

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

THESE de DOCTORAT D'ETAT

**IMPACT DE LA POLLUTION SUR LES RESSOURCES EN EAU
SUPERFICIELLES ET SOUTERRAINES DE LA REGION DE
GUELMA**

Option : hydrogéologie

Présenté par

Tahar NOUAR

Directeur de thèse : D. MESSADI PROFESSEUR UNIVESITE DE ANNABA

Soutenu devant le jury

**L. Djabri Président Professeur Université de Annaba
A. GHEID Examineur Professeur C.u de Souk ahras
A. HANi A Examineur MC Université de Annaba
R. Mansouri Examineur MC Université de Guelma**

2007

A mon défunt père

“ L'eau est la chose la plus nécessaire à l'entretien de la vie, mais elle peut être corrompue... . Elle a donc besoin que la loi devienne à son secours.

Voilà la loi que je propose : quiconque sera convaincu d'avoir corrompu l'eau d'autrui, eau de source ou eau de pluie ,ou de l'avoir détournée, outre la réparation du dommage, sera tenue de nettoyer la source , ou le réservoir conformément aux règles prescrites par les interprètes.”

les lois, livres 8, Platon

AVANT PROPOS

Au terme de ce travail, il m'est agréable d'exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont permis de le réaliser.

Mes vifs remerciements et profonde reconnaissance à Monsieur le professeur Djelloul MESSADI, Directeur du laboratoire de pollution et protection industrielle pour son encadrement efficace et son soutien sans relâche tout au long de la réalisation de ce travail. Je le remercie pour n'avoir jamais mesuré son temps au laboratoire et pour la correction du manuscrit. Son grand savoir m'a été d'une grande aide dans mon travail de recherche. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance et de mon respect le plus sincère.

Je remercie Monsieur le Professeur Larbi Djabri qui m'a fait honneur de présider le jury.

J'exprime ma gratitude à Messieurs Azeddine Hani, Rachid Mansouri et Ahcène Gheid en acceptant de faire partie de ce jury.

Je remercie enfin tous les membres de ma famille en particulier ma mère, ma femme et mes filles qui m'ont encouragées durant la période du travail.

Enfin toute ma reconnaissance à Monsieur Mohamed Guenfoud, directeur du laboratoire (LGCH, université de Guelma) pour le soutien qu'il m'a apporté tout le long du travail.

TABLE DES MATIERES

Introduction	1
Situation géographique	2 -3
But de l'étude	2 -3
CHAPITRE 1 : GEOLOGIE	
1.1 Introduction	4
1.2 Geologie	4
1.2.1 trias	4-5
1.2.2 Néritique	5-7
1.2.3 Les unités telliennes	7-10
1.2.4 Unité ultratellienne	11
1.2.5 Nappe epi(ultra) tellienne	12.-13
1.2.6 Numidien	13
1.2.7 Post nappe	13
1.2.7.1 Quaternaire ancien	14
1.2.7.2 Quaternaire récent	14
1.2.8 Tectonique et paléogéographie	15-16
1.3 Géomorphologie	16-17
CHAPITRE II : HYDROCLIMATOLOGIE	
2.1 Introduction	18
2.2 Etude des précipitations	18
2.2.1 Introduction	18
2.2.2 Comblement des lacunes	19-22
2.2.4 Homogénéisation des données	22
2.2.4.1 Test de Wald- Wolfonitz	23
2.2.4.2 Test de tendance	24-25
2.3 Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale	25
2.3.1 Vérification graphique	25-29
2.3.1.1 Régression linéaire	29-30
2.3.2 Test χ^2	30-31
2.4 Précipitations annuelles	31-32
2.5 Détermination de la lame d'eau précipitée	32
2.5 .1 Méthode de la moyenne arithmétique	32-33
2.6 Précipitation mensuelle	33-34
2.7 Variabilité des précipitations annuelles	35-36
2.7.1 Coefficient pluviométrique	37
2.8 Température	38
2.8.1 Régime climatique	39
2.8.1.1 Indice de De Martone	39
2.8.1.2 Diagramme pluviométrique	40-42
2.9 Détermination de L' ETP	42
2.9.1 Détermination potentielle	43
2.9.2 Bilan de Thorntwhaite	43-44
2.9.3 Formule de Turc	44-47
2.9.4 Bilan hydrologique	44-47

2.10 Ruissellement et bilan général	47-50
2.11 Conclusion	50-51

CHAPITRE III : HYDROGEOLOGIE

3.1 Les grands ensembles Hydrogéologiques	52
3.2 Cas de la nappe de Guelma	52
3.2.1 Géométrie de l'aquifère	52
3.2.2.1 introduction	52-54
3.2.2.2 Information fournie par les sondages électriques	54-57
3.2.3 essais de corrélation géologie-géophysique	58-59
3.2.4 Synthèse de correspondance résistivités- lithologie	60
3.2.5 Conclusion	60-65
3.3 Piézométrie	66
3.3.1 Introduction	66
3.3.2 Conditions aux limites	67
3.3.2.1 Limites externes	67
3.3.2.2 Limites internes	67
3.3.3 Inventaire des points d'eau	68
3.3.4 Hydrodynamique	68
3.3.4.1 Interprétation	69
3.3.4.2 Transmissivités et perméabilités	69-70
3.3.4.3 Epaisseurs mouillées	71-74
3.4 Etude de la vulnérabilité de l'aquifère	74
3.4.1 Méthode DRASTIC	74-75
3.4.2 Etablissement des cartes de vulnérabilités	76-81
3.4.3 Interprétation des résultats	82
3.4.3.1 Carte DRASTIC générale	82-83
3.4.3.2 Carte DRASTIC pesticides	83-84
3.5 Sources	87
3.5.1 Etude la fissuration des massifs Kef Rih- Bardou	87
3.5.2 Hydrodynamique des sources	87-91
3.5.3 Conclusion	91-92

Chapitre IV : Hydrochimie

4.1 Faciès hydrochimiques	93-97
4.2 Analyse en composantes principales des forages et puits	98
4.2.1 caractéristiques physico-chimiques	98
4.2.2 caractéristiques chimiques	99
4.2.3 interprétation de principaux facteurs	99
4.2.3.1 Etude de la contribution des observations au facteur I	100
4.2.3.2 Etude de la contribution des observations au facteur II	100
4.2.3.3 Etude de la contribution des observations au facteur III	101
4.2.3.4 Synthèse des résultats	102-107
4.2.3.5 Conclusion	108
4.2.4 ACP des sources	108
4.2.4.1 Caractéristiques physiques	108
4.2.4.2 Caractéristiques chimiques	109-111
4.2.4.3 Plans des individus	109-111
4.3 Indice de saturation	112
4.3.1 Théorie de l'indice de saturation	113

4.3.2 Application aux eaux du bassin de Guelma	113-115
4.4 pollution superficielle du bassin de Guelma	116
4.4.1 Introduction	116-117
4.4.2 Echantillonnage	117-118
4.4.3 Résultats et discussion	118
4.4.4.1 paramètres abiotiques	118-121
4.4.4.2 Métaux lourds	121-123
4.4.4.3 Bactériologie	123-124
4.4.5 Conclusion	124-125
4.5 Pollution des eaux souterraines	125
4.5.1 Contamination par les formes azotées et orthophosphates	125-131
4.5.2 Contamination par les métaux lourds	131-136
4.5.3 Bactériologie des eaux souterraines	136
4.5.4 Conclusion	137-138
4.6 caractéristiques isotopique des eaux souterraines	138
4.6.1 Théorie	138
4.6.2 Résultats et applications isotopiques aux sources	139
4.6.2.1 Interprétation des teneurs en tritium	140
4.7 Usage de l'eau	140
4.7.1 Usage agricole	140
4.7.1.1 Classification de Riverside	140-142
4.7.1.2 Classification de Wilcox	143-146
4.7.2 Usage industriel	146
4.7.2.1 Equilibre calco-carbonique	146-147
4.7.3 Usage à l'AEP	148
4.7.4 Conclusion	149
Conclusions générales	150
Références bibliographiques	151-154
Annexes	155-165

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Carte de situation de la zone d'étude

Figure 2 : Carte géologique de la région

Figure 3a : Coupe de la série tellienne de djebel Bardou

Figure 3b : Coupe des différentes unités telliennes entre Ben Smih et djebel Bardou

Figure 4 : Variation des précipitations annuelles ; station de Guelma

Figure 5 : Variation des précipitations annuelles ; station d'Héliopolis

Figure 6 : Variation des précipitations annuelles ; station de Medjez Amar

Figure 7 : Variation des précipitations annuelles ; station de Ain Larbi

Figure 8 : Ajustement à une loi normale ; station de Medjez Amar

Figure 9 : Ajustement à une loi normale; station de Ain Larbi

Figure 10 : Ajustement à une loi normale ; station Guelma

Figure 11 : Ajustement à une loi normale; station d'Héliopolis

Figure 11 a : Courbe de régression

Figure 12 : Diagramme pluviométrique; station Guelma

Figure 13 : Diagramme pluviométrique; station d'Héliopolis

Figure 14 : Diagramme pluviométrique; station de Medjez amar

Figure 15 : Diagramme pluviométrique; station de Ain Larbi

Figure 16 : Carte d'implantation des points d'eau au niveau du sous bassin de Guelma

Figure 17 : Carte d'implantation des sondages électriques

Figure 18 : Courbe de sondage électrique type I

Figure 19 : Courbe de sondage électrique type II

Figure 20 : Courbe de sondage électrique type III

Figure 21 : Coupe montrant un seuil marneux à gypse et relation alluvions-travertins

Figure 22 : Liaison entre vallée actuelle et vallée ancienne par l'intermédiaire du quaternaire

Figure 23 : liaison entre vallée actuelle et ancienne

Figure 24 : carte piézométrique août 2003

Figure 25 : carte des conditions aux limites

Figure 26 : Carte d'implantation des points d'eau au niveau du sous bassin de Guelma

Figure 27 : Courbe de remontée

Figure 28 : carte des transmissivités

Figure 29 : Carte des perméabilités

Figure 30 : Carte des épaisseurs mouillées

Figure 31 : Carte du substratum

Figure 32a : Carte de l'indice DRASTIC relatif à la profondeur

Figure 32b : Carte de l'indice DRASTIC relatif à la recharge

Figure 32c : Carte de l'indice DRASTIC relatif aux matériaux de l'aquifère

Figure 32d : Carte de l'indice DRASTIC relatif à la nature du sol

Figure 32e : Carte de l'indice DRASTIC relatif à la pente

Figure 32f : Carte de l'indice DRASTIC relatif à la zone vadose

Figure 32g : Carte de l'indice DRASTIC relatif à la perméabilité

Figure 33a : Carte de vulnérabilité DRASTIC

Figure 33b : Carte de vulnérabilité DRASTIC relative aux pesticides

Figure 34 : Carte d'implantation des sources hors du sous bassin de Guelma

Figure 35 : Courbe de récession

Figure 36 : Diagramme de Piper des forages et puits, période de hautes eaux

Figure 37 : Diagramme de Piper des forages et puits, période de basses eaux

Figure 38 Diagramme de Piper des sources, période de hautes eaux

Figure 39 Diagramme de Piper, période de basses eaux

Figure 40a : ACP : cercle des variables (Plan I-II)

Figure 40b : ACP : cercle des variables (Plan I-III)

Figure 41a : ACP : cercle des individus (Plan I-II)

Figure 41b : ACP : cercle des individus(Plan I-III)

Figure 42 : Représentation cartographique du facteur « minéralisation » selon les coordonnées sur l'axe I

Figure 43 : Représentation cartographique du facteur « origine de la minéralisation » selon les coordonnées sur l'axe II

Figure 44 : Représentation cartographique du facteur « milieu » selon les coordonnées sur l'axe III

Figure 45 : Résultats de l'ACP des variables des sources

Figure 46 : Résultats de l'ACP des individus des sources

Figure 47 : Situation géographique des sites de prélèvement

Figure 48 : Evolution des teneurs moyennes en O₂ dissous

Figure 49 : Evolution des CE

Figure 50 : Evolution de la salinité

Figure 51 : Evolution des concentrations moyennes de la turbidité

Figure 52 : Evolution spatiale de la dureté moyenne

Figure 53 : Evolution des teneurs en PO₄³⁻

Figure 54 : Evolution des teneurs moyenne en NO₃⁻

Figure 55 : Evolution des teneurs moyennes en Cd

Figure 56 : Evolution des teneurs moyennes en Pb

Figure 57 : Evolution des teneurs moyennes en Cr

Figure 58 : Evolution des streptocoques

Figure 59 : Evolution spatio-temporelle des NO_3^- , cas de la nappe libre

Figure 60 : Evolution spatio-temporelle des NO_2^- , cas de la nappe libre

Figure 61 : Evolution spatio-temporelle de NH_4^+ , cas de la nappe libre

Figure 62 : Evolution spatio-temporelle des NO_3^- , cas de la nappe semi-captive

Figure 63 : Evolution spatio-temporelle des NO_2^- cas de la nappe semi-captive

Figure 64 : Evolution spatio-temporelle de NH_4^+ , cas de la nappe semi-captive

Figure 64a: Evolution spatio-temporelle des teneurs en PO_4^{3-}

Figure 65 : Evolution spatio-temporelle des NO_3^- des sources issues des calcaires

Figure 65 : Evolution spatio-temporelle des NO_3^- des sources situées au centre et flanc Sud –Est

Figure 65a : Carte des nitrates, période de basses eaux

Figure 65b : Carte des nitrates, période de hautes eaux

Figure 66 : Diagramme de Riverside

Figure 67 : Diagramme de Wilcox

Figure 68a : carte de salinité période de hautes eaux

Figure 68b : carte de salinité période de basses eaux

Liste des tableaux

- Tableau 1 : Situation des stations pluviométrique
- Tableau 2 : Volume de la statistique du test wold-wolfonitz
- Tableau 3 : Test statistique
- Tableau 4 : Participation fréquentielle
- Tableau 5 : Résultats du test χ^2
- Tableau 6 : Coefficient de variation mensuelle.
- Tableau 7 : Hauteur de précipitations mensuelles moyennes et erreur sur la moyenne
- Tableau 8 : Précipitations mensuelles
- Tableau 9 : Précipitations saisonnières
- Tableau 10 : Ecart à la moyenne des précipitations et valeurs du CV
- Tableau 11 : Valeur du coefficient pluviométrique annuelle
- Tableau 12 : Températures mensuelles
- Tableau 13 : Indice mensuel d'aridité
- Tableau 14 : Valeur de l' ETR
- Tableau 15 : Bilan hydrologique à la station de Guelma
- Tableau 16 : Bilan hydrologique à la station d'Héliopolis
- Tableau 17 : Bilan hydrologique à la station de Ain Larbi
- Tableau 18 : Bilan hydrologique à la station de Medjez Ammar
- Tableau 19 : Valeurs de correction de C des lames d'eau ruisselée.
- Tableau 20 : Etalonnage entre géophysique et géologie
- Tableau 21 : Valeurs des résistivités
- Tableau 22 : valeurs des essai par pompage
- Tableau 23 : Evaluation des paramètres DRASTIC
- Tableau 24a : Paramètres DRASTIC et leurs poids respectifs
- Tableau 24b : Cotation pour la recharge et la profondeur
- Tableau 25 : Paramètres moyens de la récession
- Tableau 26a :
- Tableau 26b : Matrice de corrélation
- Tableau 27 : Indice de saturation et PCO_2 des forages et puits
- Tableau 28 : Indice de saturation et PCO_2 des sources
- Tableau 29 : Norme de l'O.M.S

Tableau30 : Teneurs moyennes en métaux lourds

Tableau31 : Analyse bactériologique

Tableau32 : valeurs des concentrations en tritium

Tableau33 : Taux de sodium, SAR, Cl^- et CE

Tableau34 : Valeur du ΔpH

LISTES DES ANNEXES

Annexe 1 : coupe interprétative synthétique à partir des sondages électrique

Annexe 2 et 3 : Reconstitution lithologique suivant les données de forages et sondages électriques

INTRODUCTION

I SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le bassin de Guelma appartient à la moyenne Seybouse dans sa partie Nord, et à la haute Seybouse dans sa partie Sud. Il est d'extension Nord-Sud d'une quarantaine de kilomètres de long et d'une vingtaine de kilomètres de large, pour une superficie de 514 km² (figure 1). Ce bassin est limité :

Au Nord par les monts de Houara et Béni Ahmed.

Au Sud par la Mahouna, Ain Larbi et Sédrata.

Au Sud-Ouest par les monts de Sellaouas.

A l'est par les monts de Nador N'bails.

A l'Ouest par le mont Débagh.

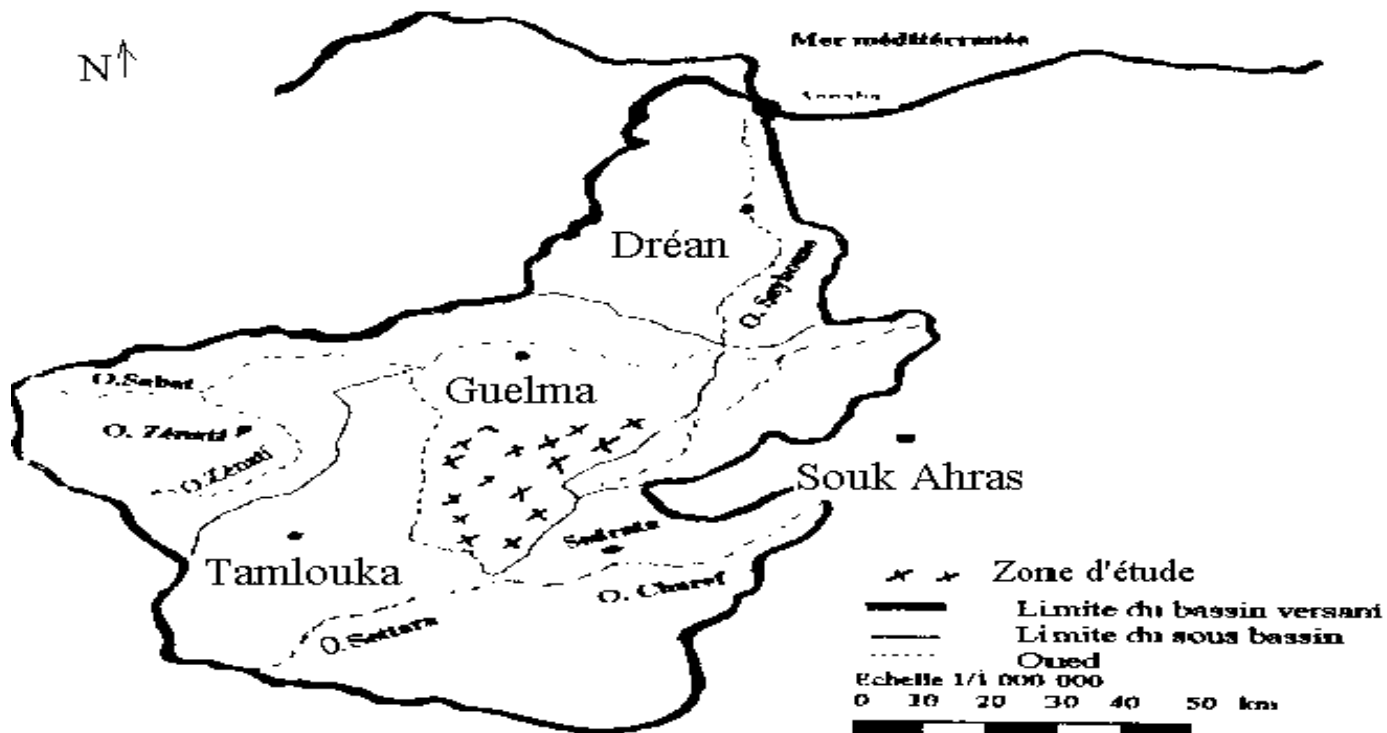


Figure 1 : Situation de la zone d'étude

II BUT DE L'ETUDE

Depuis 1949 à l'actuel, les ressources en eau de la région de Guelma proviennent de la nappe coincée dans les sédiments alluvionnés par la Seybouse et ses affluents, ainsi que par différentes sources éparpillées à travers le bassin de cette région.

Le développement économique et l'accroissement de la population se traduisent par un besoin accru dépassant les potentialités actuelles de la nappe, ce qui impose de capter les sources de la région pour, à la limite, satisfaire la demande des populations qui résident dans les environs de ces points d'eau.

La nappe est localisée dans une zone agricole où l'utilisation massive des engrais, ainsi que les rejets des eaux usées domestiques et industrielles peuvent influencer le chimisme de l'eau en profondeur, par infiltration. Par ailleurs les habitants de la zone péri-urbaine du sud-ouest de la ville de Guelma non assainie, rejettent leurs eaux usées directement dans le milieu récepteur ce qui, à la longue, se traduira par la contamination inévitable de ces ressources. Par contre au Sud-Est, les sources issues des formations calcaires crétacés et éocènes, semblent être protégées de quelque atteinte de pollution, du fait de leur éloignement de toute source de contamination.

Notre mémoire sera subdivisé en plusieurs parties:

- Dans une partie « géologique », nous décrirons les différentes formations géologiques composant le bassin, et la tectonique cassante surtout au sud.

- Dans une deuxième, nous traiterons de l'hydrologie de la région en calculant les paramètres du bilan hydrologique.

- La troisième partie sera axée sur l'acquisition des informations hydrogéologiques (hydrodynamique, écoulement souterrain et courbe de récession des sources...

- Enfin dans la quatrième partie nous nous intéresserons à l'hydrochimie des eaux de la nappe et des sources. Un suivi étalé sur une période d'observation des cycles hydrologiques nous permettra d'en connaître le fonctionnement hydrochimique et l'influence des facteurs hydroclimatiques, géomorphologiques ainsi que l'intervention de l'activité humaine.

CHAPITRE 1: GEOLOGIE

I.1 INTRODUCTION

La région de Guelma fait partie de l'ensemble géologique du Tell d'Algérie Nord orientale. Cet ensemble qui s'étend de la région de Constantine à la frontière Algéro-Tunisienne a une longueur d'environ 200 kilomètres. Sa structure, trop complexe, est dû essentiellement à des mouvements tectoniques tertiaires, surtout miocènes.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à la région de Guelma. On peut citer Draste de La Chavanne (1910), J. M. Vila. (1980) et A. Chouabi (1987).

