bibliographiques

Sari Ahmed A. (2002) : Initiation à l'hydrologie de surface. Editions Distribution HOUMA, Alger. 219p.

Seltzer P. (1946) : Le climat de l'Algérie. Institut de Météorologie et de Physique du Globe de l'Université d'Alger, Algérie. 219p.

Servais P., Billen G. et Rego J.V. (1985): Rate of bacterial mortality in aquatic environments. *Appl. Environ. Microbiol.* 49 (6) : 1448-1458.

Thierrin J., Steffen P., Cornaz S., Vualaz F.D., Balderer W., Looser M., Zpbrit J. et Zumstein J. (2001) : Guide pratique de l'échantillonnage des eaux souterraines. Société Suisse d'Hydrogéologie. 57p.

Vila J.M. (1977a.) : Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000 : feuille no 99, Sédrata (1^{ère} éd.), avec notice explicative détaillée (levés de S. Guellal et J.M. Vila). Service de cartes Géologiques et Sonatrach, Division d'hydrocarbure, Direction des explorations, Alger, Algérie.

Vila J.M. (1977b.) : Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000 : feuille no 123, Berriche (Jean Rigal) (1^{ère} éd.), avec notice explicative détaillée (levés de S. Guellal et J.M. Vila). Service de cartes Géologiques et Sonatrach, Division d'hydrocarbure, Direction des explorations, Alger, Algérie.

Vila J.M. (1980) : La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. PhD of Science, University Pierre et Marie Curie, Paris VI.

Vôte C. (1957) : Notice explicative de la carte géologique au 1/50 000 d'Ain Babouche. No 122. Service de cartes Géologiques, Alger, Algérie.

Vôte C. (1967) : Essai de synthèse de l'histoire géologique des environs d'Ain Fakroun, Ain Babouche et les régions limitrophes. Publication du service de cartes géologiques, N.S., Bull. no 36(3), Alger, Algérie.

Weisberg W.G., Barns S.M., Pelletier D.A. and Lane D.J. (1991): 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study. *J. Bacteriol.* 173: 679-703.

White M.E., Glickman L.T., Barnes-Pallesen F.D., Pearson E.G., Montgomery M.E., Armstrong D., Wickenden R.P. and Hickey G. (1986): Discriminant analysis of the clinical incitants for bovine coliform mastitis. *Cornell Veterinarian*, 76 (4), 335-341.

Références bibliographiques

Woese C.R. (1987) : Bacterial evolution. *Microbiol Rev.* 51: 221-71.

Zouaidia H. (2006) : Bilan des incendies de forêts dans l'Est Algérien. Cas de Mila, Constantine, Guelma et Souk Ahras. Mémoire de magister, Université de Constantine, Algérie. 126 p.

Annexes

ANNEXES

Annexe 1 : Composition chimique (en mg/l) des eaux souterraines de l'aquifère de la plaine de Tamlouka (Avril 2012).

Echantillons	T°C	pH	CE	O ₂	Sal	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺	K ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻
F8	33,5	7,18	1338	2,99	1	1113	100,2	15,55	329	249	164	221	3,32	38,94	0,485	0,11	0,533
F9	22,1	7,01	1347	2,55	0,9	1097	84,16	16,03	265	265	197	227	2,89	43,98	0,466	0,111	0,556
F10	16,2	7,22	3220	3,55	1	1155	103	25,2	171	375	193	211	2,89	52,18	0,685	0,108	0,554
F15	16	7,12	1460	2,89	0,8	993	96,19	15,55	244	213	144	222	2,46	71,76	0,536	0,11	0,463
F16	28,5	7,15	1350	3,69	0,9	1098	96,19	14,09	201	320	182	213	2,89	57,12	0,396	0,117	0,735
F17	30,4	7,23	1255	3,61	0,8	933	36,07	20,89	195	265	143	223	3,1	45,44	0,687	0,108	0,455
P1	14,5	7,26	2730	3,61	1,4	1467	112	30,61	140	391	397	285	3,24	88,2	0,39	0,12	0,565
P2	14,5	7,55	2300	3,18	1,3	1371	120,24	20,41	140	355	398	277	2,46	58,69	0,429	0,12	0,554
P3	13,7	7,48	2500	3,12	1,4	1419	114	29,2	165	391	370	281	4,17	55,95	0,477	0,119	0,58
P4	15,1	7,44	1735	3,47	1	1172	88,17	24	165	213	395	227	2,24	53,07	0,578	0,088	0,424
P5	14	7,5	770	3,6	0,8	966	52,1	12,15	97,5	213	310	231	3,96	47,88	0,473	0,1	0,478
P6	15,6	7,33	2370	3,56	1,6	1530	136,27	30,8	85,4	426	465	283	5,67	81,68	0,462	0,087	0,58
P7	13,7	7,18	2220	3,45	1,3	1339	172,34	20,41	116	320	406	245,5	2,89	42,7	0,53	0,092	0,541
P8	13,2	7,25	3720	3,72	2,1	1906	248,49	35,47	203	533	460	330	3,32	65,82	0,462	0,096	0,593
P9	15,3	7,21	2450	3,62	1,6	1595	152,3	25,27	104	391	547	782	2,24	44,87	0,524	0,089	0,567
P10	15,5	7,33	2500	3,44	1,7	1620	160,32	21,38	110	433	494	866	2,46	58,56	0,425	0,088	0,541
P11	14,7	7,32	2560	3,6	1,6	1598	140,28	28,67	189	320	539	640	3,1	71,76	0,37	0,09	0,51
P12	16,5	7,22	2380	3,19	1,6	1506	140,28	23,81	102	391	477	782	3,1	66,76	0,372	0,094	0,512
P13	18,1	7,4	1400	3,3	1,3	1375	132,26	26,24	161	275	431	550	2,46	57,5	0,506	0,129	0,69
S1	15,1	7,21	713	3,63	0,3	581	40,08	12,63	85,4	178	97,8	165	1,82	41,3	0,413	0,091	0,437

**Annexe 2 : Composition chimique (en mg/l) des eaux souterraines de l'aquifère de la plaine
de Tamlouka (Juillet 2012).**

Echantillons	T°C	pH	CE	O ₂	Sal	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺	K ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻
F8	35,3	7,22	1333	1,04	0,9	1032	108,21	18,46	246	249	155	212	3,1	26,31	0,361	0,087	0,588
F9	27,3	7,16	1354	1,98	0,9	1046	108,21	18,46	250	221	197	207	8,93	34,16	0,366	0,088	0,522
F10	18,2	7,36	3170	3,3	1	1154	80,16	20,41	220	213	325	230	6,1	44,52	0,396	0,084	0,54
F15	19,2	7,53	1384	1,75	0,8	922	72,14	15,55	221	198	158	215	7,24	43,54	0,392	0,086	0,71
F16	31,4	7,11	1334	1,48	0,9	1023	120,24	13,12	244	241	173	218	7,24	38,23	0,361	0,093	0,81
F17	32,2	7,25	1246	1,32	0,8	966	88,17	14,09	224	195	178	211	10,34	35,3	0,4	0,084	0,435
P1	16,1	7,02	2740	0,56	1,3	1372	168,33	22,35	177	324	372	228	6,2	47,48	0,368	0,079	0,54
P2	20,6	7,64	2290	0,85	1,3	1334	132,26	21,87	159	323	366	265	7,24	47,26	0,39	0,089	0,58
P3	16,8	7,9	2460	0,92	1,3	1382	120,24	21,87	171	367	333	282	6,2	58,07	0,421	0,079	0,428
P4	17	7,75	1970	1,54	1	1071	100,2	21,87	155	204	301	223	3,62	47,48	0,382	0,08	0,59
P5	17,8	7,84	850	0,97	1	1006	60,12	10,69	128	226	305	235	4,12	39,42	0,4	0,085	0,415
P6	17,1	7,34	2420	2,16	1,3	1342	108,21	29,64	140	397	340	264	7,24	56,88	0,386	0,087	0,489
P7	22,9	7,39	2480	2,18	1,3	1393	172,34	26,24	140	334	402	251	7,24	48,86	0,359	0,079	0,735
P8	22,8	7,6	4210	2,32	2,3	2196	340,68	38,88	195	496	687	341	8,93	63,34	0,415	0,077	1,09
P9	17,6	7,15	2420	2,24	1,6	1514	120,24	29,16	146	343	453	336	6,2	59,05	0,384	0,094	0,475
P10	18	7,54	2510	1,74	1,6	1556	144,28	28,67	177	387	408	334	7,24	51,6	0,41	0,105	0,422
P11	18	7,14	2550	1,06	1,4	1457	120,24	33,04	154	360	413	293	3,1	60,82	0,392	0,11	0,411
P12	19,2	7,54	2510	1,74	1,6	1541	164,32	25,27	177	395	433	275	3,62	47,26	0,421	0,109	0,487
P13	24,3	7,51	2520	0,93	1,3	1349	80,16	32,56	153	295	424	274	3,1	65,91	0,44	0,169	0,559
S1	21,1	7,6	711	0,86	0,4	636	60,12	10,69	153	155	79,9	125	1,03	34,11	0,4	0,128	0,347