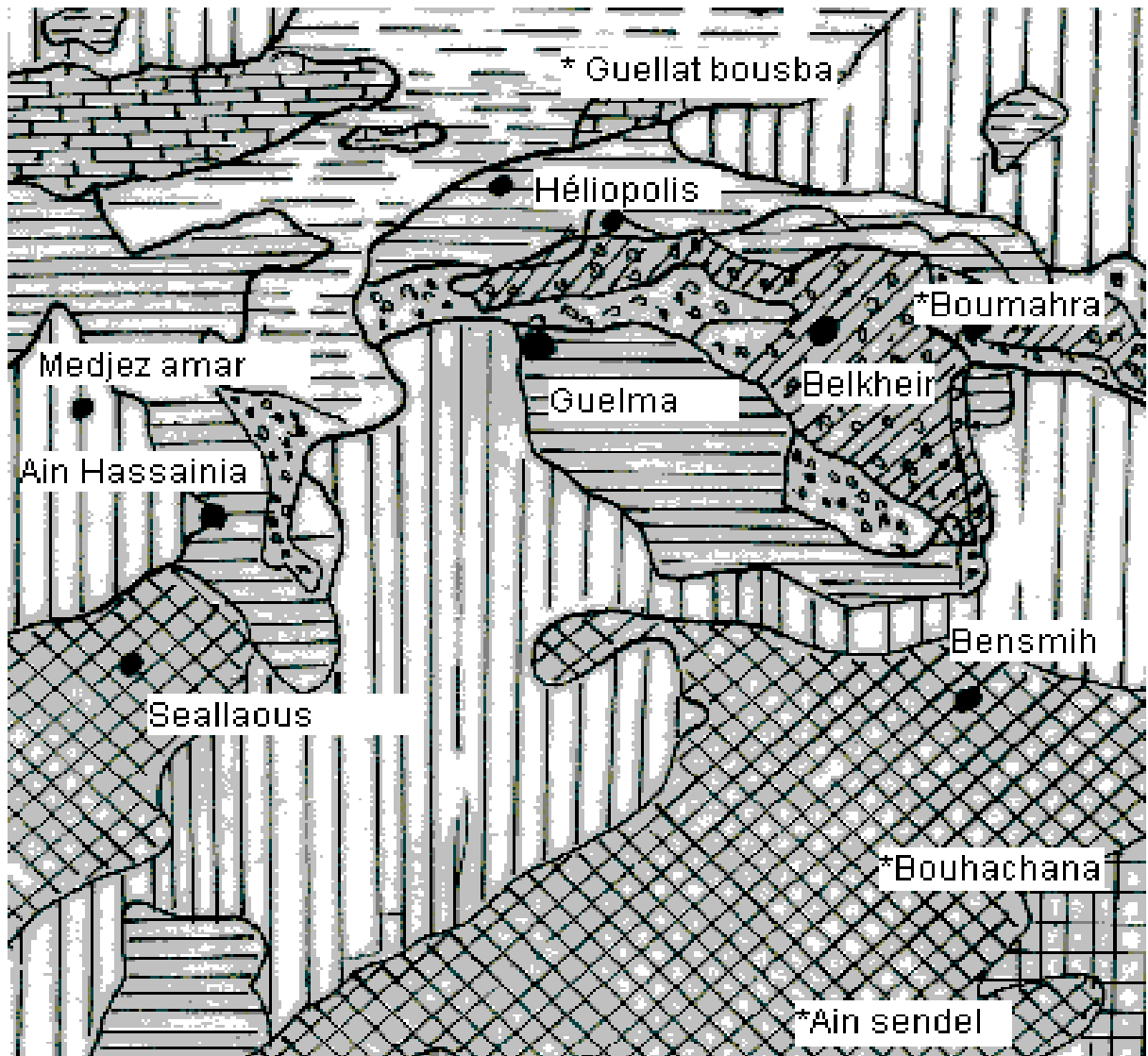
I.2 GEOLOGIE

La région étudiée est caractérisée par des formations géologiques appartenant aux différents domaines paléogéographiques. La description lithologique est la suivante.

I.2.1 le trias

Il est situé à la base des structures géologiques et comporte des calcaires vermiculés et un ensemble grésopélitique au sommet.

Le Trias inférieur affleure au Nord du massif de Nador, sous forme de schistes satinés (VILA, J.M., 1980).



Légendes

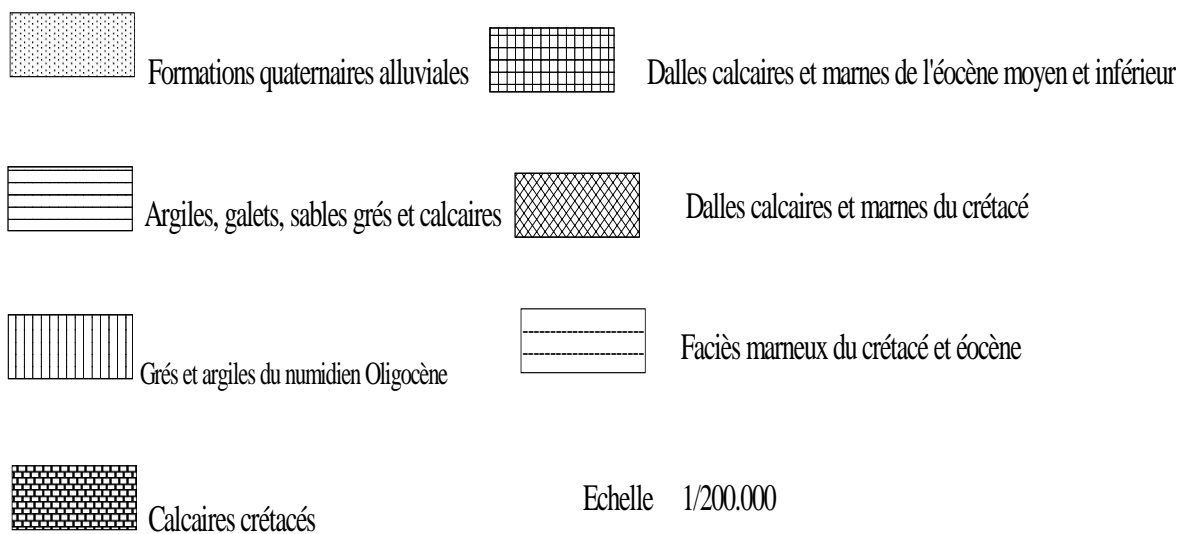


Figure 2 : Extrait de la carte géologique de la région (source BNEDER, 1983)

Le Trias supérieur qui se rencontre à l'est de djebel Debar, est représenté par des alternances de marnes et de schistes de faibles épaisseurs. Les différentes étapes de la remontée du trias ont été montrées par A. CHOUABI (1987).

I.2.2 LE NERITIQUE

Caractérisé par un faciès jurassique-crétacé plus ou moins karstifié. Il est surmonté par plusieurs nappes de charriage, et impliqué dans les grands accidents. Il apparaît aussi sous forme de fenêtre à djebel Mahouna, djebel Debar et Nador, et plus à l'ouest à djebel Taya.

Néocomien et barrémien

Calcaires massifs à intercalations dolomitiques noires à la base. L'alternance de calcaire et dolomies noires représente probablement le Néocomien. Le sommet est caractérisé par des calcaires à palorbitoline qui indiquent le Barrémien supérieur.

Aptien à Orbitolines

Trois ensembles lithologiques représentant une épaisseur totale de 100 m environ. A la base, des calcaires sparitiques, au milieu des calcaires bien lités et riches en *Pianella dinarica* parfois associés à des charophytes. Le sommet de la série correspond à des calcaires fins.

Aptien Supérieur à Miliolidés et orbitolines

Caractérisé par des calcaires bien lités, à pâtes graveleuse et à abondante microfaune à *Orbitolina subconcava*,....

Vraconien à Cénomaniens

Calcaires massifs gris, bien lités, d'aspect souvent troué, organo-détritiques à la base. Le sommet date du Cénomaniens.

Cénomaniens à caprines

Calcaires massifs organo-détritiques à la base. Ils renferment des débris de Rudiste et de *Caprina schiosensis* qui indiquent le Cénomaniens supérieur. La fin de la série montre des alternances de calcaires graveleux à Miliolites et des calcaires fins rubanés à Otrodes.

Campanien-Maestrichtien

A la base, il est caractérisé par un léger ravinement sans discordance avec parfois un conglomérat ferrugineux, comme au flanc Nord de djebel Debar. Il s'agit de calcaires massifs organo-détritiques remaniant des orbitolines à spicules abondants et s'enrichissant vers le haut en banc de silex. La série débute au Campanien avec des Orbitolites et se termine avec des couches à *Globotruncana Bolli* donnant le sommet du Crétacé.

I.2.3 LES UNITES TELLIENNES

Elles appartiennent au domaine externe de la chaîne des Maghrébides dans le Nord-Est Algérien. Cette unité correspond au domaine tellien externe qui est constitué par des formations paléogènes, où l'on distingue du sud au nord:

-Les séries méridionales (klippe de djebel Bardou) situées à la limite Sud-Est du sous bassin, (Feuille de ABDI N° 76).

-Un ensemble médian caractérisé par La klippe de sidi Brahim à l'ouest de BenSmih.

-L'unité de Beni Ahmed

I.2.3.1 L'UNITE TELLIENNE MERIDIONALE

La klippe de djebel Bardou

Ce massif est situé entre Bouhachana et Ain Sendel sur la route de Guelma -Sedrata. Le faciès à nummulites correspond à l'unité méridionale (J.-M. Vila, 1980).

Les levées géologiques (figure 3a) montrent qu'à la base de djebel Bardou affleure un miocène inférieur, couverture des Sellaouas d'âge Burdigalien (CHOUABI. A.,1987).

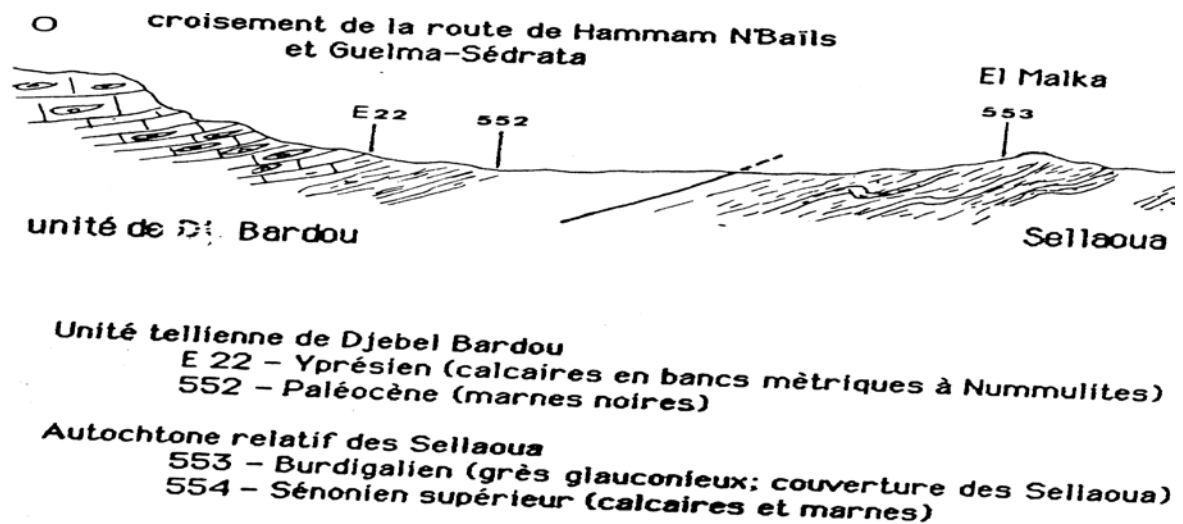


FIGURE 3A : COUPE DE LA SERIE TELLIIENNE DE DJEBEL BARDOU

I.2.3.2 L'UNITE TELLIIENNE MEDIANE

Écailles de djebanet Sidi Brahim

On peut distinguer dans cette zone trois grandes écailles (figure 3b)

D'abord, celle de djabannet Sidi Brahim à l'ouest de BenSmih

Puis, celle de BenSmih

Et enfin, celle de Bouhachana

Paléocène

Il est franchement marneux parfois feuilleté, épais d'une cinquantaine de mètres. On y trouve de rares niveaux de calcaires de couleur jaune, intercalés dans cette formation. Les niveaux les plus bas contiennent des beufs de calcite.

Eocène

Il est constitué de calcaires lités à globigérines, à faciès "suessosien". A la base, on trouve des bancs de calcaires à silex, surmontés par des calcaires en bancs décimétriques, sans silex, riches en nodules phosphatés et ferrugineux. Ces calcaires sont eux- même surmontés par les marnes lutétiennes à boules jaunes.

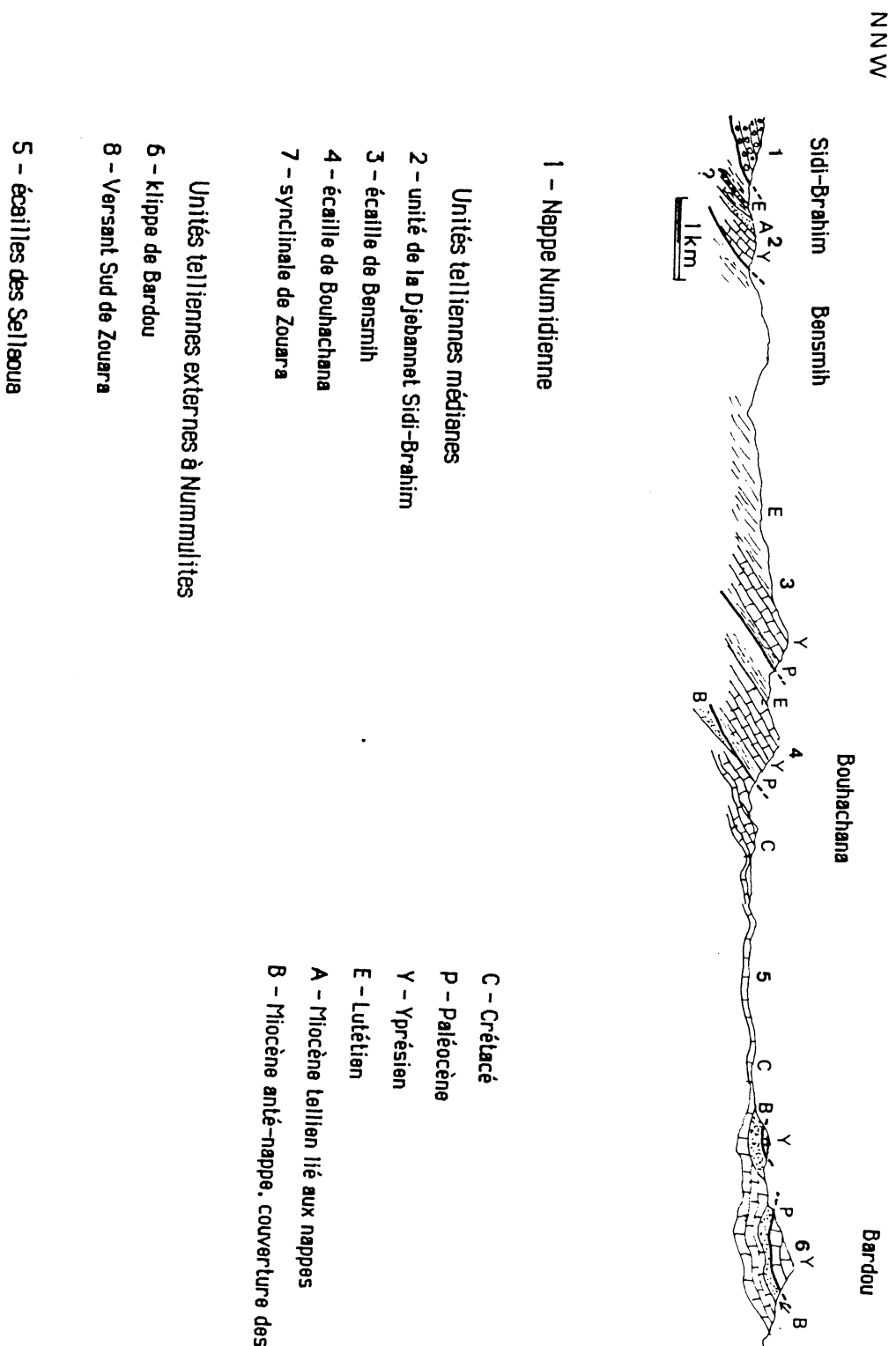


Figure 3b : Coupe des différentes unités telliennes entre Bensmih et Bardou

I.2.4 L'UNITE ULTRA-TELLIENNE

Elle forme d'assez vastes affleurements entre la forêt de Béni Ahmed et celle de Houara. La série stratigraphique de cette unité est :

Sénonien inférieur

Caractérisé par des marnes beiges ou jaunes et de marno-calcaires en petits bancs de même teinte, riches en Rosalines.

Le Santonien est daté par *globotruncana* et le Coniacien est daté par *globotruncana sigali*.

Le Cénomaniens et Turonien

Le cénomaniens débute par des marnes et marno-calcaires clairs blancs, crèmes ou beiges s'enrichissant vers le haut en niveaux schisto-pélitiques gris fer à très rares intercalations microbrechiques à lentilles de phtanites d'aspect très comparable à celui du complexe à microbrèche, mais souvent d'allure plus schisteuse. Le passage du Turonien se fait par des petits niveaux marneux ou marno-calcaires clairs, riches en Roseline.

Albo-Cénomaniens

Série à dominante calcaire, à grandes dalles de micrite à Radiolaire dont la cassure est blanche ou grise claire.

Barrémo-Aptien

Marnes à altération gris bleu et petites intercalations marneuses noirâtres. Les niveaux marno-calcaires à débit schisteux sont assez rares.

1.2.5 Nappe épi (ultra) tellienne de Djebel Bousba

Principalement développée au Sud-Ouest de Guelma, à Medjez Amar et près de Nador. Elle est caractérisée par:

Le Lutétien

Visible sur la berge et près de Medjez Amar, caractérisé par des marnes noires renfermant une abondante microfaune.

Yprésien-Lutétien inférieur

Renfermant des barres de marno-calcaires à patine blanche, cassure noire fétide et bitumineuse à silex noirs en rognons ou lités. Au Nord de Djebel Debar, ces calcaires ont livré des globorotalia.

Dano-Paléocène

Marnes noires ou gris foncé, à rares boules de calcaire dolomitique jaune à débit en frite, notamment au Nord de djebel Debar.

Dano-Montien

Marnes grises claires à petits bancs de marno-calcaires.

Campanien et Maestrichtien

Caractérisés par des marnes claires, beiges, blanches, crèmes ou jaunes claires contenant des intercalations à dominante calcaire formant barre.

Santonien

Marnes grises un peu feuilletées, très calcaires à globotruncana Concavata.

Coniacien

Alternance de marnes et de marnes beiges ou jaunes claires et de calcaires marneux jaunes, à cassure gris bleu clair, en bancs réguliers de 30 à 40 cm. l'ensemble forme une barre importante.

Cénomaniens- Turoniens

Le Turonien est représenté par deux bancs calcaires gris bleus de 50 à 60 cm d'épaisseurs.

Le Cénomaniens est constitué par des marnes blanches à petits bancs de calcaires à parois silicifiées.

Valangien à Aptien

Constitué de marnes avec des intercalations de petits bancs calcaires marneux fins à gros Radiolaires.

I.2.6 LE NUMIDIEN

Il forme principalement les reliefs de la région étudiée Mahouana, Houara et réapparaît en lambeaux aux environs de Bensmih. Il est caractérisé par un flysch constitué par les trois termes suivants :

- Epaisse série d'argile verte et rouge à tubatomatuculum d'âge Oligocène
- Alternance d'argile et de gros blocs de grès souvent hétérométrique d'âge Aquitanien.
- Argiles, marnes et silexites correspondent au Burdigalien inférieur.

I.2.7 LE POST-NAPPE

I.2.7.1 Le Mio-pliocène

Le mio-pliocène est représenté surtout au niveau du bassin de Guelma par des marnes à gypse, argiles et conglomérats rouges.

Ils sont considérés comme des formations post-nappe, où on voit deux cycles.

Mg- Argiles à gypse

Argile à gypse fibreux ou marnes feuilletées à intercalations de lamelles marno-calcaires et de gypses en couches minces ou en masses litées; Au sud d'Héliopolis, les argiles bleues où le soufre s'intercale.

Mc - Argiles rouges continentales

Argile lie de vin, pélites, conglomérats à éléments plus ou moins roulés, rouges, ravinant les formations antérieures avec une discordance très accusée. Il s'agirait du deuxième cycle post- nappe consécutif à une phase d'érosion.

m- Molasse de Guelma

Localisée au Sud de la région, il s'agirait d'une épaisse série de grès jaunâtre friable, avec des intercalations argilo-marneuses grises ou jaunes, parfois gypseuses. Sur la feuille de ABDI, la série est caractérisée par des conglomérats remaniant de nombreux galets du Numidien, formations qu'elle surmonte en discordance nette.

I.2.7.2 QUATERNAIRE ANCIEN

Caractérisé par des éboulis mélangés parfois à des argiles numidiennes et des travertins localisés aux alentours d' Héliopolis et à l'Ouest de Guelma.

I.2.7.3 QUATERNAIRE RECENT

Caractérisé par les formations suivantes :

Rharbo actuel

Formations limoneuses, sableuses et caillouteuses roulées, localisés le long des lits des oueds.

Soltanien

Sables, limons et cailloux roulés bruns clairs ou grisâtres , bien développé dans la région de Guelma.

Tensiftien

Sables et galets à patine ocre ou brun jaunâtre, bien représentés dans la vallée de la Seybouse.

I.2.8 TECTONIQUE ET PALEOGEOGRAPHIE

Du point de vue paléogéographique, l'ultra-tellien occupe une position externe du domaine Tellien. Au secondaire, la série néritique s'est sédimentée sur un haut fond appelé domaine néritique constantinois.

Au Nord-Ouest, dans le sillon tellien s'est déposée une sédimentation sombre qui témoigne de la profondeur du milieu. Au Burdigalien supérieur, les formations telliennes externes ont été écaillées. Au Laungnien inférieur, les nappes telliennes et leur couverture numidienne ont glissé par gravité dans le sillon des Sellaouas.

Au Nord Est, la teinte devient plus claire à matériel crétacé- paléogène (ultra-tellien). A l'Eocène moyen, les unités ultra-telliennes sont mises en place en diverticule sur le domaine tellien.

Le début du crétacé se caractérise par une mer peu profonde. Au Barrémien, elle s'approfondit en formant un géosynclinal. Pendant cette période, les formations sont affectées par des failles perpendiculaires et longitudinales. A la fin de l'Eocène moyen se sont produits des mouvements intenses qui ont plissé la région.

A la fin de l'Oligocène, une phase orogénique plissera le numidien et le charriera sur les formations précédentes.

Au Miocène, la région a subi de Nouveau la tectonique d'effondrement qui a donné naissance au bassin de Guelma. Pendant cette période, au Sud il y a écaillage du domaine tellien externe. Au mio-pliocène, une phase tectonique post-nappe a raviné les formations antérieures avec une discordance très accentuée.

Au burdigalien terminal, il y a glissement des unités telliennes méridionales vers le Sud accompagnées par les unités à Nummulites telles que les copeaux de djebel Bardou.

Le Numidien qui couvre toutes les nappes, sans être impliqué dans cette tectonique et le glissement par gravité des formations telliennes a permis à la nappe numidienne de glisser sur les nappes telliennes.

I.3 GEOMORPHOLOGIE

Le bassin de Guelma est drainé par la Seybouse et caractérisée par un ensemble de région très hétérogène. Aux hautes plaines au sud, à reliefs modérés et aux écoulements lents et parfois nuls. Puis parvient l'atlas tellien à reliefs accidentés et à structures complexes où le réseau hydrographique est tantôt adapté et tantôt inadapté (GHACHI. A., 1982). Les Oueds traversant la région sont en général à caractère torrentiel.

Les mouvements tectoniques du plio-quaternaire ont joué un rôle prépondérant dans la morphogénèse donnant naissance à des terrasses et des cônes de déjections au niveau du bassin de Guelma.

Du point de vue morphologique, nous distinguons cinq niveaux (D'après CHERRAD. S.E., 1992 in DJABRI. L., 1998).

Niveau 5 : Formé de hautes terrasses et glacis contenant des galets et des blocs de grandes tailles. C'est aussi la zone de dépôt de pente. Elle a 100 m d'altimètre.

Niveau 4 : Constitué de glacis et également de haute terrasse qui contiennent des blocs et galets hétérométriques. Dans ce niveau la couche calcaire est apparente.

Niveau 3 : Niveau de transition caractérisé par la présence de galets et de blocs hétérométriques. La couche calcaire est également apparente. Ce niveau se situe à 30-50 mètres d'altitude.

Niveau 2 : Terrasse et terminaison de glacis se confondent. Le litage des éléments est visible. Ce niveau est très étendu, de 10-20 mètres d'altitude.

Niveau 1 : formé par un mélange d'argile et de sable du Quaternaire.