**Annexe 3 : Composition chimique (en mg/l) des eaux souterraines de l'aquifère de la plaine
de Tamlouka (Novembre 2012).**

Echantillons	T°C	pH	CE	O ₂	Sal	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺	K ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻
F8	33,7	6,82	1324	2,38	0,5	659	104,2	11,66	287	344	150	256,77	3,4	22,44	0,287	0,047	0,573
F9	24,4	6,9	1359	3,05	0,5	675	112,22	16,52	275	249	163	223	8,7	29,92	0,298	0,046	0,599
F10	16,9	7,06	3290	3,71	1,6	1579	72,14	11,17	232	324	266	287	5,64	35,7	0,295	0,045	0,443
F15	17,7	7,09	1350	2,98	0,5	673	84,16	37,9	232	287	150	205	7,11	34,9	0,269	0,054	0,482
F16	30,7	6,95	1325	2,71	0,5	655	100,2	9,23	256	270	161	213	7,11	32,56	0,3	0,042	0,486
F17	31	7,28	1244	3,05	0,4	616	100,2	9,72	250	188	195	210	9,8	36,1	0,295	0,048	0,897
P1	16,1	7,25	2750	2,43	1,3	1357	120,24	14,58	177	378	320	310	6,3	45,31	0,429	0,049	0,455
P2	16,1	7,21	2290	3,21	1	1132	108,21	10,2	153	395	224	260	7,08	33,53	0,345	0,051	0,586
P3	15,9	7,23	2470	3,24	1,2	1235	152,3	11,66	183	378	310	272	6,4	34,5	0,324	0,05	0,93
P4	17,8	7,36	1802	3,59	0,8	903	96,19	14,09	183	242	209	216	3,56	39,82	0,683	0,06	0,534
P5	18,5	7,29	532	3,22	0	293	48,09	5,34	91,5	225	286	237	3,87	48,24	0,287	0,062	0,689
P6	17,1	7,16	2300	3,72	1	1139	148,29	17,01	183	360	275	286	6,97	32,73	0,345	0,05	0,542
P7	15,6	7,1	2240	3,48	1	1112	160,32	18,46	128	342	371	255	6,88	36,45	0,31	0,057	0,972
P8	18	7,23	4180	3,74	2,1	1923	296,59	16,03	146	542	513	344	8,2	34,9	0,471	0,048	1,18
P9	16,7	7,2	2440	3,61	1,1	1210	136,27	11,66	153	324	425	319	6,25	35,7	0,563	0,044	0,423
P10	16,5	7,35	2720	3,1	1,2	1251	156,31	14,09	165	424	361	362	7,4	34,33	0,431	0,048	0,415
P11	16,8	7,22	2570	2,85	1,2	1269	168,33	17,49	153	378	347	236	3,5	34,9	0,316	0,047	0,475
P12	16,4	7,08	2540	3,3	1,2	1256	192,38	17,01	171	324	478	282	3,71	48,46	0,452	0,048	0,477
P13	16,9	7,21	2480	2,77	1,1	1229	148,29	19,92	134	325	389	258	3,05	37,65	0,3	0,046	0,498
S1	17,6	7,26	713	2,88	0,2	408	96,19	10,2	250	178	85,3	112	1,75	36,45	0,347	0,055	0,436

Annexe 4 : Composition chimique (en mg/l) des eaux souterraines de l'aquifère de la plaine de Tamlouka (Février 2013).