Au sud, les Oueds Halia, Bousorra et Bouhachana n'ont pas pu alluvionner des terrasses que l'on peut expliquer par l'existence du massif rocheux résistant à l'érosion, d'où un encaissement du lit et absence du champ d'inondation.

CHAPITRE 2 : HYDROCLIMATOLOGIE

2.1 INTRODUCTION

L'étude des données climatologique est nécessaire à la compréhension des mécanismes de circulation des eaux superficielles et souterraines. Elle permet d'approcher les termes du bilan qui sont les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissellement.

Pour la région du bassin de Guelma, nous avons pu disposer des données de quatre stations pluviométriques à savoir celles de Guelma, Héliopolis, Medjez Amar et Ain Larbi. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques géographiques et topographiques.

Tableau 1 : Caractéristiques géographiques et topographiques

Station	Altitude (m)	longitude	Latitude	Période d'observation
Guelma	227	07°28'E	36°28'N	1972-2003
Héliopolis	260	07°26'E	36°30'N	1972-2003
Ain Larbi	930	05° 64'E	40° 9'N	1982-2003
Medjez Amar	280	07°24'E	36°31'N	1982-2003

2.2 ETUDE DES PRECIPITATIONS

2.2.1 INTRODUCTION

Le réseau pluviométrique du sous-bassin de Guelma a été pratiquement installé récemment. Dans notre étude, seules les données récentes ont été prises en considération du fait que les stations anciennes ont été déplacées de leur emplacement initial, ce qui rend difficile l'interprétation de leurs données.

2.2.2. COMPLEMENT DES LACUNES

Les stations de la région de Guelma retenues pour l'étude de la série présentent toutes, à l'exception de la station d'Héliopolis, des lacunes sur plusieurs mois. La station de Guelma semble la plus touchée par ces perturbations.

La restitution des données manquantes a été établie à l'aide de la méthode des rapports, qui se justifie, dans notre cas, par le peu de lacunes au sein des données.

L'application de cette méthode est simple. Elle admet que le rapport des hauteurs des pluies tombées pendant un même mois et pendant une série de mois de même nom était la même en des stations voisines en d'autres termes les couples de stations doivent avoir les mêmes affinités climatiques et géographiques (Halimi. A., 1980).

Le comblement des données et la correction de la pluviométrie mensuelle peuvent être établis à l'aide de l'équation suivante :

$$Y = AX \quad (1)$$

Y : est la valeur inconnue pour un mois particulier à la station lacunaire B,

X : la valeur correspondante observée à la station de référence A

A : Constante d'ajustement égale au rapport de la somme de précipitations observées pendant une période commune aux deux stations.

Avec
$$A = \frac{\sum Pa}{\sum Pb} \quad (2)$$

2.2.3 ETUDE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES

L'année pluviométrique correspond à l'année hydrologique allant de septembre en août. Ce découpage convient mieux aux recherches hydrologiques, et permet d'analyser les totaux de précipitations cumulées au cours d'un cycle hydrologique climatique.

L'irrégularité de la pluviométrie est générale et s'exprime par des régimes pluviométriques mensuels, saisonniers et inter-annuels.

D'une année à l'autre, d'une station à l'autre, les hauteurs enregistrées peuvent varier du simple au double, même lors des années exceptionnelles. Il en est de même pour des hauteurs mensuelles qui présentent partout de grandes amplitudes. Dans l'ensemble, et malgré des écarts prononcés entre certaines stations, on constate une certaine similitude de la tendance des variations des précipitations annuelles. Ceci apparaît sur les figures 4, 5, 6 et 7 relatives aux variations annuelles des précipitations des stations retenues. A travers ces graphiques, on peut remarquer une certaine irrégularité des totaux pluviométriques annuels des séries de toutes les stations.

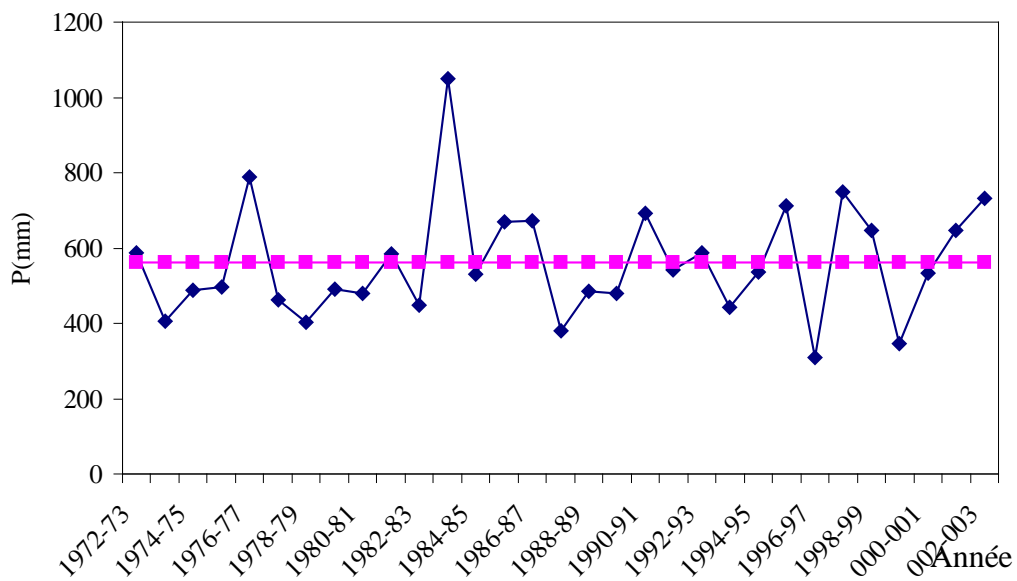


Figure 4 : Variation des précipitations annuelles; station de Guelma

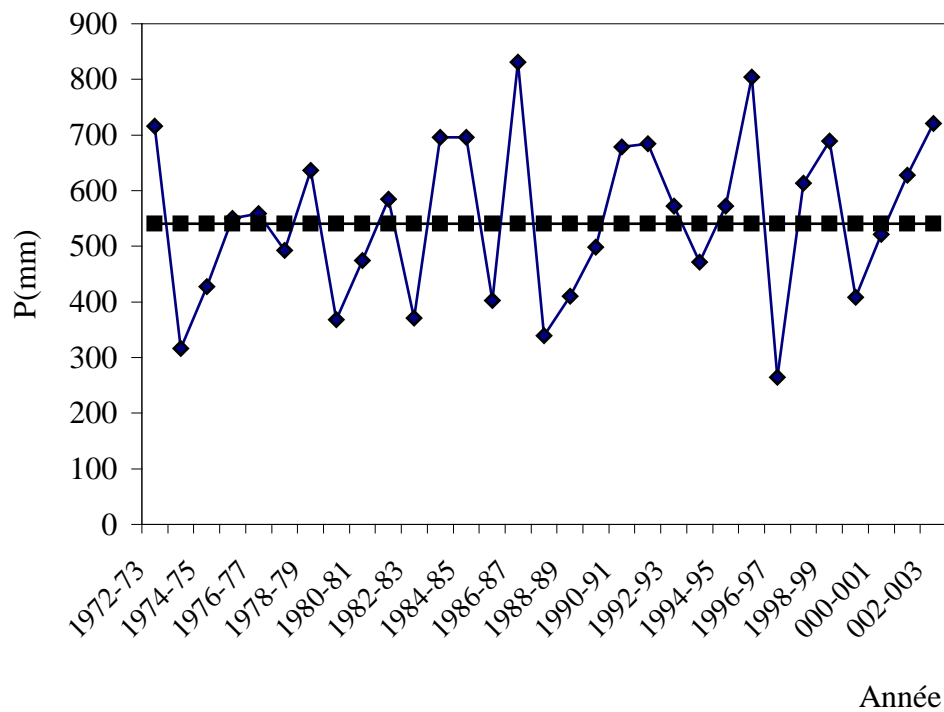


Figure 5 : Variation des précipitations annuelles; Station de Héliopolis

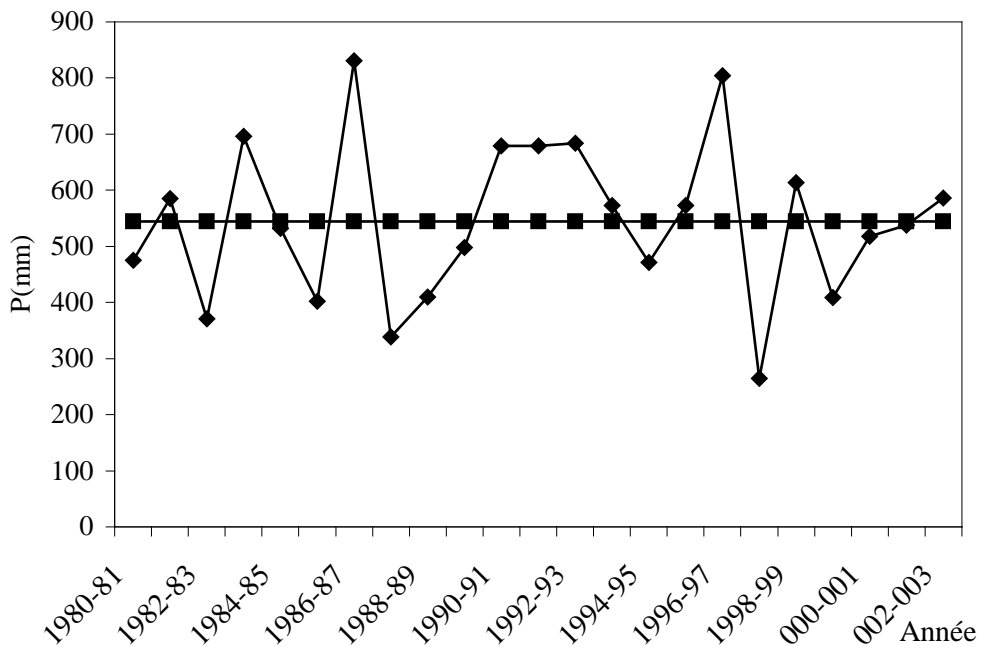


Figure 6 : Variation de précipitations annuelles; Station de Medjez Amar

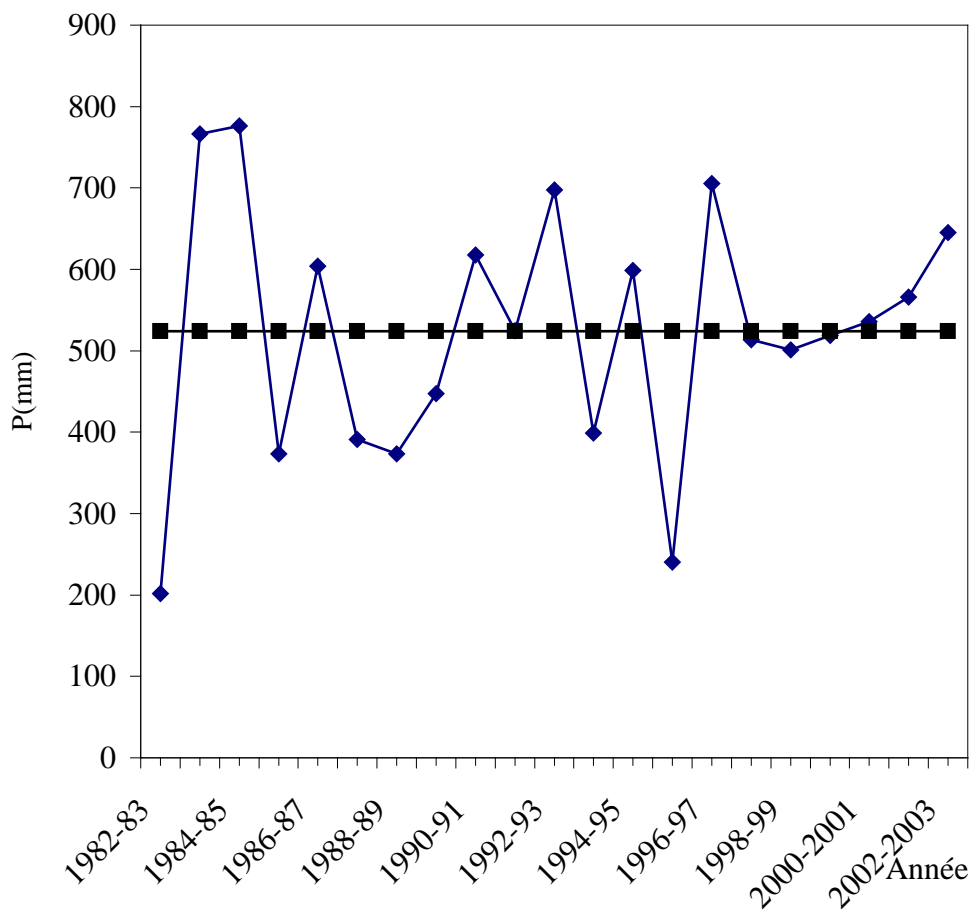


Figure 7 : Variation des précipitations annuelles, Station de Ain Larbi

D'une façon générale et par rapport à la moyenne inter-annuelle, le nombre d'années humides est nettement inférieur à celui du nombre d'années sèches.

2.2.4 HOMOGÉINISATION DES PRÉCIPITATIONS ANNUELLES

La station d'Héliopolis est la seule station où l'on possède des observations pluviométriques longues et plus régulières. Elle servira à l'établissement de corrélations visant à rattraper les données manquantes et à corriger les données douteuses.

Une série chronologique est dite homogène soit qu'elle présente le caractère aléatoire simple, ce qui suppose l'absence de toute organisation à l'intérieur de la série, soit que la propriété statistique de l'erreur de mesure est restée inchangée au cours de la période d'observation.

Pour ce faire, il existe plusieurs tests statistiques qui doivent être non paramétriques

2.2.4.1 TEST DE WALD-WOLFONITZ

Ce test exige une série assez longue et il permet de déceler l'effet de persistance c'est à dire l'existence entre les valeurs successives une dépendance de premier ordre.

On considère la série centrée $Y(i)$ avec $Y_{(i)} = y_{(i)} - y_{\text{moyen}}$, le coefficient de corrélation ou d'auto-corrélation est donné par la relation:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot y_{(i+1)}}{\sum y(i)^2} \quad (3)$$

Si on suppose l'hypothèse nulle et si n est grand, les grandes valeurs de R conduisent au rejet de l'hypothèse nulle, car la persistance correspond à une corrélation sériale positive. L'hypothèse nulle sera acceptée pour :

$$U_c U(r) = \frac{(n-1)r + 1}{n-1} \quad (4)$$

$U_c (0,05)$: valeur critique au niveau de signification de 0,05

Tableau n°2 : Valeur de la statistique du test de Wald-Wolfonitz

Station pluviométrique	Valeur de la statistique u	Probabilité	Signification du test au seuil 0.05
Guelma	0.733	0.464	acceptable
Héliopolis	1.00	0.316	acceptable
Medjez Amar	1.53	0.125	acceptable
Ain Larbi	1.53	0.127	acceptable

2.2.4.2 TEST DE TENDANCE

Ce test regarde en quelle limite doit se trouver le coefficient de corrélation entre l'ordre de la série et les naturels. Ce test exige l'hypothèse nulle, autrement dit absence de toute tendance. Tandis que l'hypothèse alternative est la suite possède une tendance significative.

On classe par ordre croissant la série y_i , puis on calcule le coefficient de corrélation entre y_i et des entiers de 1 à n ; ainsi on a :

$$r_s = 1 - \frac{6}{n(n^2 - 1)} \sum_{i=1}^n (y_i^2 - 1)^2 \quad (5)$$

R_s = coefficient de rang de SPEARMAN

$U_c(0,05) > U_{rs} = R_s / \sqrt{n-1}$, absence de tendance

$U_c(0,05) < U_{rs}$, tendance de même signe.

En supposant l'hypothèse nulle, on peut montrer que R_s suit une loi normale dont l'espérance est nulle et la variance $V = (n-1)^{-1}$

Pour $U(0,05)$: U critique au niveau de 0,05 (test bilatéral) = 1,96

Tableau n°3 : Tests statistiques

Station			Persistances		Tendances	
	P moyen mm	δ_p en mm	Coef. Auto correlation	Ur	Coef.de Spearman	Urs
Guelma	541	153	0.67	0.14	0.76	0.16
Heliopolis	561	157	0.71	0.17	0.82	0.18

Remarque : Ce test n'est appliqué qu'aux stations ayant des données assez longues et supérieures à 30 observations.

Dans notre cas, les tests sont inférieurs à 1.65 et vérifient pour deux stations. Ainsi; nous avons bien absence de toute tendance et de persistance. Nous pouvons donc conclure que les quatre séries vérifient bien le caractère aléatoire simple.

2.3 AJUSTEMENT DES PRECIPITATIONS ANNUELLES A UNE LOI NORMALE

2.3.1 Vérification graphique

La vérification graphique des données de pluies annuelles a été testée par le programme IFRAN. Nous constatons que les distributions des précipitations fournissent un alignement de points acceptables. Ces données peuvent être représentées par une loi normale.

Par cette méthode, on peut estimer les fréquences de non dépassement et les temps de retours des précipitations et les précipitations fréquentielles (tableau 4) sont déterminés par la formule suivante :

$$U_F = \frac{P_F - \bar{p}}{\delta_p} \quad (6)$$

U_F = Variable réduite de Gauss

P_F = Pluie fréquentielle en mm

\bar{p} = Pluie moyenne en mm

δ_p = Ecart type en mm

d'où on tire P_F de l'équation (6), on obtient :

$$P_F = \bar{p} + U_F \cdot \delta_p \quad (7)$$

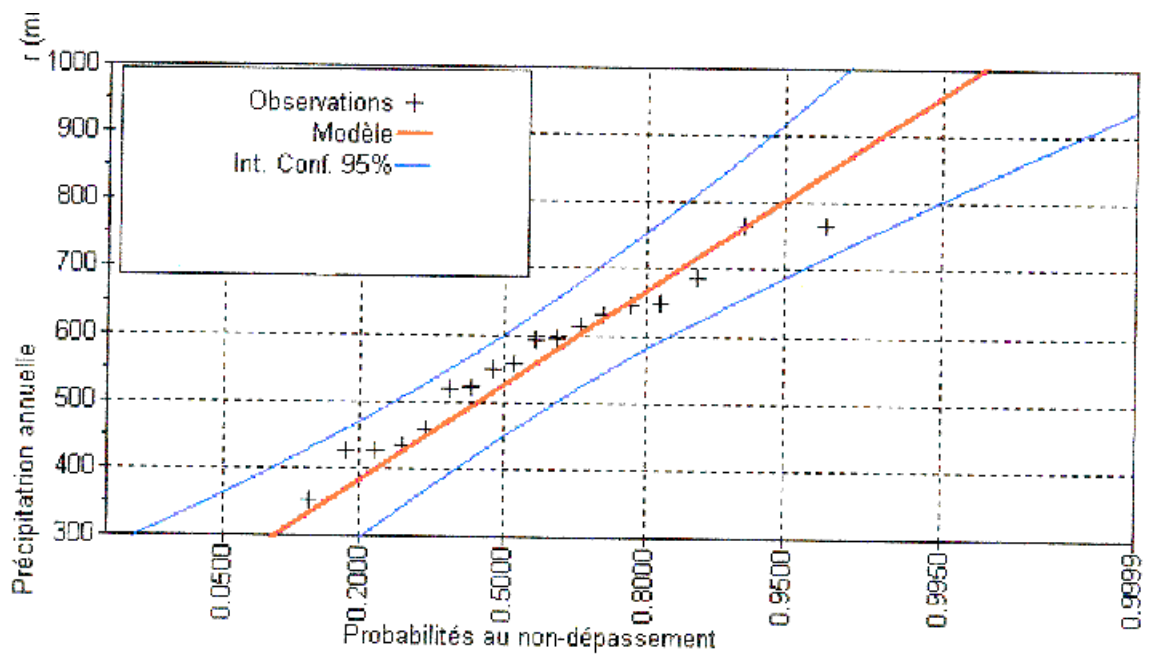


Figure 8 : Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale, station de Medjez Amar

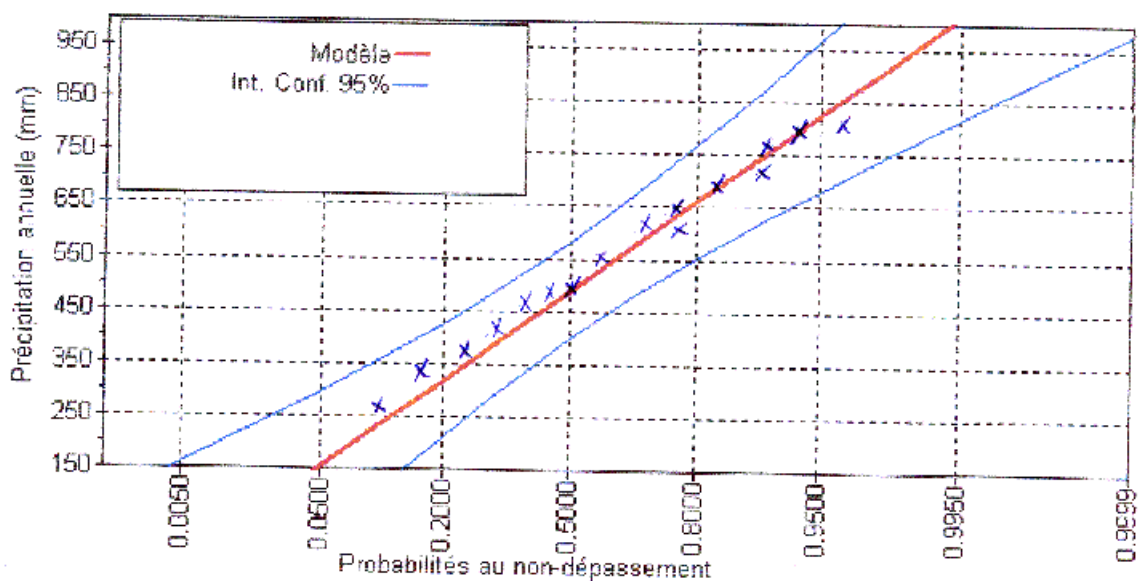


Figure 9 : Ajustement des précipitations à une loi normale, station de Ain Larbi

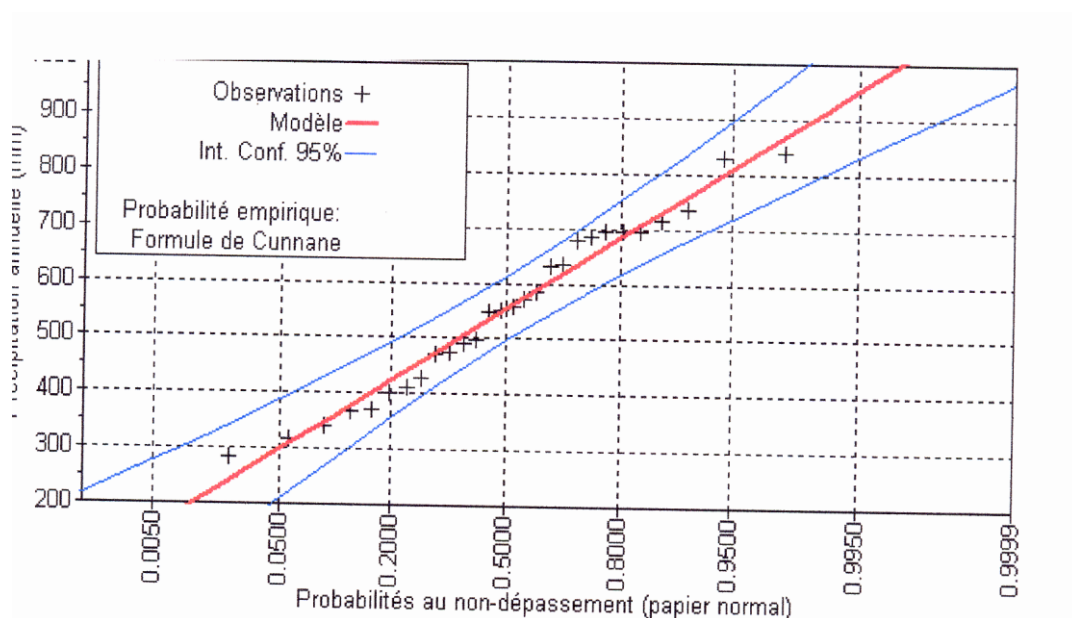


Figure 10 : ajustement normale des précipitations; station de Guelma

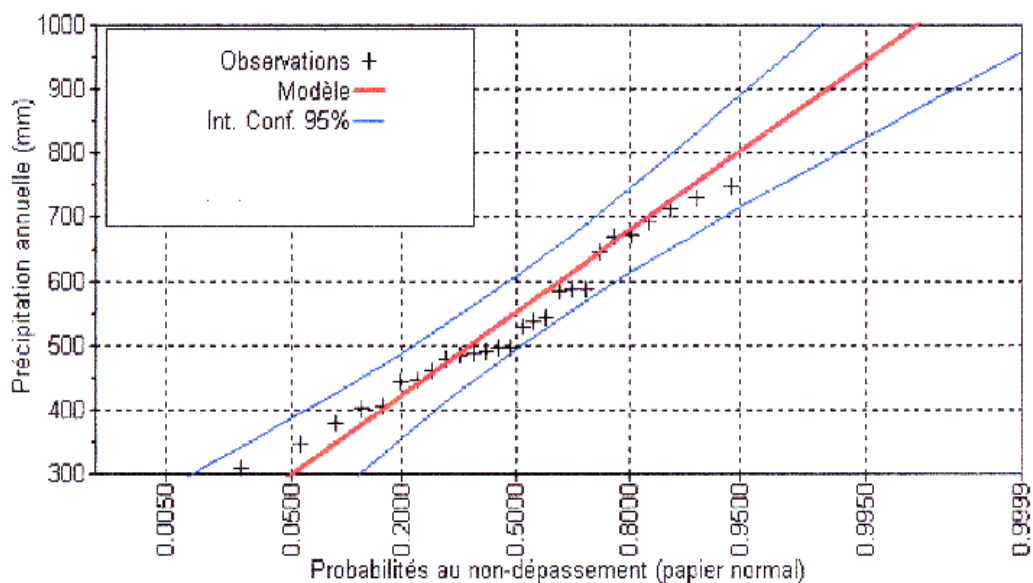


Figure 11: Ajustement normale des précipitations à une loi normale, station d'Héliopolis

Tableau n°4 : Précipitations annuelles fréquentielles (mm)

Station	Année sèche			Année humide			
	100 ans	50 ans	10 ans	\bar{P}	10 ans	50 ans	100 ans
Fréquence au non dépassement	F=0.01	F= 0.02	F=0.10	F=0.50	F=0.90	F=0.98	F = 0.99
Guelma	186.04	227.35	345.16	541	736.84	854.65	895.96
Héliopolis	196.76	239.15	360.04	561	791.96	854.65	925.24
Ain Larbi	156.48	199.05	323.92	530	736.08	860.05	903.52
Medjez Amar	189.68	230.45	346.72	540	733.28	849.55	890.32

Les précipitations annuelles suivent une loi normale comme le montre l'exemple des différentes stations (figures 4, 5, 6 et 7). Les valeurs moyennes sont égales aux valeurs médianes et modales, peuvent être atteintes ou dépassées une année sur deux, soit une fréquence de 0.5. Les valeurs extrêmement sèches et humides sont atteintes ou dépassées tous les cent ans avec une fréquence respective 0.99 et 0.01.

2.3.1.2 LA REGRESSION LINEAIRE

Nous avons calculé la regression linéaire des séries de Guelma et d'Héliopolis. Le coefficient de corrélation entre ces deux stations est de 0.643, nous a permis de tracer la courbe corrélant Guelma à Héliopolis (figure 11a).

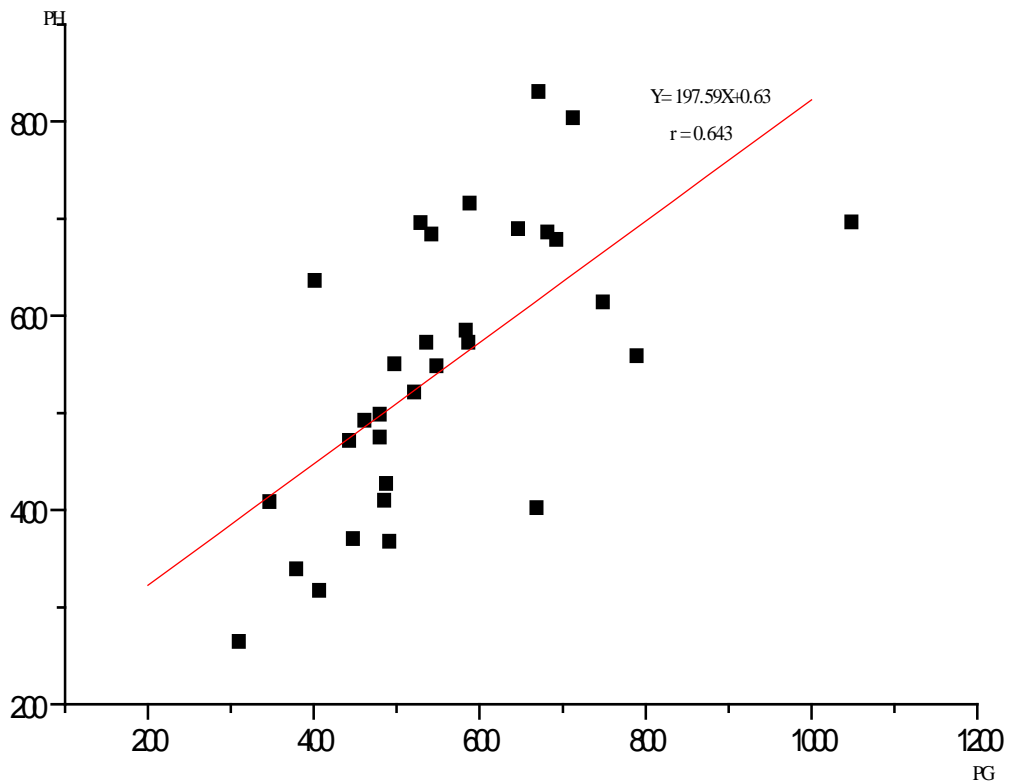


Figure 11 a : Courbe de régression

2.3.2 TEST χ^2

L'ajustement des échantillons a été vérifié par le test χ^2 . Il est le plus pratique et le plus utilisé en hydrologie bien qu'il ne soit pas très puissant. Pour mettre en œuvre ce test, on procède de la façon suivante :

- * On découpe l'échantillon de n éléments en k classes de manière à ce que chaque classe contient au minimum cinq éléments.

- * Soit n_i le nombre contenu dans la i ème classe et n_i' le nombre théorique qui devrait s'y trouver, on forme alors le terme suivant :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n_i - n'_i) / n_i \quad (8)$$

Ce test suit une loi de probabilité dite de χ^2 avec v degré de liberté :

$$V = K - P - 1 \quad (9)$$

L'application de ce test aux stations pluviométriques a donné les résultats suivants (tableau 5).

Tableau n°5 : Résultats du test χ^2

Station	χ^2	Probabilité	Signification du test au seuil de 5%
Guelma	3.1 0	0.54	Acceptable
Héliopolis	4.9 0	0.29	Acceptable
Medjez amar	0.4 0	0.94	Acceptable
Ain Larbi	1.5 7	0.67	Acceptable

Le test montre des probabilités supérieures à 0.1 ce qui signifie que l'on ne peut donc rejeter l'hypothèse selon laquelle l'ajustement est bon et que la loi de Gauss s'adapte bien aux hauteurs annuelles des précipitations.

2.4 PRECIPITATIONS MENSUELLES

Les précipitations mensuelles et leur variation, en relation avec les facteurs thermiques, conditionnent l'écoulement, le régime des cours d'eau ainsi que celui des aquifères.

L'étude des précipitations mensuelles montrent à travers les coefficient de variations mensuels que les fortes valeurs coïncident avec les mois d'été avec un maximum de 2.09 au mois de juillet à la station d'Héliopolis. La

variabilité aussi marquée s'explique par la faiblesse des pluies pendant cette période et par la tendance orageuse de celle-ci. Cependant, en hiver le coefficient de variation diminue et atteint le minimum surtout (au mois de janvier) de 0.63 à Ain larbi, 0.70 à Héliopolis, 0.56 à Guelma et 0.51 à Medjez Amar (au mois de mars). Sur le plan spatial, la variabilité des pluies mensuelles est plus accentuée dans la partie sud du bassin.

Tableau n°6 : Coefficient de variation mensuelle

Stations	Guelma	Heliopolis	Ain Larbi	Medjez Amar
Mois	Coefficient de variation (Cv)			
S	0.83	0.79	0.82	0.83
O	0.99	0.84	1.16	0.68
N	0.86	0.82	1.15	0.86
D	0.69	0.75	1.00	0.83
J	0.67	0.63	0.70	0.56
F	0.76	0.77	0.79	0.92
M	0.56	0.66	0.70	0.51
A	0.70	0.76	0.59	0.61
M	0.56	0.79	0.87	0.85
J	1.03	0.92	0.93	1.54
J	1.91	2.09	1.16	1.28
A	1.39	1.37	1.22	1.57

2.5 DETERMINATION DE LA LAME D'EAU PRECIPITEE

2..5.1 Méthode de la moyenne arithmétique des stations

C'est la plus rapide, elle consiste à calculer la moyenne arithmétique des précipitations observées à chaque station. Son efficacité est meilleure pour les petits bassins où l'influence de l'altitude, la latitude et la direction du vent est partout la même (Tableau n° 7). L'adéquation du modèle peut être vérifiée par le calcul de l'erreur relative.

$$E_r = C_v / \sqrt{N} \quad \text{et} \quad C_v = 100 \delta / \bar{p} \quad (10)$$

E_r = erreur sur la moyenne des précipitations

C_v = coefficient de variation

δ = écart type

N = nombre de stations à traiter

Tableau 7 : Hauteurs des précipitations annuelles moyennes
et erreur sur la moyenne

Stations	Moyenne arithmétique (P_m)	Ecart type	C_v	Erreur sur la moyenne
Guelma	541	153	0.283	14.15 %
Heliopolis	561	157	0.279	13.95%
Ain Larbi	5305	161	0.304	15.20%
Medjez Amar	540	151	0.280	14.00%

Dans notre cas les erreurs sont trop importantes et sont supérieures à 10%. Ceci pourrait être lié au phénomène altimétrique qui diffère d'une station à l'autre. En effet la station de Ain Larbi est située à une altitude plus importante que celles des stations situées au Nord du bassin.

2.6 PRECIPITATIONS MENSUELLES

Le tableau n°8 récapitule les valeurs des hauteurs mensuelles des 4 stations du sous-bassin de Guelma.

Tableau n°8 : Précipitations mensuelles

Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Guelma	31.10	44.20	68.55	74.32	69.33	65.33	62.67	54.36	50.52	15.38	5.30	10.6
Heliopolis	32.76	50.46	65.65	82.48	76.96	74.44	71.51	54.81	40.52	17.61	4.72	9.19
Ain Larbi	29.68	58.03	77.15	75.27	65.15	45.93	66.51	51.92	28.56	16.33	14.9	4.34
Medjez Amar	35.02	49.02	68.43	93.38	90.80	72.25	60.59	47.86	36.52	18.05	6.57	9.20

Il ressort du tableau 9 que les mois les plus arrosés pour toutes les stations vont de novembre à avril, et les mois les plus secs sont juillet et août. Aussi, nous constatons que le cycle hivernal l'emporte sur les autres cycles. Par contre l'indice saisonnier varie du Nord au Sud de HPAE à HAPE.

Tableau n°9 : Précipitations saisonnières

	P mm	A	H	P	E	Années d'observation	Indice saisonnier
Guelma	539	143.85 26.07%	208.98 37.87%	167.55 30.36%	31.63 5.37%	28	HPAE
Heliopolis	551	148.87 25.62%	233.84 40.24%	166.84 28.71%	29.84 5.13%	28	HPAE
Ain Larbi	489	164.86 31.77%	186.35 35.91%	146.99 28.32%	20.68 3.98%	18	HAPE
Medjez Amar	569	153.32 26.05%	256.43 43.57%	144.97 24.43%	33.82 4.7%	18	HAPE

2.7 VARIABILITE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES

Aux variations spatiales des précipitations annuelles s'ajoutent des variations temporelles. La variabilité inter-annuelle des hauteurs pluviométriques serait bien exprimée par le coefficient de variation traduisant la dispersion relative des pluies. Il est donné par la formule:

$$C_v = \frac{\delta}{\bar{P}} \quad (10)$$

Avec:

C_v = Coefficient de variation

\bar{P} = Pluviométrie moyenne en mm

δ = écart -type en mm

Les valeurs du coefficient de variation relatives aux différentes stations oscillent dans un intervalle de 0.283 à Guelma, 0.279 à Héliopolis, 0.280 à Ain Larbi et 0.304 à Medjez Amar. Cependant, nous remarquons une forte valeur de ce coefficient à la station de Medjez Amar conséquence de l'irrégularité des précipitations, il s'accroît là où les hauteurs de pluies sont les plus faibles.

Afin de caractériser au mieux la pluviosité propre à chaque année, il est nécessaire de déterminer l'écart à la normale qui s'exprime par la formule suivante

$$E (\%) = \frac{P_i - P_m}{P_m} \times 100 \quad (11)$$

Avec :

$E(\%)$ = écart à la normale

P_I = total de l'année considérée

P_m = pluviométrie moyenne

Le tableau n° 10 montre les années extrêmement humides et les années extrêmement sèches des différentes stations.

Tableau n°10 : Ecart à la moyenne des précipitations et valeurs du C_v

Station	Année extrêmement humide	Année extrêmement sèche	C_v
Guelma	+51.46% (1995-96)	-48.66 (1996-97)	0.2283
Héliopolis	+90.96% (1983-84)	-43.66 (1996-97)	0.2779
Medjez Amar	+108% (1998/99)	-61.81% (1982-83)	0.2802
Ain Larbi	+128.8% (1998-99)	-72.16% (1996-97)	0.304

Il ressort de ce tableau que l'écart à la moyenne varie de +128% à Ain Larbi, + 108% à Medjez Amar, + 90.96% à Héliopolis et + 59.46% à Guelma, et que l'année la plus extrêmement sèche correspond à l'année 1996-1997 commune aux stations à l'exception de celle de Medjez Amar, est l'année extrême la plus sèche. D'ailleurs les valeurs de l'écart à la moyenne pour cette année 1996-1997 oscillent entre -43.66 à Héliopolis, -48.66 à Guelma, -61.81 à Ain Amara et de -72.16 à Ain Larbi .

2.7.1 COEFFICIENT PLUVIOMETRIQUE

Le coefficient pluviométrique relatif est rapport entre la quantité de la pluie observée réellement et celle que l'on aurait observé si la répartition des pluies était uniforme tout le long de l'année. Il est donné par la relation suivante :

$$C_p = H_p / H_m \quad (12)$$

H_p = pluviométrie annuelle en mm

H_M = Pluviométrie moyenne annuelle en mm

Il indique donc l'écart à une distribution uniforme (Tableau n°11). On remarque que pour les différentes stations, le nombre d'années déficitaires est supérieur aux années arrosées.

TABLEAU N° 11: VALEUR DU COEFFICIENT PLUVIOMETRIQUE ANNUELLE

Année	Héliopolis	Guelma	Ain Amara	Ain Larbi
1972-73	12	1.29	***	***
1973-74	0.73	0.57	***	***
1974-75	0.88	0.70	***	***
1975-76	0.90	0.99	***	***
1976-77	1.32	1.00	***	***
1977-78	0.83	0.88	***	***
1978-79	1.73	1.14	***	***
1979-80	0.89	0.66	***	***
1980-81	0.87	0.85	***	***
1981-82	1.06	1.05	***	***
1982-83	0.81	0.66	0.38	0.91
1983-84	1.90	1.25	1.47	0.81
1984-85	0.96	1.25	1.49	1.35
1985-86	1.21	0.72	0.65	1.04
1986-87	1.22	1.49	1.16	0.62
1987-88	0.68	0.61	0.75	0.75
1988-89	0.88	0.73	0.72	0.75
1989-90	0.87	0.89	0.86	0.96
1990-91	1.25	1.24	1.92	0.92
1991-92	0.98	1.23	1.01	1.14
1992-93	1.06	1.25	1.43	1.05
1993-94	0.80	0.85	0.77	1.11
1994-95	0.97	1.03	1.15	0.76
1995-96	1.29	1.51	0.46	0.98
1996-97	0.56	0.51	1.36	1.35
1997-98	1.37	1.32	0.99	1.21
1998-1999	1.57	1.13	0.96	1.14
1999-000	0.63	0.98	0.98	1.08
000-001	0.78	0.69	0.75	0.56
001-002	1.12	1.20	1.2	1.15
002-003	1.21	1.23	1.17	1.18

2.8 TEMPERATURE

La température est un facteur climatique qui régit les conditions du déficit d'écoulement. Les données de température en notre possession concernent la station de Guelma et Ain Larbi qui est la limite sud-est de notre terrain.

Nous constatons pour les 02 stations que le mois le plus froid de l'année correspond à janvier et le mois le plus chaud correspond au mois d'août.

La différence ente le mois le plus chaud et le mois le plus froid est de 19.16 °C à Guelma et de 20.89 °C à Ain Larbi.

Tableau n°12 : Températures mensuelles °C

Mois	Guelma	Ain Larbi
Septembre	21.20	23.00
Octobre	19.06	17.20
Novembre	14.36	13.00
Décembre	11.61	10.00
Janvier	8.40	7.21
Février	10.24	10.00
Mars	11.88	11.02
Avril	14.50	13.24
Mai	19.91	18.20
Juin	24.00	24.10
Juillet	26.65	27.00
Août	27.56	28.10
T moyenne	17.50	17.43

2.8.1 REGIME CLIMATIQUE

2.8.1.1 Indice de De Martonne

Cet indice étant basé sur le régime des précipitations et des températures.

De Martonne (cf : Halimi. A., 1980) a défini un indice d'aridité en 1923

$$A = \frac{P}{T + 10} \quad (13)$$

P = Précipitation moyenne annuelle en mm

T = Température moyenne annuelle en °C

Pour les stations du sous bassin de Guelma, l'indice de De Martonne vaut 20.51 à Medjez Amar, 21.47 à Guelma, 21.30 à Héliopolis dénotant un climat tempéré, et 19.91 à Ain Larbi caractérisant un climat semi-aride.

A l'échelle mensuelle, un indice d'aridité a été défini comme suit :

$$A = \frac{12p}{t + 10} \quad (14)$$

P = précipitation moyenne mensuelle en mm

t = Température mensuelle en °C

Pour les différentes stations, nous obtenons les valeurs résumées dans le tableau n°13.

Tableau n° 13 : Indice mensuel d'aridité

Mois	Guelma	Héliopolis	Ain Larbi	Medjez Amar
Sep	14.47	15.24	10.24	13.79
Oct	20.56	23.47	18.71	20.24
Nov	25.79	30.54	40.25	33.70
Déc	34.58	38.37	45.16	52.59
Jan	32.25	35.79	39.09	59.21
Fev	29.16	34.63	27.55	43.13
Mar	29.16	33.27	37.96	33.23
Avr	25.29	25.31	26.80	23.99
Mai	20.00	18.85	12.15	14.65
Juin	7.15	7.19	5.74	6.40
Juillet	2.46	2.19	1.41	2.16
Août	4.96	4.27	1.88	0.25

On observe pour le mois de juin un climat désertique, juillet-août un climat hyper-aride, alors qu'il est semi-aride pour mai et septembre, et enfin tempéré pour octobre- novembre -janvier -février.

2.8.1.2 DIAGRAMME PLUVOMETRIQUE

Les paramètres température-précipitation sont des facteurs très intéressants, dans la mesure où leur combinaison permet de déterminer les mois véritablement secs. Ceci est basé sur le comportement de la végétation aux mois ayant un total de précipitation égal ou inférieur au double de la température mensuelle,

$$P \leq 2T \quad (15)$$

La courbe des températures passe au dessus de celle des précipitations pendant les mois secs.

Aux quatre stations du bassin, la saison sèche débute au mois de mai et se termine en début d'octobre. Quant à la saison humide, elle commence à partir d'octobre et se termine en mai.