Echantillons	T (°C)	pH	CE	O ₂	Sal	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻	SiO ₂ ²⁺	F ⁻
F8	23,9	7,02	1334	3,72	0,5	1192	148	12,63	234	6,89	296	316	151	25,23	0,298	0,06	0,417	0,34	0,65
F9	20,7	6,9	1373	4,03	0,5	1098	132	16,52	209	6,89	279	231	261	32,68	0,293	0,06	0,391	0,32	0,6
F10	15,7	7,29	3230	4,12	1,6	1305	104	20,41	271	7,02	222	391	246	41,77	0,31	0,06	0,378	0,34	1,31
F15	16	7,14	1372	4,21	0,5	1077	104	25,75	223	6,51	238	290	144	43,94	0,295	0,06	0,391	0,3	0,61
F16	31	7,06	1323	3,95	0,5	1148	140	16,52	217	7,53	299	269	160	36,12	0,324	0,06	0,417	0,25	0,76
F17	29,6	7,37	1252	4,69	0,5	1064	116	26,24	198	7,66	287	203	188	35,7	0,388	0,06	0,417	0,55	0,47
P1	14	7,17	2750	4,31	1,3	1404	127	26,24	260	7,46	214	331	381	55,64	0,326	0,06	0,443	0,32	0,49
P2	14,7	7,64	2480	5,57	1,1	1482	164	20,41	248	7,34	207	366	395	71,01	0,405	0,06	0,492	0,32	0,74
P3	14,4	7,5	2500	5,57	1,1	1401	156	21,87	248	7,02	207	360	333	65,51	0,374	0,06	0,606	0,23	0,43
P4	15,7	7,54	1914	5,64	0,8	1162	148	19,92	207	6,76	188	224	278	38,23	0,322	0,06	0,469	0,34	0,67
P5	15,2	7,55	1125	5,47	0,3	1090	92,2	16,52	214	6,95	177	249	295	38,62	0,33	0,07	0,309	0,25	0,59
P6	13,8	7,48	2320	5,29	1	1464	184	22,84	223	7,21	103	424	459	38,45	0,394	0,08	0,521	0,32	0,56
P7	12,8	7,25	2340	4,79	1	1383	216	21,38	217	7,14	132	313	423	45,31	5,51	0,34	0,84	0,44	0,59
P8	12,8	7,2	4540	5,17	2,4	2315	381	15,06	337	7,4	220	542	762	48,64	0,31	0,06	0,755	0,34	0,84
P9	15,4	7,28	2430	4,98	1,1	1559	204	21,38	237	7,08	117	385	534	51,21	0,3	0,06	0,378	0,27	0,43
P10	15,1	7,55	2550	4,47	1,2	1513	188	21,87	236	7,27	115	441	443	58,87	0,258	0,06	0,482	0,25	0,47
P11	17	7,43	2550	4,65	1,2	1469	184	25,27	223	8,1	201	324	452	48,46	0,265	0,06	0,481	0,34	0,52
P12	14,7	7,55	2530	4,86	1,2	1493	208	23,32	217	6,7	214	307	462	52,58	0,25	0,06	0,456	0,34	0,49
P13	13,3	7,68	2510	4,61	1,1	1605	204	26,73	228	7,4	207	395	477	57,27	0,275	0,06	0,43	0,27	0,83
S1	12	7,24	714	4,91	0,1	668	80,2	25,75	111	2,24	67,1	255	86,4	38,05	0,215	0,07	0,417	0,49	1,01