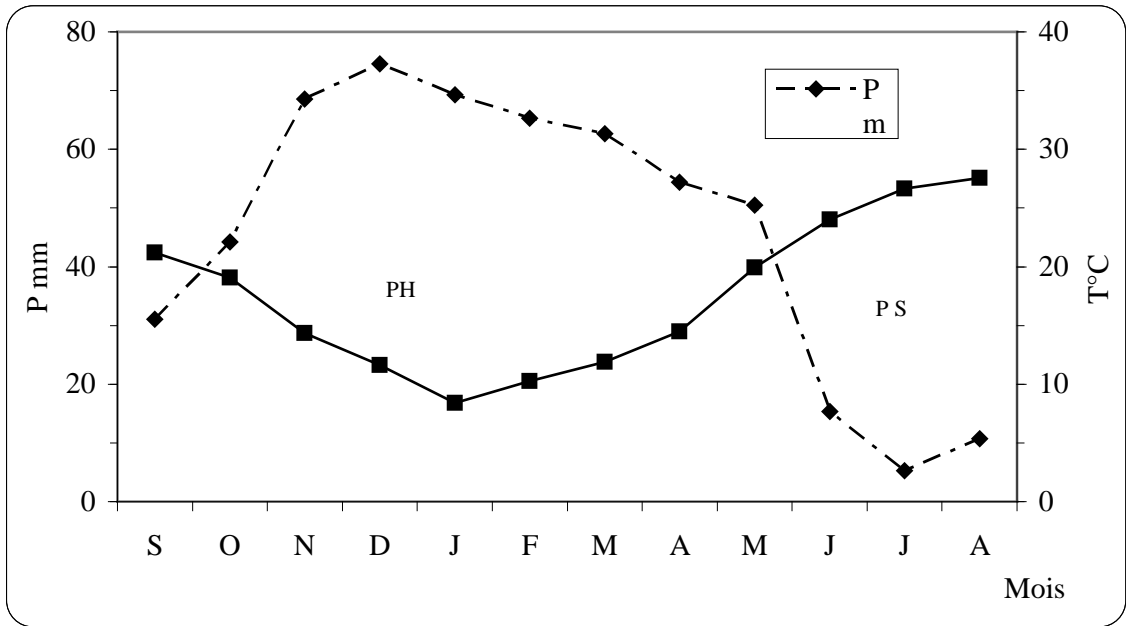


Figure 12 : Diagramme pluviométrique à la station de Guelma

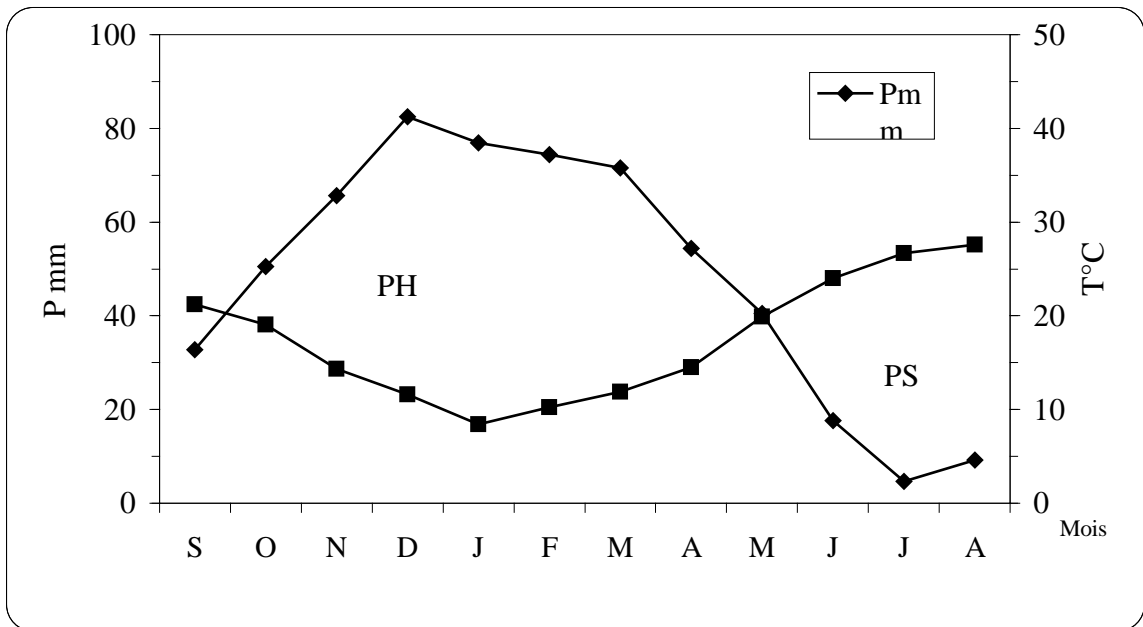


Figure 13 : Diagramme pluviométrique à la station d'Hélio polis

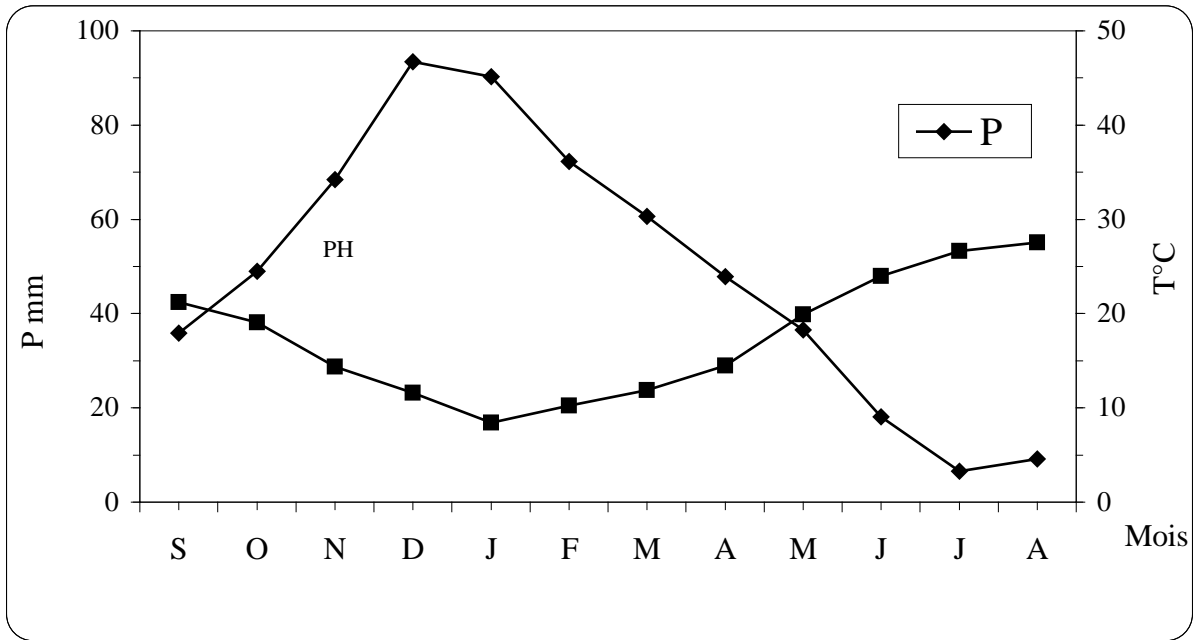


Figure 14 : Diagramme pluviométrique à la station de Medjez Amar

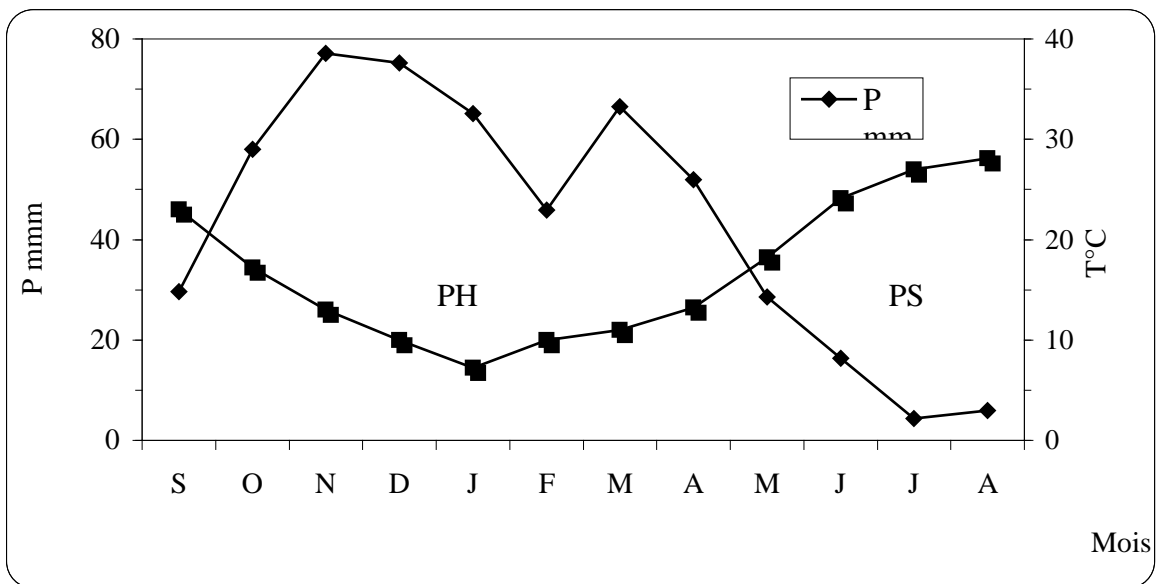


Figure 15 : Diagramme pluviométrique, Station de Ain Larbi

2.9 DETERMINATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION

L'évapotranspiration est sans doute l'une des données climatologiques la plus difficile à approcher. On distingue :

- Une évapotranspiration potentielle qui correspond à l'évapotranspiration d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques.

- Une évaporation réelle qui correspond à l'ETP se produisant dans les conditions réelles des teneurs en eau du sol.

L'estimation de la lame d'eau évapotranspirée est possible grâce à des formulations empiriques.

2.9.1 EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (E.T.P.)

Elle est estimée par la formulation de Thornthwaite. Les précipitations ne seront pas prises en compte.

2.9.2 CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (E.T.R.)

Pour le calcul de l'E.T.R., nous avons choisi les différentes méthodes de Turc et bilan d'eau de Thornthwaite .

2.9.3 FORMULE DE TURC

Applicable à toutes les régions, elle est donnée par la formule.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (14)$$

P = Pluviométrie mensuelle en mm

L = $300 + 25t + 0.05t^3$

T =Température moyenne annuelle °C

Les valeurs de l'E.T.R sont consignées dans le tableau n°14.

Tableau n° 14 Valeurs de l'ETR (mm)

MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
STATION DE GUELMA												
Turc	32.7 7	46.5 5	71.4 4	77.80	73.07	68.42	65.75	66.45	53.19	16.21	5.58	11.25
Thor	31.1 0	44.2 0	31.9 9	20.19	11.16	17.86	30.70	49.94	102.74	63.9	5.30	10.68
STATION D'HÉLIOPOLIS												
Turc	4.52	53.1 2	68.9 4	86.21	80.18	77.82	74.92	60.59	42.71	18.56	4.97	9.68
Thor	32.7 6	50.4 6	31.9 9	20.19	11.16	17.86	30.70	49.49	102.74	60.87	4.72	9.19
STATION DE MEDJEZ AMAR												
Turc	37.7 7	50.6 3	98.0 5	101.56	94.24	75.57	63.58	52.97	38.47	19.02	6.92	9.69
Thor	35.8 7	49.0 2	31.9 9	20.19	11.16	17.86	30.70	49.94	102.74	52.49	6.67	9.20
STATION DE AIN LARBI												
Turc	32.9 6	61.0 5	80.94	78.65	68.03	48.25	69.69	54.58	30.10	17.21	4.58	6.32
Thor	29.6 8	57.1 4	28.85	17.01	9.98	17.01	22.47	40.52	91.51	61.15	4.35	6.00

Discussion : L'évapotranspiration réelle calculée par la méthode de Thornthwaite et celle de Turc, ont montré des écarts importants entre elles. La

méthode de Turc a donné des résultats excessifs qui ont dépassé largement les hauteurs de pluies précipitées pour chaque mois et s'avère inadaptée pour le bassin de Guelma. De ce fait, nous avons maintenu pour le calcul de l'E.T.R , les valeurs issues de la relation de Thornthwaite.

2.9.4 BILAN HYDROLOGIQUE

Les données en notre possession nous ont permis de dresser quatre bilans hydrologiques par la méthode de Thornthwaite qui fait ressortir les quatre paramètres que sont l'évapotranspiration réelle et potentielle, l'excédent et le déficit agricole. Pour le calcul de l'ETR, deux cas sont considérés :

- Si les précipitations du mois sont supérieures à l'ETP, l'ETR est égale à l'ETP
- Si les précipitations du mois sont inférieures à l'ETP, l'ETR sera égale à l'ETP aussi longtemps que les réserves en eau du sol demeurent. Cette réserve n'a pas été mesurée à l'échelle du bassin, mais nous l'avons calculée par le biais du bilan de Thornthwaite.

Tous ces paramètres sont directement liés à la RFU, en d'autres termes dépendent de sa valeur qui est très difficile à estimer. Dans notre cas la RFU est prise égale à 100 mm (rapport SOGREAH., 1979) du fait que le sol est couvert par les cultures maraîchères et le blé au nord, et boisé au sud.

Tableau n°15 : Bilan hydrologique à la station de Guelma

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T °c	21.	19.06	14.36	11.61	8.4	10.24	11.88	14.5	19.91	24	26.65	27.56
2												
P*	31.	44.20	68.55	74.32	69.33	65.33	62.67	54.36	50.52	15.38	5.30	10.68
10												

i	8.7	7.44	4.86	3.53	2.17	2.93	3.66	4.93	7.94	10.51	12.20	12.94
3												
ETP	91.	65.36	31.99	20.19	11.16	17.86	30.70	49.94	102.74	145.98	175.18	175.55
ETR	31.	44.20	31.99	20.19	11.16	17.86	30.70	49.94	102.74	63.9	5.30	10.68
10												
RFU	0	0	36.56	92	100	100	100	100	47.78	0	0	0
Exe	0	0	0	0	51.17	47.47	31.97	4.42	0	0	0	0
DA	60.	21.16	0	0	0	0	0	0	0	82.08	169.8	164.8
63												

Tableau n°16 : Bilan hydrologique à la station d'Héliopolis

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P	32.7	50.46	65.65	82.48	76.92	74.44	71.51	54.81	40.52	17.61	4.72	9.19
6												
T	21.2	19.06	14.36	11.61	8.4	10.24	11.88	14.5	19.91	24	26.65	27.56
ETP	91.7	65.36	31.99	20.19	11.16	17.86	30.70	49.94	102.7	145.9	175.1	175.5
3									4	8	8	5
ETR	32.7	50.46	31.99	20.19	11.16	17.86	30.70	49.49	102.7	60.87	4.72	9.19
6									4			
RFU	0	0	33.66	100	100	100	100	100	43.26	0	0	0
Exe	0	0	0	25.95	65.76	56.58	40.8	4.87	0	0	0	0
DA	58.9	14.90	0	0	0	0	0	0	0	85.11	170.4	166.3
7											6	

Tableau n°17 : Bilan hydrologique Station de Ain Larbi

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T° c	23	17.2	13	10	7.2	10	11.02	13.24	18.2	24.1	27	28.1
P*	29.68	58.03	77.15	75.27	65.15	45.93	66.51	51.92	28.56	16.33	4.35	6
i	9.86	6.38	4.19	2.82	1.72	2.82	3.27	4.30	6.94	10.58	12.54	13.32

ETP	109.64	57.14	28.85	17.01	9.98	17.01	22.47	40.52	91.51	145.74	183.87	195.69
ETR	29.68	57.14	28.85	17.01	9.98	17.01	22.47	40.52	91.51	61.15	4.35	6
RFU	0	0	48.30	100	100	100	100	100	37.05	0	0	0
EXE	0	0	0	6.56	55.17	28.92	44.04	11.40	0	0	0	0
D A	79.96	0	0	0	0	0	0	0	0	92.36	179.52	189.69

Tableau n° 18 : Bilan hydrologique Station de Medjez Amar

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T°c	21..2	19.06	14.36	11.6	8.4	10..24	11..88	14..50	19..91	24	26.65	27..56
P*	35.85	49.02	68.43	93.39	90.80	72.25	60.59	47.86	36.52	18.05	6.57	9.20
i	8.73	7.44	4.86	3.53	2.17	2.93	3.66	4.93	7.94	10.51	12.20	12.94
ETP	91.73	65.36	31.99	20.19	11.16	17.86	30.70	49.94	102.74	145.98	175.18	175.55
ETR	35.87	49.02	31.99	20.19	11.16	17.86	30.70	49.94	102.74	52.49	6.67	9.20
RFU	0	0	36.44	100	100	100	100	97.92	31.70	0	0	0
EXE	0	0	0	9.73	79.64	54.49	91.92	29.89	0	0	0	0
DA	55.86	16.34	0	0	0	0	0	0	0	93.49	168.61	166.35

la validité des valeurs de chaque bilan est vérifiée par l'équation

$$E.T.R. = E.T.P. - \text{Déficit agricole} = P - \text{Excédent} \quad (16)$$

L' E.T.R. annuelle est estimée à 419.06 mm pour la partie nord du bassin tandis qu'au sud, elle est estimée à 385.45mm.

Le déficit agricole débute au mois de mai et s'étend jusqu'au mois d'octobre.

La réserve utile commence à se reconstituer à partir du mois de novembre et atteint son maximum à partir du mois de janvier à avril. De décembre à avril un excédent est dégagé.

2.10 RUISSELLEMENT ET ESTIMATION DU BILAN HYDROLOGIQUE

Pour l'estimation de l'écoulement, l'application de la formule de Tixeront-Berkaloff est habituellement utilisée en Algérie pour des régions où les précipitations sont inférieures à 600 mm, et l'erreur sur la moyenne des précipitations est inférieure à 10%. Aussi cette méthode empirique ne fait qu'augmenter les erreurs et nécessite donc des corrections par l'installation des cases lysimétriques. Le défaut de la méthode consiste en ce qu'elle ne tient pas compte de la nature du sol ou formations traversées.

$$R = \frac{P^3}{3E^2} \quad (m) \quad (17)$$

Cette relation n'est pas applicable pour notre cas, du fait que l'erreur sur la moyenne est supérieure à 10%. De plus, pour des petits bassins, il faut faire des corrections en fonction de la nature des terrains et de leurs superficies. Pour approcher le ruissellement, on est amené à appliquer la formule « D.G.R.E » élaborée par (GHORBEL. A., 1991 in Majour 1997) et se base sur une corrélation de la lame d'eau ruisselée annuelle et de la pluviométrie moyenne sur plusieurs bassins contrôlés. De cette corrélation, se dégage trois groupes de bassins ayant des comportements différents du point de vue écoulement :

Le premier , peu ruisselant

Le deuxième, moyennement ruisselant .

Le dernier , très ruisselant

Les équations de regression ajustées aux trois groupes sont :

$$G_1 \rightarrow R_e = 0.26 P - 80 \quad (18a)$$

$$G_2 \rightarrow R_e = 0.26 P \quad (18b)$$

$$G_3 \rightarrow R_e = 0.26 P + 150 \quad (18c)$$

Le problème rencontré quant à l'application de cette formule réside dans le fait que pour un bassin donné, les différents sous bassins n'appartiennent pas au même groupe car ils sont différenciés par la nature géologique et pédologique qui font eux-mêmes différencier le ruissellement.

Pour résoudre le problème, (GHORBEL. A., 1991) a essayé une corrélation entre le pourcentage cumulé des formations du quaternaire et des alluvions et l'écart de la lame d'eau écoulee observée et celle calculée par la formule du second groupe ($R_e = 0,26 P$). Les corrections des lames ruisselées sont représentées dans le tableau suivant.

Tableau n°19 : Valeurs de correction de C des lames ruisselées

Quaternaire et alluvions (%)	0	1-2	3-5	5-7	7-22	22-26	26-30	>30
C	+150	+120	+80	+40	+6	-20	-30	-80

La région d'étude est caractérisée par des formations alluvionnaires du quaternaire au Nord, et des calcaires crétacés et éocènes au Sud en présence du quaternaire d'une manière assez réduite par rapport au Nord du bassin.

L'application des formules du premier et du deuxième groupes sont applicables pour notre cas.

$$R_e = 0.26P - 80 \text{ et } R_e = 0.26P - 30 \quad (18 \text{ d})$$

De ces résultats, il ressort que l'excédent est supérieur au ruissellement ce qui permet d'affirmer que l'infiltration l'emporte sur le ruissellement d'une part, et que l'alimentation des nappes de la région de Guelma se fait essentiellement par les précipitations.

L'équation classique du bilan à la surface du sol est la suivante :

$$P = ETR + R_e + I \quad (18e)$$

Avec

P = précipitation annuelle en mm déterminée à partir du bilan d'eau

ETR = évapotranspiration réelle en mm

R_e = ruissellement en mm

Les paramètres du bilan sont consignés dans les tableaux (14 à 19). Pour une ETR moyenne de 419.31mm et une hauteur de pluie moyenne de 574.33 mm, il leur correspondent :

- un ruissellement calculé de 62.31mm
 - une infiltration de 65.71 mm pour le versant Nord du bassin
 - 135.69 mm de lame d'eau écoulée, une infiltration de 36.75 mm
 - une ETR de 385.45mm
 - et une pluie de 530 mm.

2.11 CONCLUSION

Malgré sa proximité de la mer surtout la partie Nord du sous bassin, la région est caractérisée par un climat presque semi-aride où les précipitations sont estimées à l'échelle du sous-bassin à 547.33 mm pour la période allant de 1972/1973 à 2002/2003 au nord du bassin et de 530 mm au versant Sud -Est.

La répartition des pluies est irrégulière, ceci est dû à la sécheresse qu'a connue la région depuis plus de deux décades.

L'évapotranspiration réelle calculée par la méthode de Thornthwaite est estimée à l'échelle des sous-bassin 419.31 mm au nord et 385.45 mm au sud. Ce phénomène est limité surtout en hiver où la période hivernale coïncide avec la période des pluies. Elle atteint son paroxysme surtout au mois d'août.

Malgré sa caractéristique semi-aride, la partie sud du bassin présente une infiltration proche de 36 mm où affleurent les calcaires crétacés et éocènes qui présentent une bonne perméabilité de fissures.

CHAPITRE 3 : HYDROGEOLOGIE

3.1 LES GRANDS ENSEMBLES HYDROGEOLOGIQUE

La région de Guelma est constituée par des terrains d'âge crétacé, oligocène, mio-pliocène, éocène, paléocène et quaternaire. Le fond du bassin de Guelma est un géosynclinal comblé par des argiles marno-calcaires, des grès et de calcaires lacustres. Les formations numidiennes se développent largement au Sud et occupent la partie montagneuse de la Mahouna et apparaît en lambeaux par endroits de Ben Smih.

Plus au Sud et au Sud-Est, les bandes calcaires crétacés et éocènes d'épaisseurs importantes affleurent à Sidi Abdelmalek à kef-Rih-djebel Bardou. Ces calcaires sont fortement fissurés, ce qui permet la constitution des ressources aquifères importantes, mais rapidement restituées.

Dans ce chapitre nous abordons séparément la nappe alluvionnaire et les sources du bassin de Guelma.

3.2 CAS DE LA NAPPE DE GUELMA

3.2.1 GEOMETRIE DE L'AQUIFERE

3.2.1.1 INTRODUCTION

En 1971, une étude géophysique par prospection électrique a été réalisée par la C.G.G (compagnie générale de géophysique) dans le bassin de Guelma, en vue de reconnaître et localiser les horizons aquifères.

Les sondages électriques ont été disposés suivant des profils Nord-Sud espacés d'environ 500 m à 700 m avec des sondages électriques distants de 500 m à 1km.

Les 238 sondages ont été réalisés dans la région, ont été répartis sur 50 profils géoélectriques. La campagne géophysique a été effectuée selon les lignes d'injection AB de 300 m. La profondeur d'investigation moyenne est 150 m.

Dans cette partie, après une synthèse des principales informations lithologiques obtenues séparément à partir des sondages mécaniques (figure 16) et les sondages électriques, nous rechercherons une corrélation entre profils géoélectriques et les coupes de forages (figure 17).

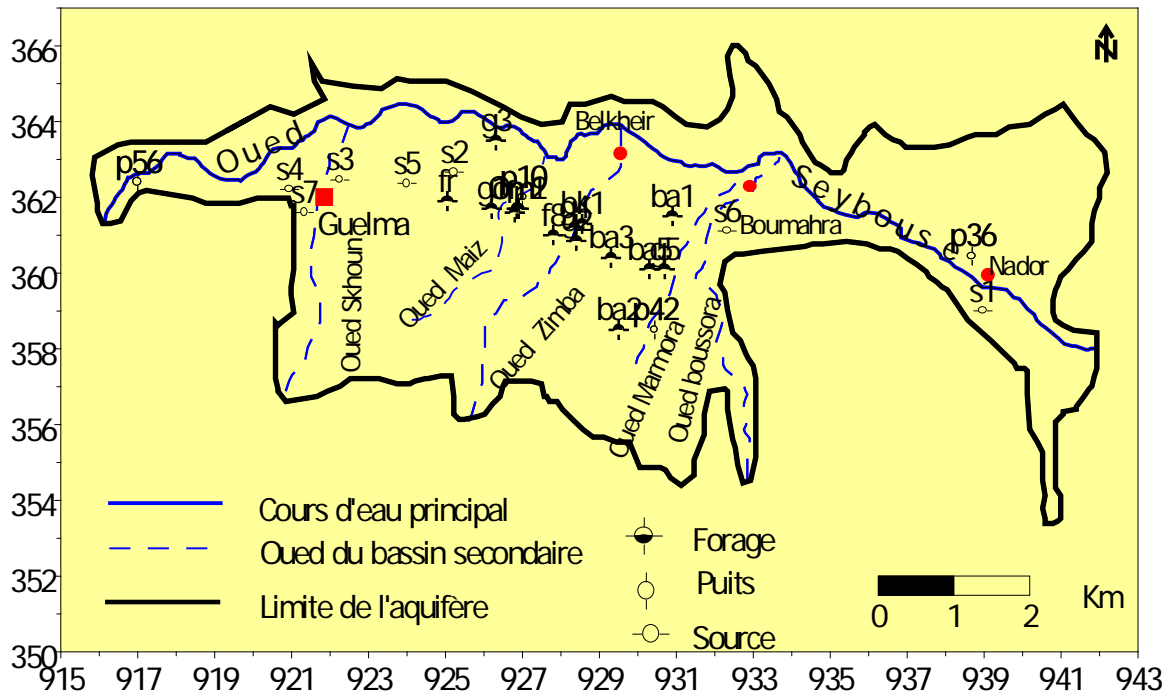


Figure 16 Carte d'implantation des points d'eau au niveau du sous bassin de Guelma

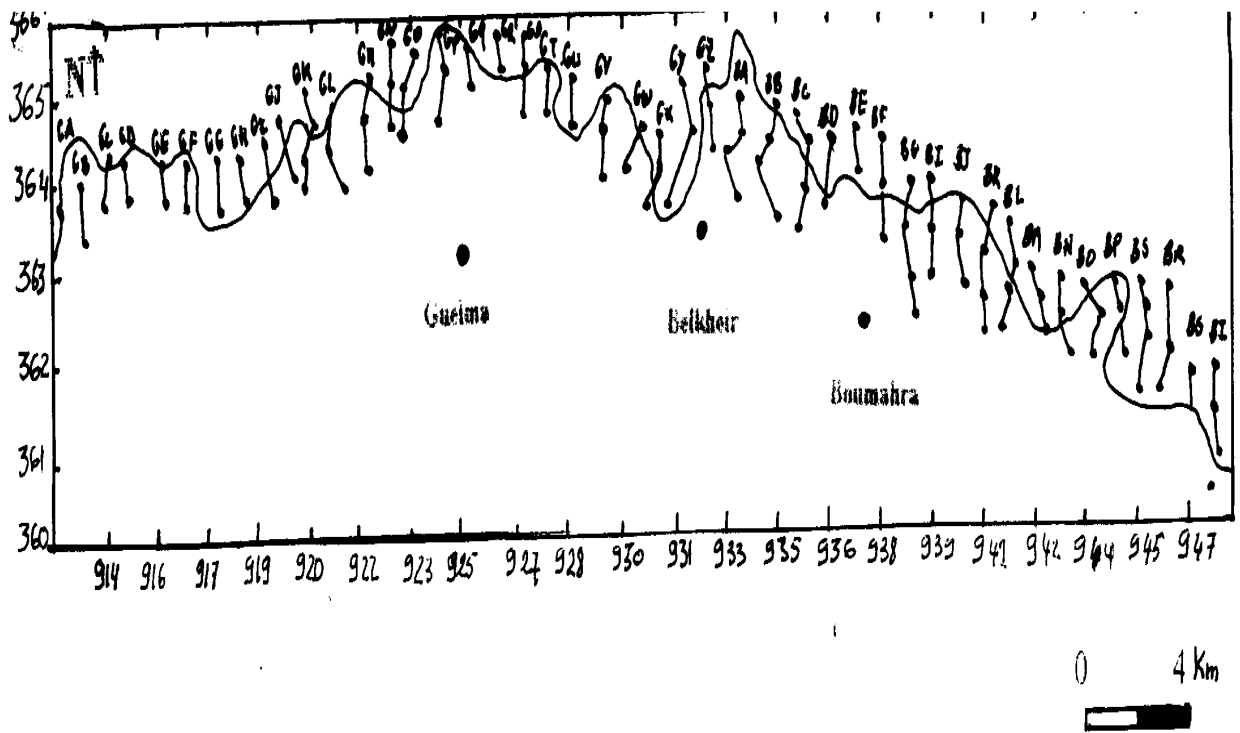


Figure 17 : Carte d'implantation de sondages électriques

3.2.2 INFORMATION FOURNIE PAR LES SONDAGES ELECTRIQUES

Trois types de diagrammes sont rencontrés dans le bassin :

Type1:

C'est le type le plus fréquent rencontré au niveau du bassin alluvial de la Seybouse (figure18) il indique:

- Un premier palier qui correspond aux limons argileux et sableux superficiels.
- Un second palier représenté par une cloche résistante ; il correspond à des alluvions grossiers (galets et parfois des niveaux gréseux du substratum). Il peut regrouper des terrains secs et des niveaux situés sous le niveau statique quand la partie imbibée est faible.
- Un troisième palier conducteur, représentant le substratum, correspond aux argiles gypseuses miocènes de quelques ohm-m ou à des intercalations argilo-gréseuses numidiennes de 15 ohm-m de résistivité.

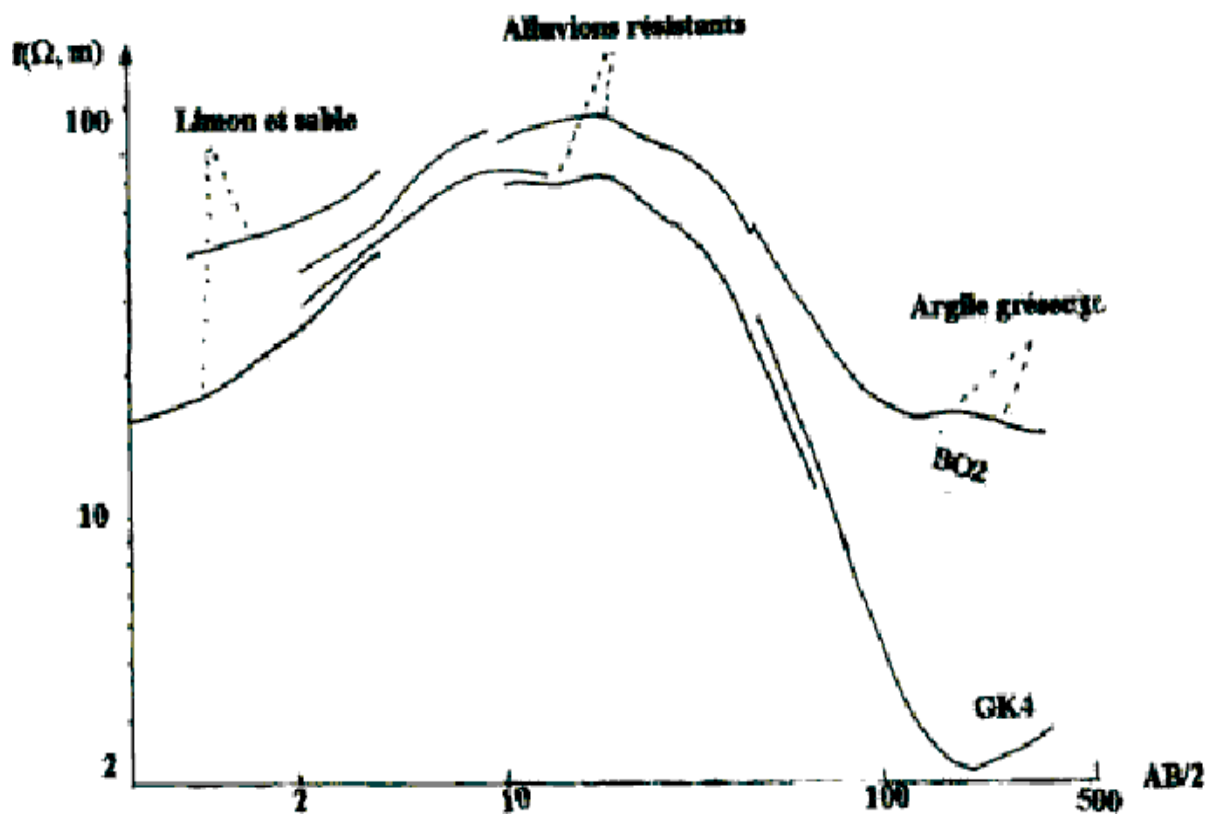


Figure 18 : Courbe de sondage électrique- type1

Type 2:

Ce type de sondage électrique qui touche la zone des terrasses du bassin (figure 19) est caractérisé par :

- Un horizon conducteur de surface, essentiellement limoneux.
- Un horizon en forme de cloche aplatie qui représente une succession de niveaux argileux à galets et graviers.
- Un substratum conducteur en général miocène.

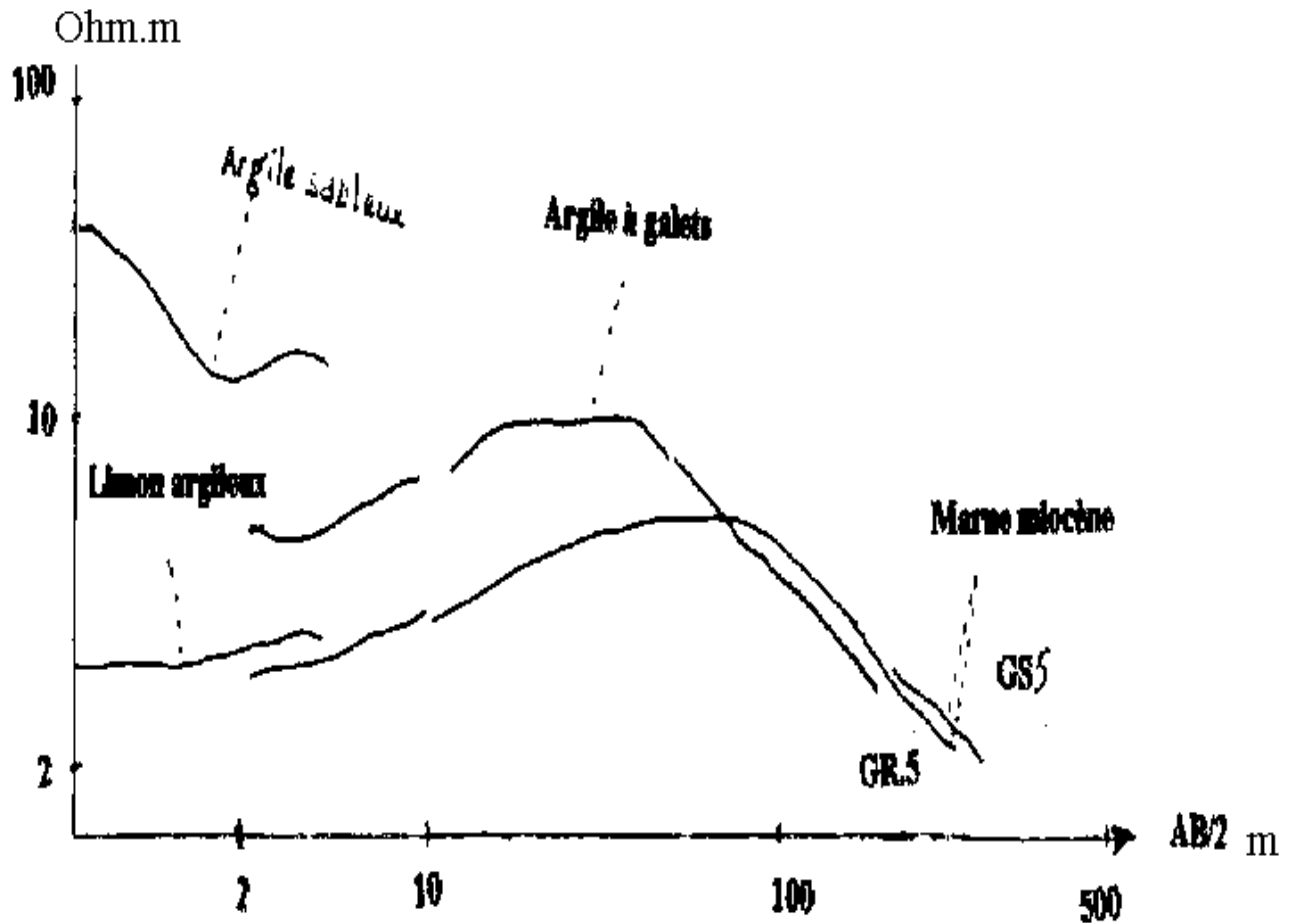


Figure 19 : Courbe de sondage électrique-type 2

Type3 :

Il est constitué (figure 20) par :

- Un horizon limoneux de surface réduite.
- Un niveau résistant très développé à forte résistance transversale.

Ce niveau correspond à une accumulation importante de galets et de graviers peu argileux attribués au plio-quadernaire.

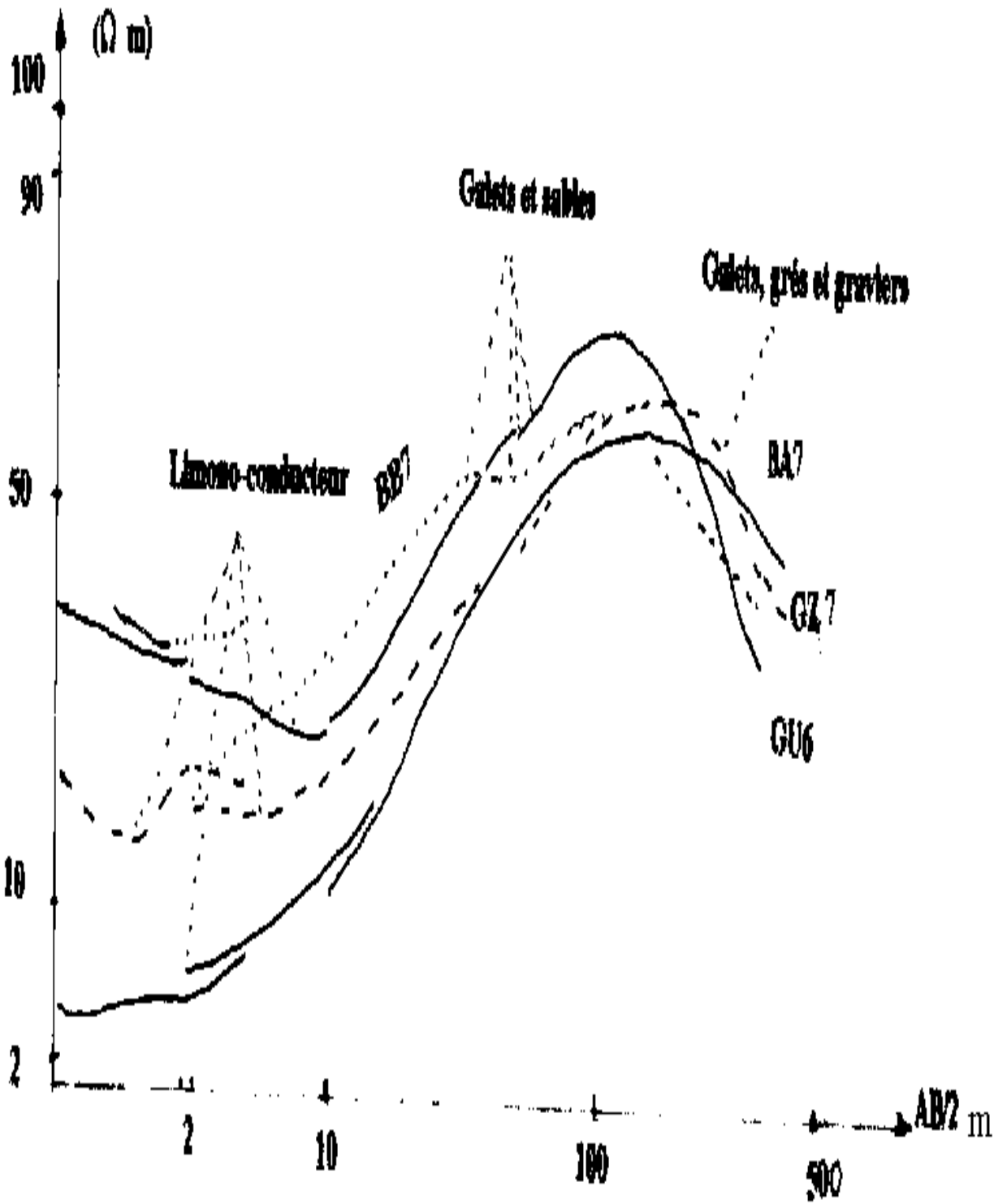


Figure 20 : Courbe de sondage électrique-type3

3.2.3 ESSAI DE CORRELATION GEOLOGIE-GEOPHYSIQUE

L'étalonnage est établi par l'emplacement des forages situés sur ou à proximité des sondages électriques. On constate ainsi une bonne corrélation entre les profils géoélectriques et les coupes de forages. Selon les numéros 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 11 à 15 (Tableau 20).

Il convient ainsi de remarquer que ces profils montrent :

- Un palier initial de 8-20 ohm-m, qui correspond aux argiles jaunes, brunes et rougeâtres ou parfois des marnes et de tufs calcaires.

- Un second palier de 30-70ohm-m, situé à une profondeur de 20 à 40 m ; il correspond au niveau de galets gréseux enrobés d'argiles. Les résistivités peuvent varier cependant de 30 à 140 ohm-m.

Tableau n°20: Etalonnage entre géologie et géophysique

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Forage	F1	E9	F8	ZX	F9	E12	E10	P5	P6	F10	SS	G1	EB	P4	G6
S.E	GS	GZ	GZ	BZ	GT	GQ	BQ	GP	GS	GR	GT	GI	BI	BG	GY
N° S.E	6	9	4	8	6	4	4	3	4	6	6	5	4	3	3

- Un palier final, de résistivité de 80 ohms-m, correspond au niveau de graviers et de galets avec parfois des passées argileuses comprises entre 31 et 55 m de profondeur.

L'observation géo-électrique BI et BW (annexe1) permet d'affecter la gamme des résistivités de 50 à 80 ohm-m aux graviers et galets qui présentent une lithologie assez homogène. Par ailleurs les coupes (annexe2 et annexe 3) permettent de déceler une gamme des résistivités affectant les formation alluvionnaire grossières de 200 à 800

ohm-m pour le niveau sec et 70 à 150 ohm-m pour le niveau humide. Le tableau 21 condense les résultats obtenus.

Tableau n° 21 : Valeurs des résistivités ohm-m

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Forage	G 3	E12	SS	E8	P6	P4	P5	E9	E5	F9	F11	F7
Nature lithologique												
Terre végétale				10	15	10	10	10				8
Argiles sableuses et calcaires		40										
Argiles sableuses		40								15	8	8
Argiles et graviers		40						70	80		40	
Argiles		10	8				1	10	8			
Galets			50		40					110		
Sables et calcaires					40		60					80
Sables, graviers et galets	2 0 0											
Sables et graviers						60						
Graviers					40			80				
Nodules de calcaires et de graviers				70								
Mélange d'argiles, calcaires et travertins		40										
Galets et graviers				70				80	80		100	
Marnes à gypse et graviers	8	10		8								
Marnes sableuses				8								
Marnes à gypse	8				10	15						

Pour les forages P4, P5, F7, et E5, la correspondance entre coupes géoélectriques et la coupe sondeuse semble meilleure avec une erreur de plus au moins 1 m.

3.2.4. SYNTHÈSE DES CORRESPONDANCES RESISTIVITE-LITHOLOGIE

L'échelle des résistivités est fixée selon la CGG (1971) :

-Alluvions plio-quaternaires :

- Niveau sec : $200 \leq \rho \leq 400$ ohm-m
- Niveau humide : $70 \leq \rho \leq 150$ ohm-m
- Sable et gravier : 10 à 200 ohm-m
- Sable et gravier à passées argileuses : 50 à 80 Ohm-m
- Limon sableux de 15 à 50 ohm-m
- Limon argileux de 80 à 10 ohm-m

Substratum miocène :

- Marno-calcaire de 15 à 30 ohm-m
- Marno-sulfo- gypseuse de 1 à 8 ohm-m

Substratum numidien :

- Argile de 10 à 48 ohm-m
- Argile gypseuse de 15 à 30 ohm-m
- Grès de 40 à 70 ohm-m

3.2.5 CONCLUSION

Le bassin de Guelma est constitué essentiellement d'un remplissage de matériaux alluvionnaires et détritiques, formés de galets, d'argiles limoneuses, graveleuses et de poudingues à ciments carbonatés.

L'orientation Nord-Ouest, Sud-Est de ces formations est liée à l'écoulement de l'ancien lit de la Seybouse qui a vu se développer un matériel grossier plus ou moins compact, de galets et conglomérats, une sédimentation fine surtout argileuse s'est déposée sur les bordures de la vallée. L'ensemble des formations aquifères se repose sur un substratum marneux.

La prospection électrique effectuée dans la région à mis en évidence l'importance de l'activité des oueds Maiz, Zimba, et Boussora qui ont formé des cônes de déjection.

En somme, les données de forages et sondages électriques ont permis de mettre en évidence un seuil marneux miocène séparant la vallée actuelle de la vallée ancienne située plus au Sud. Les figures 21 à 23 sont des coupes établies au travers des alluvions, permettant d'illustrer ces résultats.

Le profil de la figure 21, établi selon une orientation NE-SW, selon les 3 piézomètres et les données de résistivités montrent bien les différentes terrasses de la Seybouse, comme il montre un surcreusement du substratum marneux à la faveur d'un remplissage alluvionnaire. De même, les profils représentés par les figures 22 et 23, établis de la même manière, montrent un entaillement du substratum miocène. Ce dernier affleure en plusieurs endroits séparant la haute terrasse de la basse terrasse dans la région de Belkheir.

On note la présence de plusieurs sources qui apparaissent au niveau de ce seuil, marquant ainsi les séparations brusques des terrasses.

D'autre part, la géométrie du réservoir plio-quadernaire tient même du mode de dépôts des sédiments détritiques qui dépassent 200 m d'épaisseur au centre de la dépression. L'organisation de ces dépôts en séquence sédimentaires

et même en cycle, favorise l'existence de niveaux préférentiels d'écoulements communicants au sein d'une matrice argileuse. Ce système aquifère libre à semi-captif constitue une même unité hydrogéologique (homogène en grand). La nature du sol à deux principaux aspects; -i) une texture grossière (blocs de différentes tailles) près des bordures des oueds et des massifs polygéniques, et -ii) une texture plus ou moins fine constituée par des argiles, graviers, sables au centre, du gypse et sels au Nord de Guelma, qui s'étend jusqu'à l'ouest de Belkheir (BNEDER, 1984).