**Annexe 5 : Composition chimique (en mg/l) des eaux souterraines de l'aquifère de la plaine
de Tamlouka (Mai 2013).**

Echantillons	T (°C)	pH	CE	O ₂	Sal	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻	SiO ₂ ²⁺	F ⁻
F8	34,3	7,21	1338	1,43	0,5	1068	120,24	17,01	209	3,06	336	213	146	22	0,231	0,182	0,521	0,36	1,28
F9	21	6,86	1368	1,37	0,5	1134	120,24	20,41	192	2,23	293	295	180	29	0,462	0,065	0,429	0,55	0,46
F10	15,7	7,11	3280	1,42	1,6	1229	100,2	24,3	265	1,53	175	342	272	46,2	0,264	0,078	0,337	0,4	1,4
F15	16,1	7,1	1402	1,56	0,5	1030	104,2	25,27	196,92	2,8	244	235	148	72,16	0,396	0,117	0,644	0,32	0,7
F16	30,9	7,15	1391	1,47	0,5	1061	116,23	14,09	192	2,1	205	342	156	30,36	0,33	0,078	0,828	0,36	1,11
F17	31,2	7,04	1245	1,48	0,4	1065	120,24	19,92	195	2,55	229	278	192	25,96	0,561	0,117	0,614	0,38	0,61
P1	13	7,38	2750	1,75	1,3	1542	184,36	26,24	247,09	3	238	360	369	112,64	0,33	0,143	0,399	0,34	0,69
P2	11,1	7,46	2500	1,5	1,1	1455	176,35	22,35	227,98	2,8	207	395	311	110	0,363	0,117	0,337	0,23	0,61
P3	11,2	7,34	2470	1,33	1,1	1498	172,34	21,87	239	3,19	201	395	352	111,32	0,297	0,091	0,644	0,3	0,58
P4	13,7	7,5	1998	1,72	0,8	1176	144,28	16,03	228	2,9	171	225	310	77	0,198	0,078	0,399	0,27	0,67
P5	13,7	7,51	2006	1,81	0,9	1099	148,29	13,6	202,73	2,96	123	225	295	86,68	0,297	0,169	0,429	0,32	0,4
P6	15,4	7,32	2310	1,88	1	1495	176,35	20,89	246	3,03	109	395	438	104,72	0,297	0,195	0,399	0,34	0,67
P7	13,1	7,25	2260	1,53	1	1463	180,36	25,27	222	2,77	232	355	403	36,6	2,343	5,018	1,81	0,44	0,95
P8	11,5	7,3	4610	1,76	2,3	2235	320,64	23,32	315	3,06	207	524	776	63,36	0,264	0,221	0,951	0,34	0,59
P9	14,1	7,16	2410	1,48	1,1	1506	180,36	25,75	225	2,77	183	342	446	98,56	0,33	0,143	0,368	0,74	0,4
P10	15,1	7,29	2630	1,5	1,2	1620	200,4	21,87	263	3,22	138	424	486	81,4	0,231	0,091	0,337	0,47	0,67
P11	15,5	7,37	2550	1,51	1,2	1524	188,37	24,3	229	2,9	195	342	448	92,4	0,198	0,169	0,491	0,34	0,3
P12	14	7,36	2500	1,67	1,2	1276	148,29	22,84	223	3,35	114	278	420	63,8	0,99	0,104	0,46	0,36	0,63
P13	12,3	7,5	2500	1,58	1,1	1307	156,31	24,78	225	2,9	165	242	397	92,4	0,198	0,117	0,552	0,42	0,93
S1	11,3	7,17	689	1,56	0,1	591	44,08	24,3	115	3,29	105	167	89,5	40,92	0,297	0,104	0,429	0,3	0,95

Annexe 6 : Analyse descriptive des bactéries des eaux souterraines (Avril 2012).

Echantillons	GT (22 °C)	GT (37 °C)	CT	CF	SF	ASR
F8	1	3	-	-	1	-
F9	-	-	9	5	9	-
F10	4	2	1	1	7	-
F15	4	12	3	1	1	-
F16	1	3	7	1	22	-
F17	1	1	1	1	5	-
P1	31	23	28	9	17	14
P2	17	27	54	17	28	2
P3	93	118	35	11	18	-
P4	35	57	54	28	11	17
P5	275	341	92	21	35	29
P6	7	16	160	35	7	-
P7	181	309	54	24	21	2
P8	32	28	92	28	14	-
P9	4	4	240	35	21	-
P10	3	6	240	160	35	-
P11	18	7	240	160	12	-
P12	38	31	54	13	3	-
P13	11	3	18	3	28	-
S1	-	1	4	1	-	-

Annexe 7 : Analyse descriptive des bactéries des eaux souterraines (Juillet 2012).