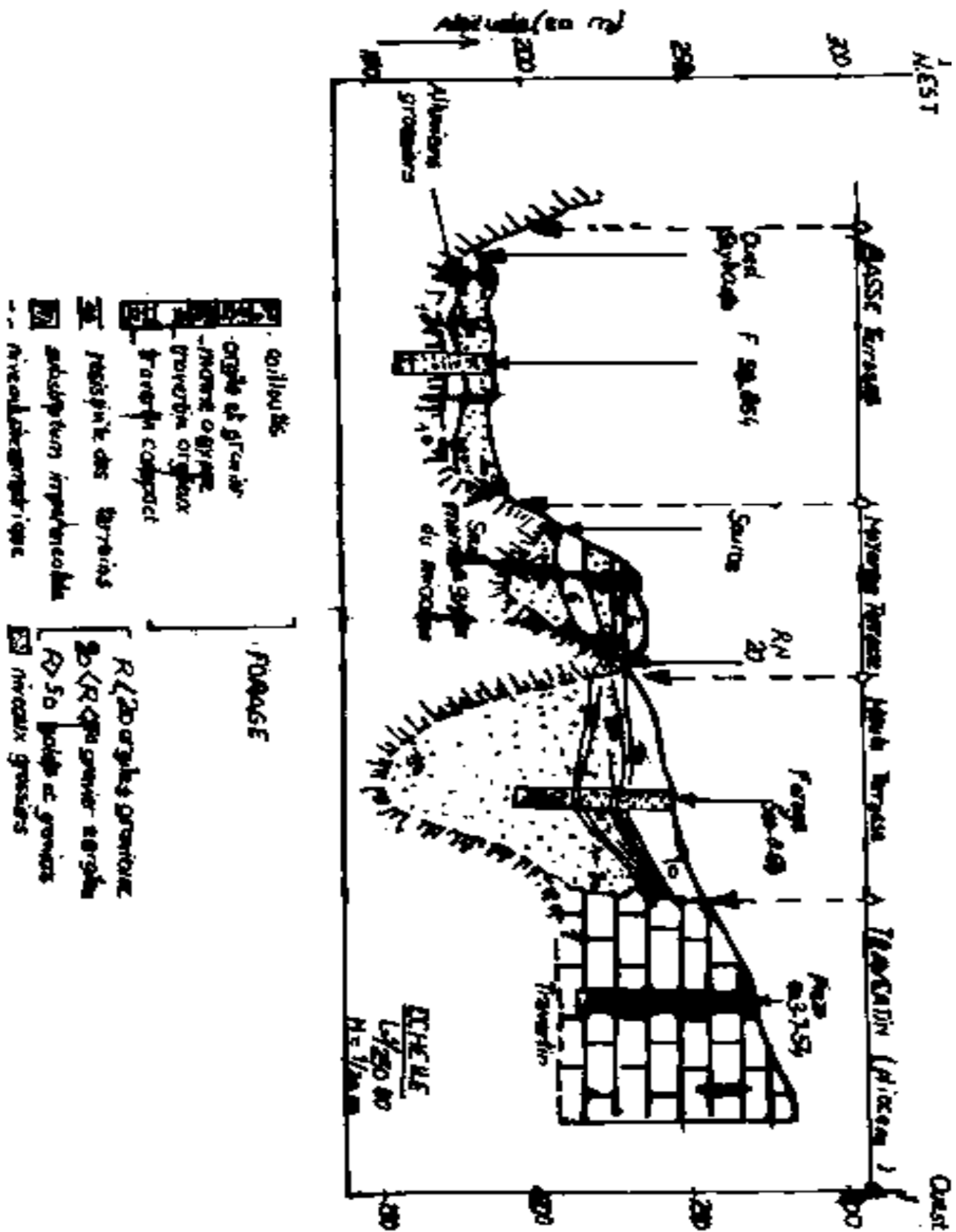


Figure 21 : Coupe montrant un seuil marneux à gypse séparant et relation alluvions et travertins

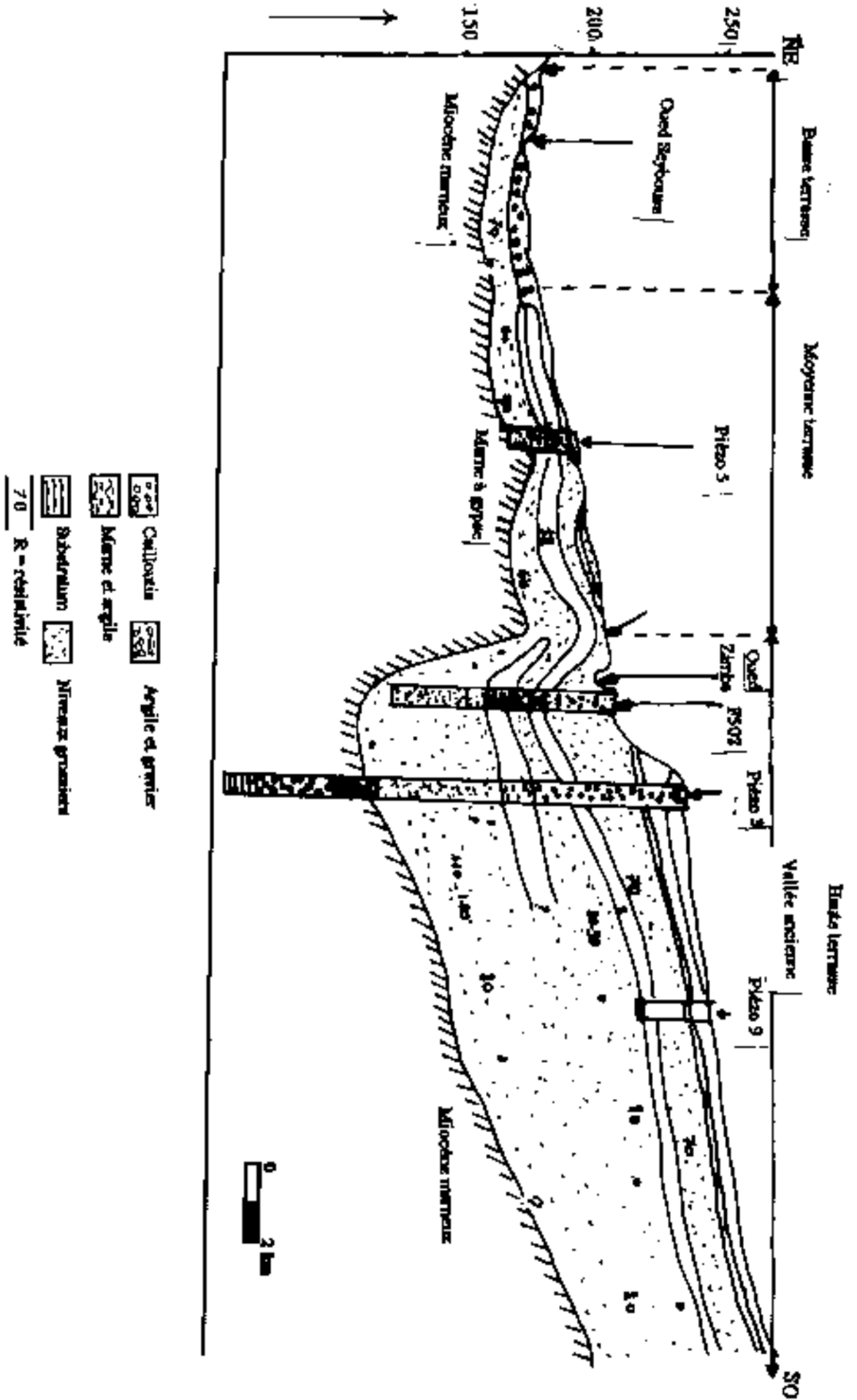


figure22 :Liaison entre vallée actuelle et ancienne par l'intermédiaire du quaternaire

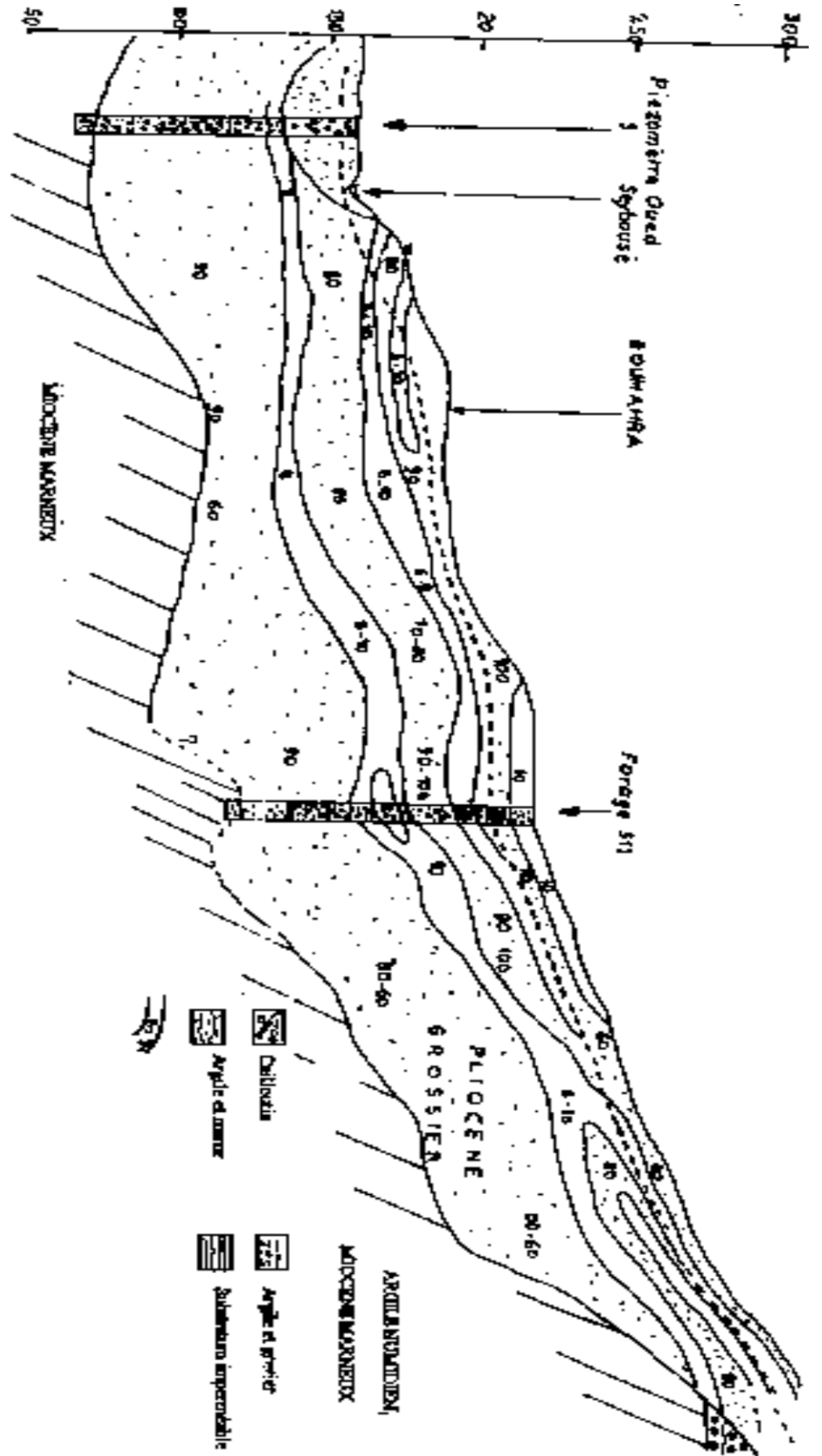


Fig. n°23 : Coupe montrant la liaison entre vallée actuelle et ancienne

3.3. PIEZOMETRIE

3.3.1 INTRODUCTION

La connaissance des états piézométriques (figure 24) de la nappe a été obtenue à partir de l'inventaire des 75 puits existants et ce pendant la période du mois d'août 2003. L'allure des cartes des différentes périodes établies par (ABDI. A., 1991), (Nouar. T., 1997) et (Djabri. L., 1998), est identique, ce qui a permis de donner une interprétation à la piézométrie d'août 2003.

La carte obtenue montre une structure complexe avec formation de dômes et de dépressions. Ces derniers seraient dus à l'apport externe, à l'alimentation ou à des prélèvements par la nappe profonde provoqués par les forages.

Par ailleurs les cartes montrent l'existence d'une ligne de partage des eaux séparant les écoulements vers l'Oued Skhoun et l'Oued Maiz, où ils seront différenciés. A l'Ouest, il est dirigé Sud-Nord et à l'est, il suit l'écoulement général de la Seybouse qui est sensiblement Ouest-Est. Quant au versant Nord, l'écoulement général est Nord - Sud et converge vers la Seybouse. Le changement brusque de la forme des courbes isopièzes serait probablement dû à l'importance de la perméabilité, à la section d'écoulement et à l'exploitation intense de la nappe dans d'autres. L'existence des concavités vers l'aval montre l'existence d'une zone d'alimentation et les concavités vers l'amont traduisent une zone de drainance.

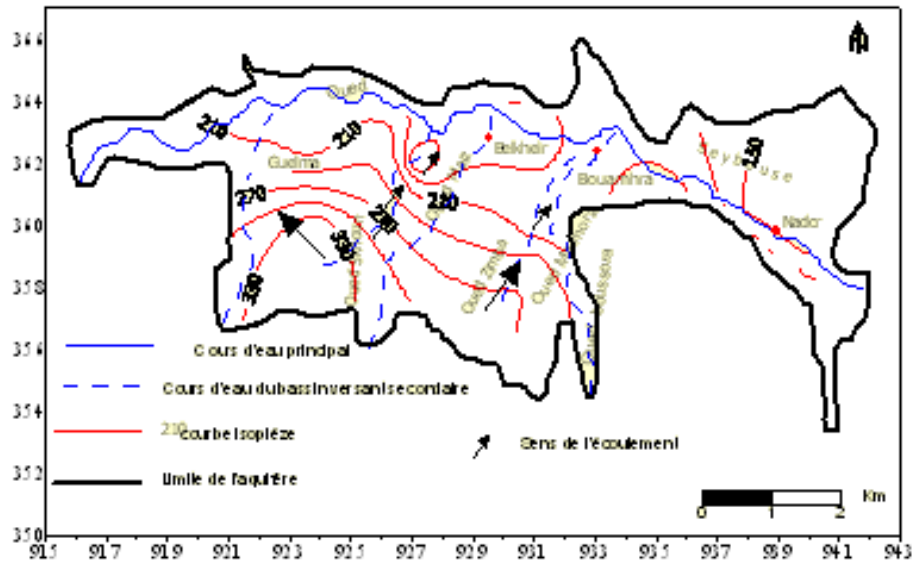


Figure 24 : Carte piézométrique août 2003

3.3.2 LES CONDITIONS AUX LIMITES

Il en ressort de l'interprétation de la carte piézométrique les conditions aux limites suivantes (figure 25) :

3.3.2.1 LIMITES EXTERNES

- Limites étanches : ce sont les contacts entre les terrains aquifères et les marnes à gypse du miocène avec les argiles numidiennes
- Limites de contact avec la molasse et grés du miocène : ces terrains sont peu perméables et drainés par l'oued Boussora et l'oued Marmora. Néanmoins, ils constituent une très faible zone d'alimentation.
- Limites d'alimentation : Sont représentées par les contacts avec les grés numidiens. Les fortes variations de niveau dans les ouvrages situés à proximité des affleurements indiquent leur rôle de zone d'alimentation.

3.3.2.2 SOUS LIMITES INTERNES

- Alimentation de la nappe des alluvions par les calcaires travertins et la molasse.

-Déversement de la nappe de haute terrasse en direction de l'Oued Boussora d'où l'apparition de plusieurs sources (Ain Zouaniz, Rosfa...) et déversement de la nappe sur le seuil marneux.

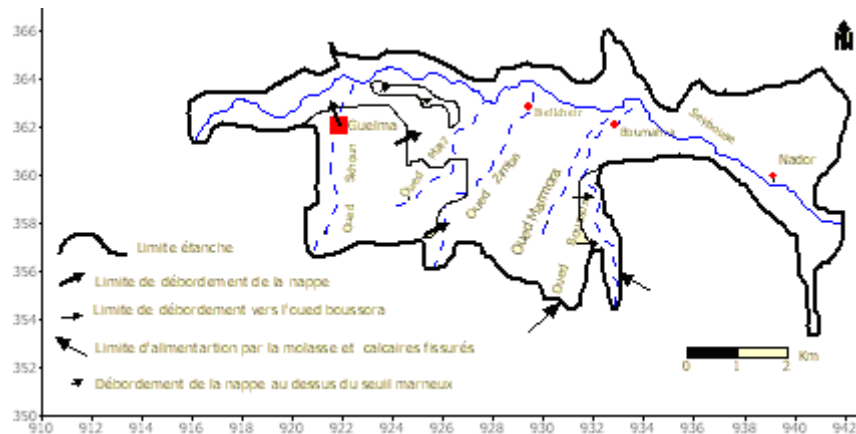


Figure 25 : Carte des conditions aux limites

3.3.3 INVENTAIRE DES POINTS D'EAU

La figure 26 représente l'inventaire officiel des forages réalisé par le ministère des ressources hydriques en 1999.

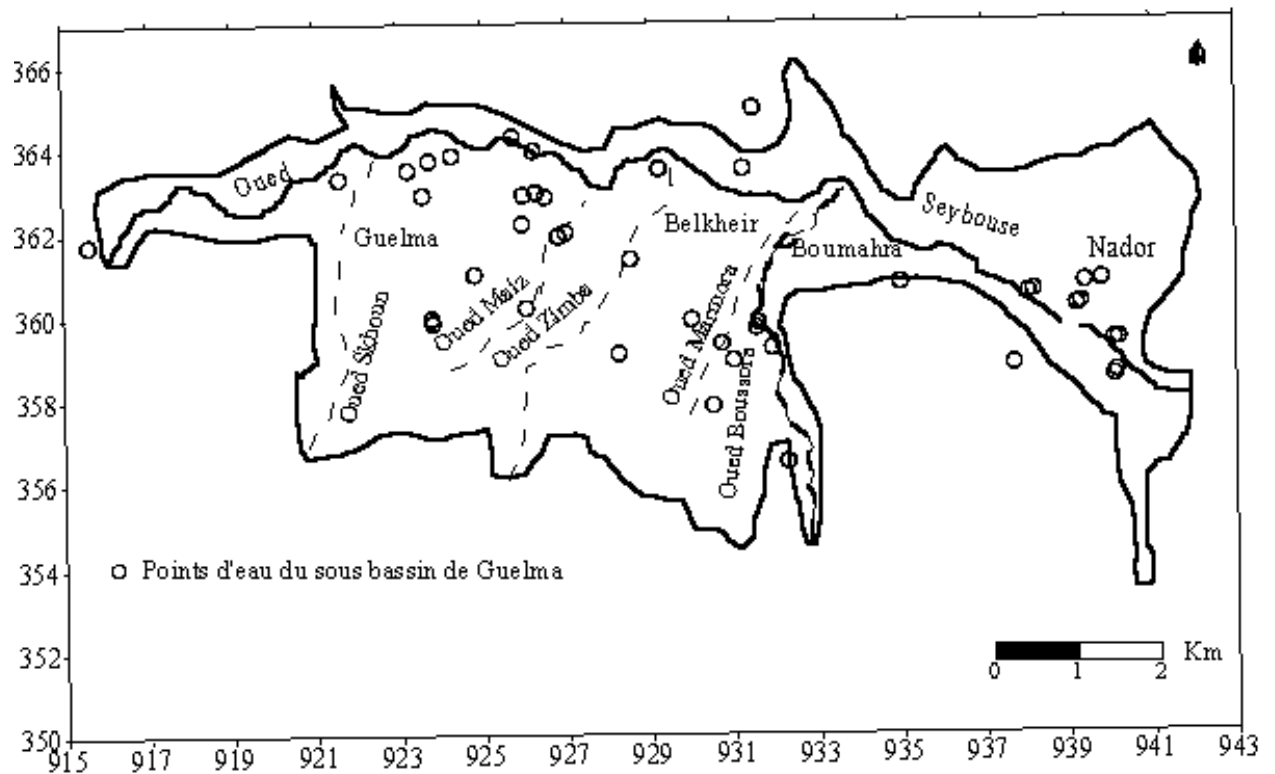


Figure 26 : Carte d'inventaire des points du sous bassin de Guelma

3.3.4 HYDRODYNAMIQUE

Nous essaierons dans ce paragraphe d'interpréter les données par pompage du forage oued Maiz réalisé dans l'aquifère d'alluvions à nappe libre. Les formations hydrogéologiques perméables sont constituées de sables, graviers et galets.

3.3.4.1 INTERPRETATION

Les données par pompage d'essai ont permis d'établir le graphique de la figure 27, qui montre des niveaux dynamiques normaux au cours des 100 premières minutes de pompage, qui se stabilise par la suite en raison de la proximité d'une limite d'alimentation. Cette limite est matérialisée par l'oued Maiz situé à 5 mètres du forage.

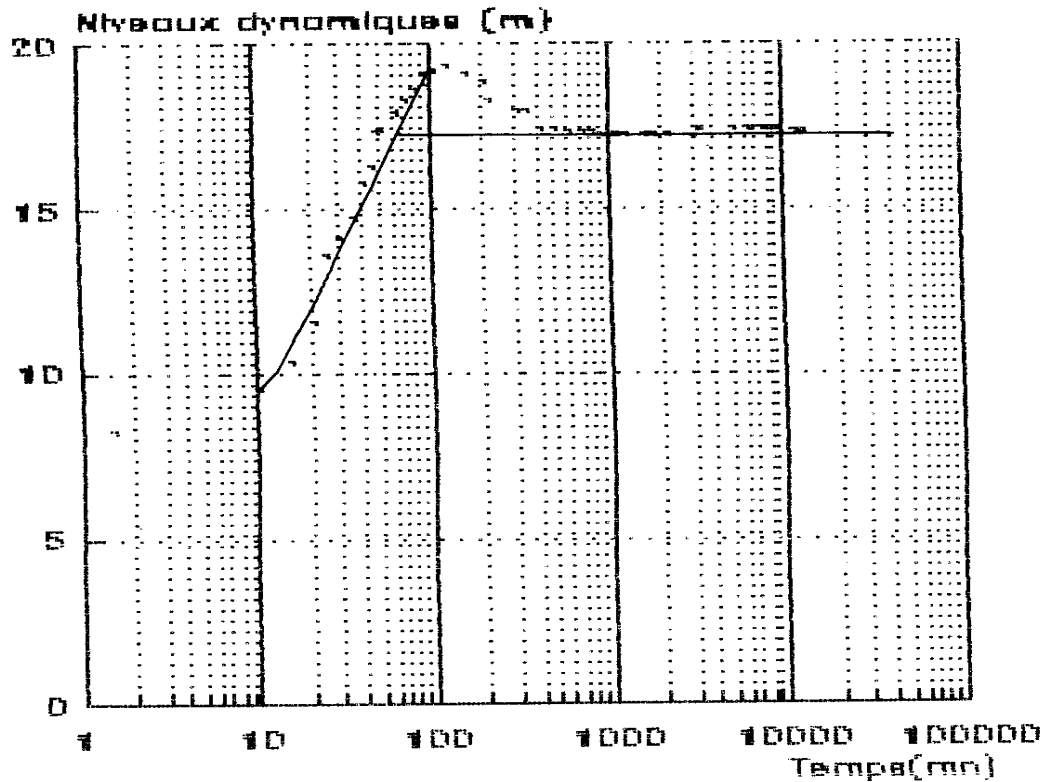


Figure 27 : Courbe de remontée

Les décrochements des niveaux observés entre 100 et 400 minutes, correspondraient sans doute au colmatage de la berge, ou à une diminution du débit de pompage.

Si l'on admet que le pompage se fait sur un aquifère limité par une ligne à niveau d'eau constant, on peut appliquer l'expression approximative de Jacob.

$$T = \frac{0.183Q}{C} \quad (19)$$

T = Transmissivité en m / s^2

Q = Débit de pompage en m^3 / s

C = Pente de la droite

Remarque : Tous les essais par pompage ont été interprétés par la méthode de Jacob et Schow pour les puits. Les résultats des essais sont consignés dans le tableau 22.

3.3.4.2 TRANSMISSIVITE ET PERMEABILITE

Les valeurs des transmissivités (figure 28) sont assez homogènes, elles sont de l'ordre de 10^{-3} m²/s. On note de fortes valeurs au Nord de l'axe Belkheir-Boumahra de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$ m²/s ; elles diminuent d'Ouest en Est et du Nord au Sud pour descendre jusqu'à $0.2 \cdot 10^{-3}$ m²/s. Cette décroissance est liée sans doute à la granulométrie des alluvions et à la trame argileuse. Au Nord les ouvrages captent des alluvions grossières (galets et graviers) dépourvues d'argiles. Ces formations font augmenter la perméabilité (figure 29) et par conséquent la transmissivité. Aussi, cette croissance serait probablement due au lessivage permanent des alluvions par les eaux causées par le drainage de la nappe par l'Oued Seybouse. Au sud, la décroissance des transmissivités et perméabilités (K de l'ordre de 10^{-5} m/s) est influencée par la trame argileuse et les épaisseurs mouillées importantes (tableau n°22).