Echantillons	GT (22 °C)	GT (37 °C)	CT	CF	SF	ASR
F8	1	2	-	-	-	-
F9	1	0	9	3	3	-
F10	2	1	3	1	1	-
F15	3	7	5	1	-	-
F16	1	0	1	-	-	-
F17	2	0	5	-	1	-
P1	12	17	35	21	18	-
P2	0	2	160	6	21	1
P3	456	740	43	1	9	3
P4	4	3	240	21	35	3
P5	312	432	160	14	43	3
P6	2	1	240	43	8	-
P7	48	440	240	35	5	-
P8	13	11	240	24	21	1
P9	6	11	92	24	11	-
P10	17	21	160	28	21	-
P11	9	14	92	22	8	-
P12	47	42	160	35	12	-
P13	19	32	35	10	28	-
S1	0	0	3	1	6	-

Annexe 8 : Analyse descriptive des bactéries des eaux souterraines (Novembre 2012).

Echantillons	GT (22 °C)	GT (37 °C)	CT	CF	SF	ASR
F8	-	3	-	-	-	-
F9	-	1	22	4	-	-
F10	1	-	-	-	-	-
F15	1	9	8	1	-	-
F16	-	-	-	-	-	-
F17	1	-	-	-	-	-
P1	40	28	43	28	8	-
P2	12	23	92	14	28	3
P3	223	285	54	8	13	7
P4	92	176	160	35	24	9
P5	321	361	160	17	28	-
P6	7	13	240	54	5	-
P7	103	244	160	24	35	3
P8	78	52	240	35	14	32
P9	-	-	160	18	9	-
P10	17	15	240	28	43	-
P11	10	22	160	5	17	-
P12	61	75	92	18	7	12
P13	5	28	54	7	35	-
S1	2	-	3	1	-	-

Annexe 9 : Analyse descriptive des bactéries des eaux souterraines (Février 2013).

Echantillons	GT (22 °C)	GT (37 °C)	CT	CF	SF	ASR
F8	3	5	-	-	-	-
F9	2	5	17	8	5	-
F10	-	2	3	1	-	-
F15	1	7	5	-	-	-
F16	5	9	9	-	-	-
F17	2	6	3	1	7	-
P1	32	17	35	3	12	21
P2	39	78	54	10	35	-
P3	103	168	35	3	35	-
P4	11	252	3	1	-	21
P5	309	208	35	1	54	-
P6	-	21	3	3	-	1
P7	332	344	43	3	54	-
P8	114	68	21	7	11	-
P9	5	7	240	43	21	-
P10	12	21	160	92	24	-
P11	15	9	92	11	9	-
P12	59	84	17	5	4	-
P13	11	17	21	8	43	-
S1	1	-	5	1	-	1

Annexe 10 : Table NPP.

1 X 50 ml	5 X 10 ml	5 X 1 ml	Nombre caractéristique	Limites de confiance	
				Inférieure	Supérieure
0	0	0	<1		
0	0	1	1	<0,5	4
0	0	2	2	<0,5	6
0	1	0	1	<0,5	4
0	1	1	2	<0,5	6
0	1	2	3	<0,5	8
0	2	0	2	<0,5	6
0	2	1	3	<0,5	8
0	2	2	4	<0,5	11
0	3	0	3	<0,5	8
0	3	1	5	<0,5	13
0	4	0	5	<0,5	13
1	0	0	1	<0,5	4
1	0	1	3	<0,5	8
1	0	2	4	<0,5	11
1	0	3	6	<0,5	15
1	1	0	3	<0,5	8
1	1	1	5	<0,5	13
1	1	2	7	1	17
1	1	3	9	2	21
1	2	0	5	<0,5	13
1	2	1	7	1	17
1	2	2	10	3	23
1	2	3	12	3	28
1	3	0	8	2	19
1	3	1	11	3	26
1	3	2	14	4	34
1	3	3	18	5	53
1	3	4	21	6	66
1	4	0	13	4	31
1	4	1	17	5	47
1	4	2	22	7	59
1	4	3	28	9	85
1	4	4	35	12	100
1	4	5	43	15	120
1	5	0	24	8	75
1	5	1	35	12	100
1	5	2	54	18	140
1	5	3	92	27	220
1	5	4	160	39	450
1	5	5	>240		