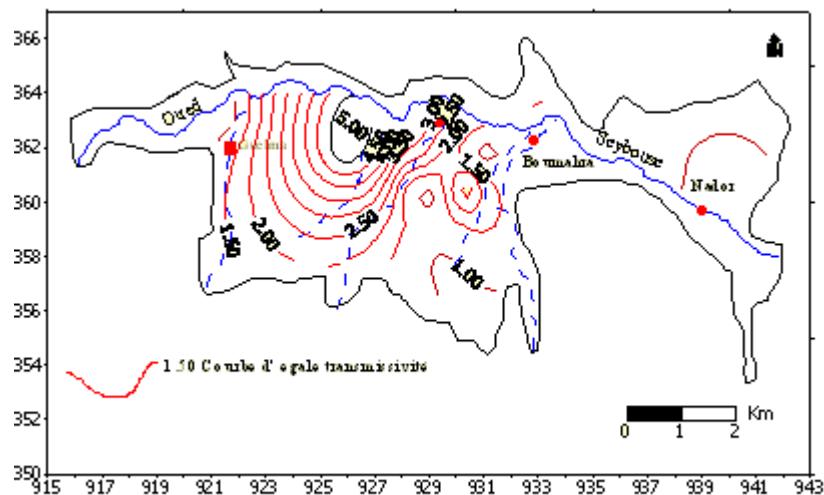


Figure 28 : Carte des transmissivités (10^{-3} m²/s)

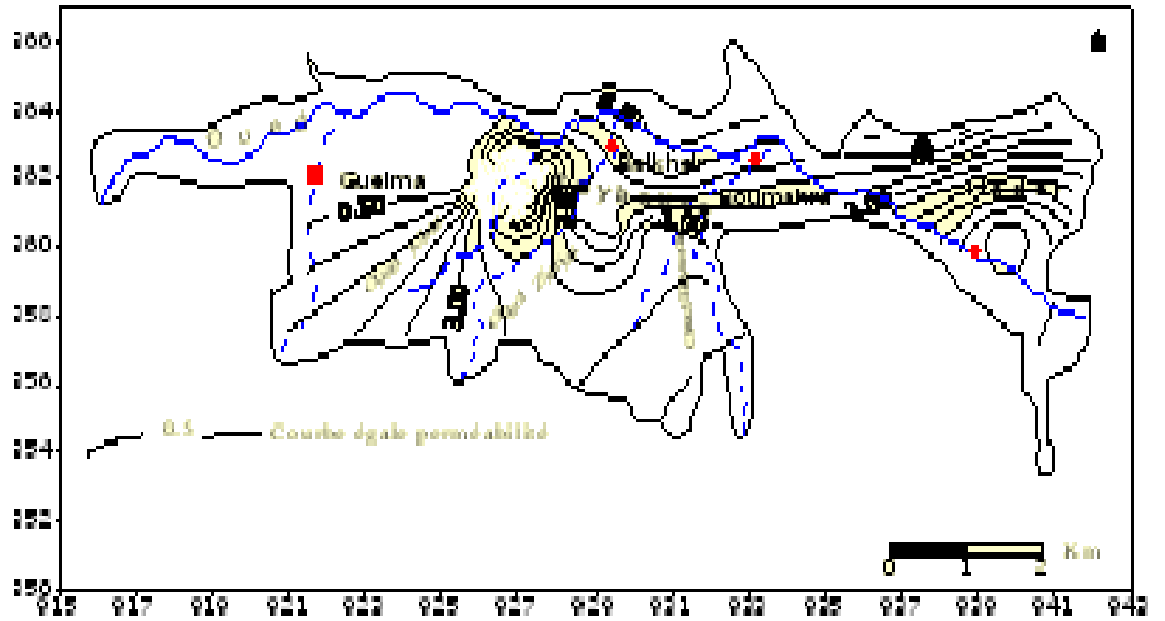


Figure 29 : Carte des perméabilités (10^{-5} m/s)

Tableau n°22 : Valeurs des essais par pompage

Code des points d'eau	X	Y	T. 10^{-3} m ² /s	Epaisseur (m)
BA2	925.500	358.500	0.91	60
BA3	929.300	360.400	1.10	53
G1	930.300	360.400	2.89	70
G2	928.400	361.200	1.00	59
G3	926.310	363.495	5.50	16
P36	940.150	358.600	1.50	4.30
G4	928.100	361.200	1.30	76.60
P35	938.100	360.650	1.10	8.46
F8	927.400	361.100	4.30	47
BK1	926.250	363.500	0.97	51.440
P7	939.500	360.500	0.51	7.9
P56	921.500	363.500	0.51	9
P42	931.50	363.500	0.23	5

3.5.4.3 LES EPAISSEURS MOUILLEES

Selon les cartes établies (figures 30 et 31) , les fortes épaisseurs et substratum profond sont localisés au centre du bassin avec un maximum de 75 m et 65 m, respectivement, et les valeurs minimales sont localisée aux flancs Est et Ouest.

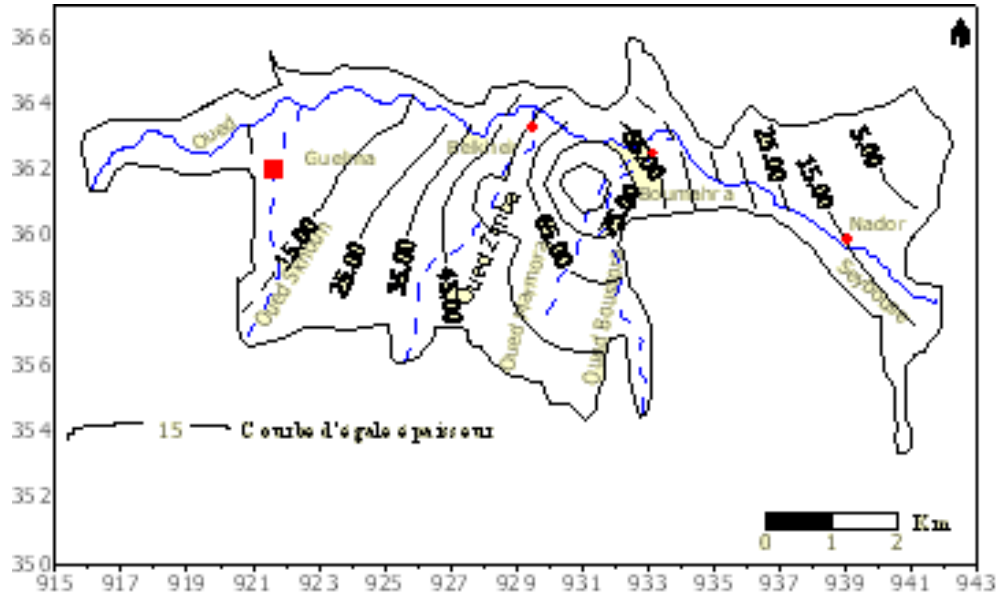


Figure 30 : Carte des épaisseurs de l'aquifère

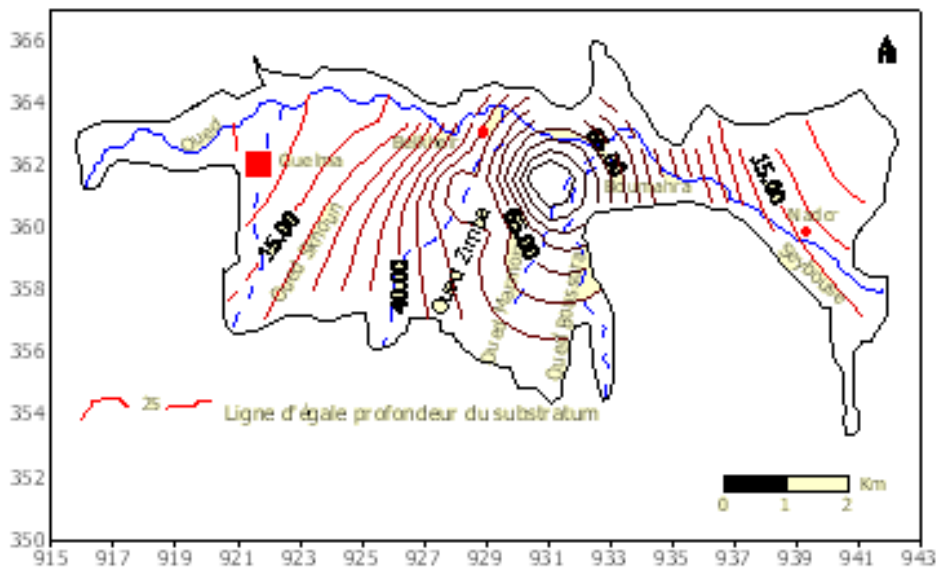


Figure 31 : Carte du substratum

3.4 ETUDE DE LA VULNERABILITE DE L'AQUIFERE

La nappe de Guelma est le seul réservoir important dans la région. Ce dernier se trouve actuellement très menacé par les rejets des eaux usées urbaines et agro-industrielles, qui sont déversées dans la nappe sans traitement par le biais des eaux d'irrigations prises de l'oued Seybouse qui draine toutes les eaux usées de la ville de Guelma et des villages situés aux alentours du bassin. Pour mettre en évidence la vulnérabilité de l'aquifère, nous avons appliqué la méthode DRASTIC.

3.4.1 METHODE DRASTIC

La méthode DRASTIC s'appuie sur l'étude des sept paramètres préconisés à savoir : profondeur de l'eau, recharge efficace, matériaux de l'aquifère, nature du sol, topographie, impact de la zone vadose, et conductivité électrique. Cette méthode s'avère un outil indispensable qui permet par la caractérisation des paramètres préconisés, d'aboutir à localiser les zones vulnérables. Ces paramètres sont liés à la géophysique (C.G.G,1972), la géologie (Vila, J.M., 1980), climatologique, hydrogéologie (Nouar.T, 2003), pédologie et topographie (B.NE.D.E.R., 1982) tableau 23.

Tableau n°23 : Evaluation des paramètres DRASTIC

Paramètre	Ressource d'information et méthode d'évaluation
Profondeur de la nappe	Banque de données (DHWGuelma) - Carte piézométrique (août 2003)
Recharge efficace	Données météorologiques (O.N.MS), station de Guelma - Estimation du bilan $I_e = P - ETR - R$
Milieu aquifère et impact de la zone vadose	Carte géologique (1/50.000) et note explicative. (Vila. J.M., 1980), Rapports géophysiques (CGG, 1972) et coupe de forages.
Type de sol	Carte pédologique (BNEDER. 1983)
Pente de terrain	Carte Topographique (1/50.000 et 1/25.000)
Conductivité électrique	Essai de pompage (DHW Guelma)

Du point de vue géologique, le bassin de Guelma est effondré à remplissage détritique plio-quadernaire avec un substratum marneux miocène. La géométrie de l'aquifère tient du mode même du dépôt détritique qui dépassent les 200m d'épaisseur. Cet aquifère libre sur presque toute son étendue et semi-captif au sud de Boumahra, constitue une même unité hydrogéologique et ne nécessite pas de découpage en zones. La nature du sol est d'une texture grossière (galets, graviers et sables) au centre et fine sur les bordures (argiles et sables limoneux).

3.6.2 ETABLISSEMENT DES CARTES DE VULNERABILITE

Les cartes thématiques ont été élaborées selon les procédures suivantes :

- Cartographie du contour de l'aquifère
- Etablissement des cartes de répartition de chaque indice sur le fond discrétisé (Carte du sol, carte de topographique, etc., ...), figure 32.

Pour chaque paramètre, les valeurs indicelles sont affectées (poids x cote) tableau 24. Les conditions favorables procurent des cotes faibles et les conditions défavorables (celles qui augmentent la vulnérabilité) procurent des cotes élevées.

La carte de synthèse est la superposition des sept cartes thématiques relatives aux paramètres DRASTIC. La vulnérabilité est estimée par l'indice DRASTIC, qui est un indice numérique représentant la somme pondérée des sept cotes correspondantes aux sept paramètres hydrogéologiques.

L'indice total est obtenu en multipliant la cote de chaque paramètre par son poids et en faisant la somme de ces produits :

$$ID = D_C \cdot D_P + R_C \cdot R_r + A_C \cdot A_P + S_C \cdot S_P + T_C \cdot T_P + I_C \cdot I_P + C_C \cdot C_P \quad (20)$$

L'indice ainsi calculé représente l'évaluation de risque de contamination d'une formation aquifère. Cependant, il faut signaler que la valeur de l'indice

DRASTIC est attribuée à la zone et non pas à son contour du fait que le logiciel utilisé s'avère inadapté au traitement des variations progressives des paramètres.

Tableau n°24a: Paramètres DRASTIC et leurs poids respectifs

Paramètres	Poids
Profondeur de L'eau	5
Recharge efficace	4
Matériaux de l'aquifère	3
Matériaux du sol	2
Pente du terrain	1
Impact de la zone vadose	5
Perméabilité	3

Tableau n°24b : Cotation pour la profondeur et la recharge efficace

Profondeur en (m)	
Intervalle	Cote
0 - 1.5	10
1.5 - 4.5	9
4.5 - 9.5	7
9.5 - 16	5
16 - 24	3
24 - 32	2
>32	1
Recharge efficace (cm/an)	
0 - 5	1
5 - 10	3
10 - 18	6
18 - 25	8
>25	9

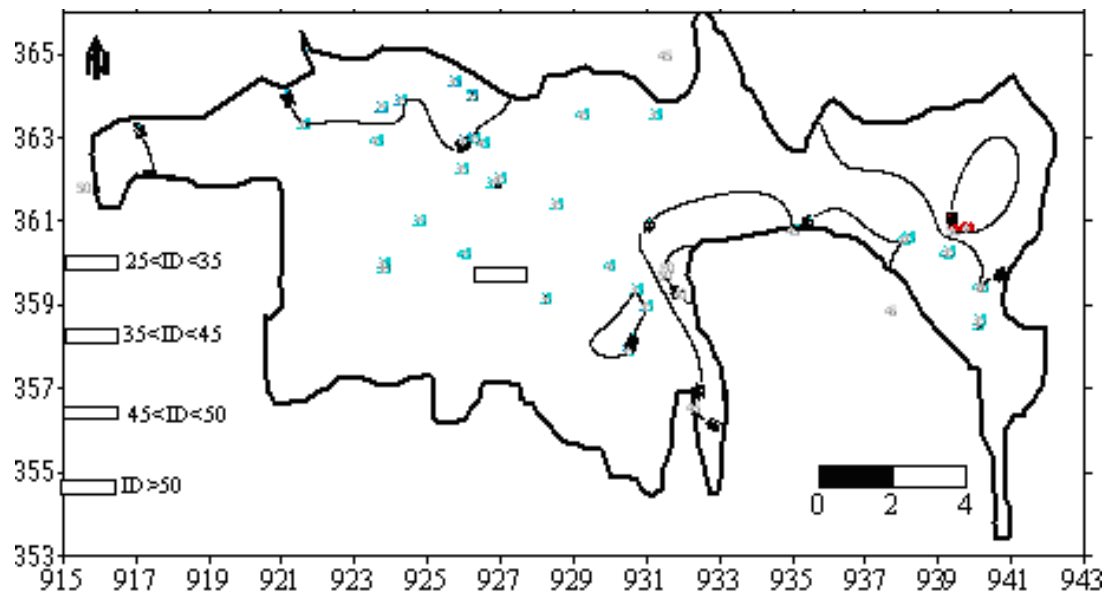


Fig n°32a: Carte de l'indice DRASTIC relatif à la profondeur

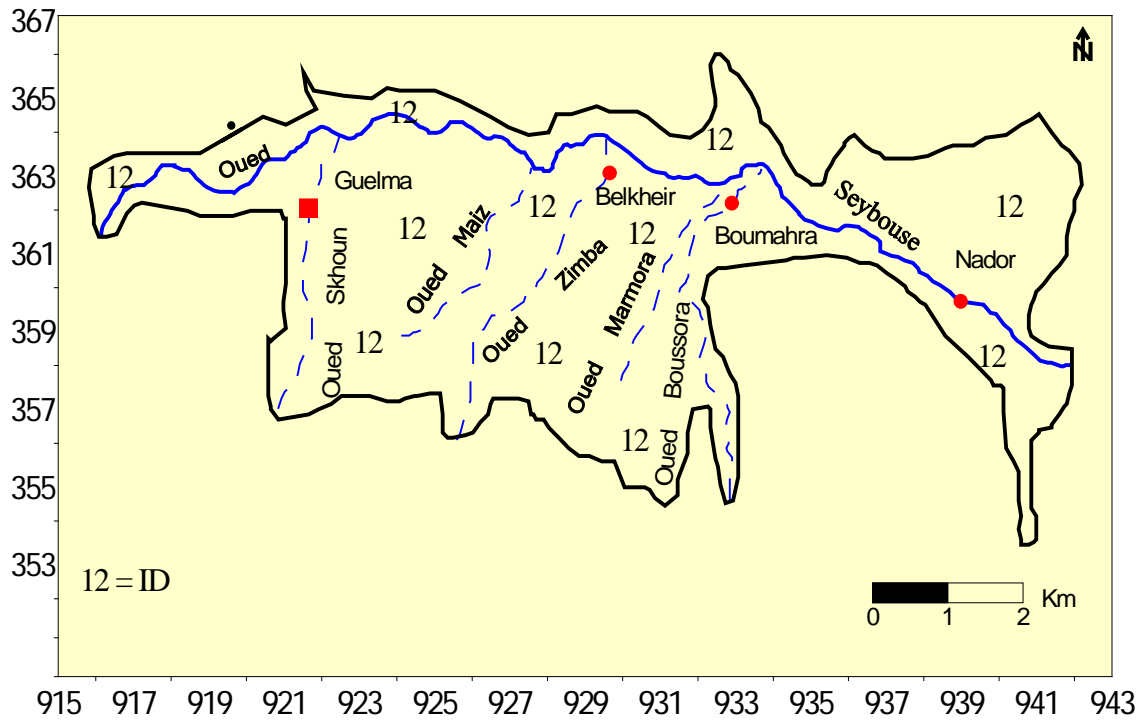


Figure 32b: Carte d'indice DRASTIC relatif à la recharge

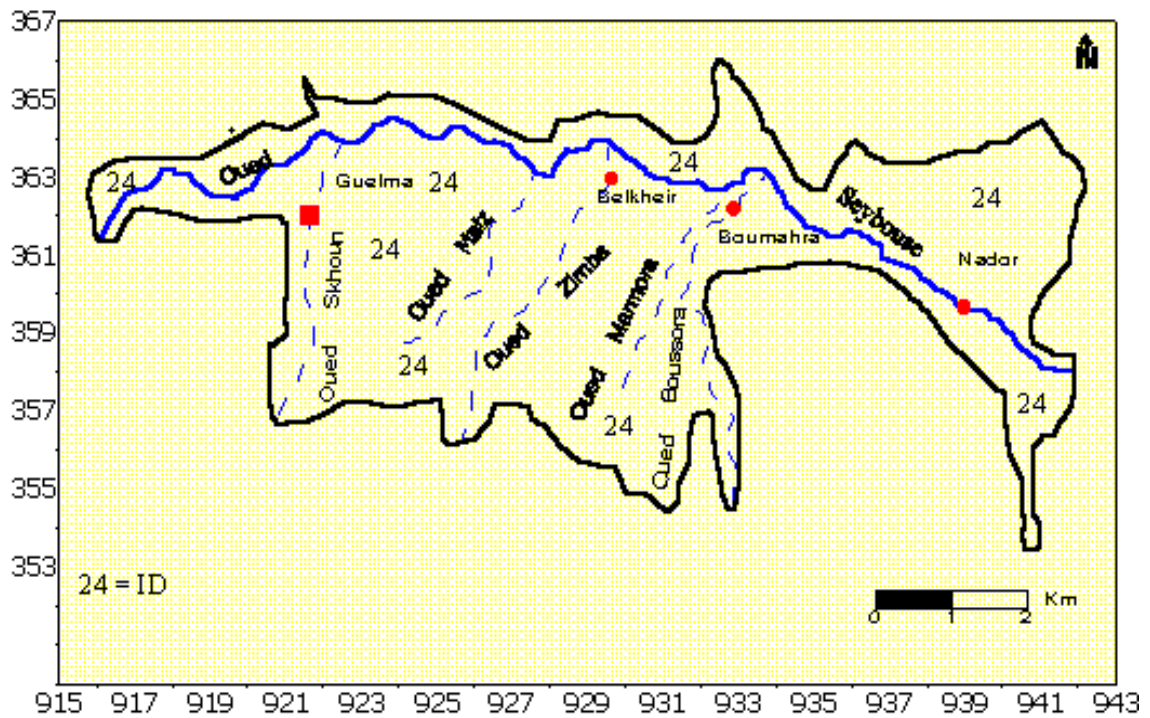


Figure 32c: Carte d'indice DRASTIC relatif aux matériaux de l'aquifère

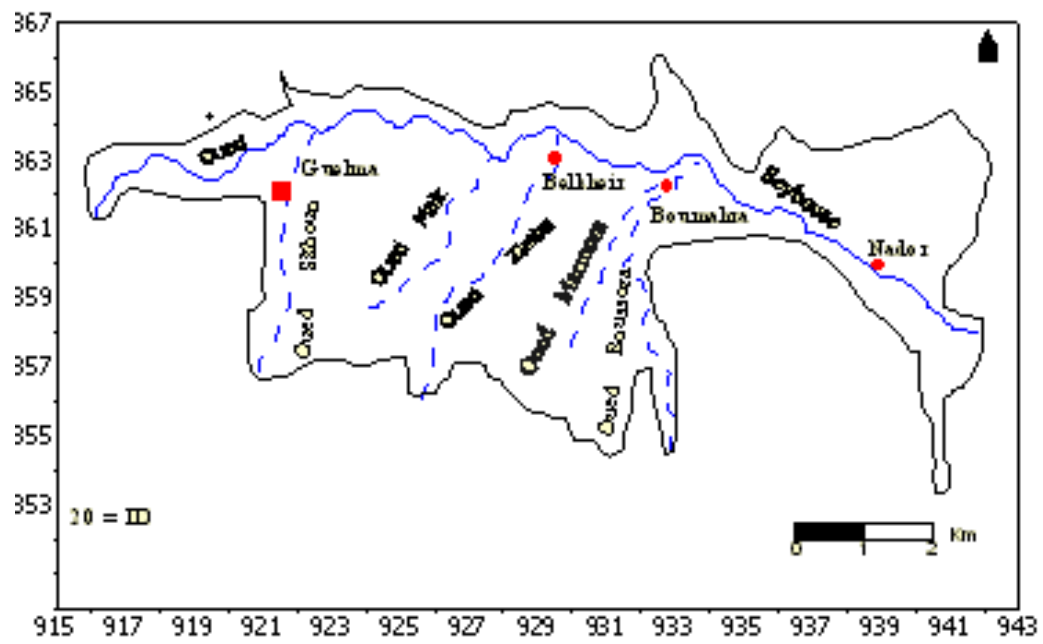


Figure 32a: Carte d'indice DRASTIC relatif au sol

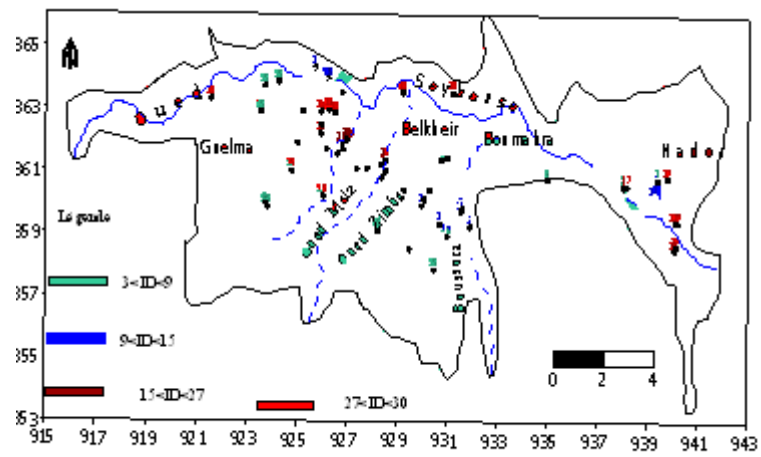


Figure 32b: Carte de l'indice DRASTIC relatif à la pente

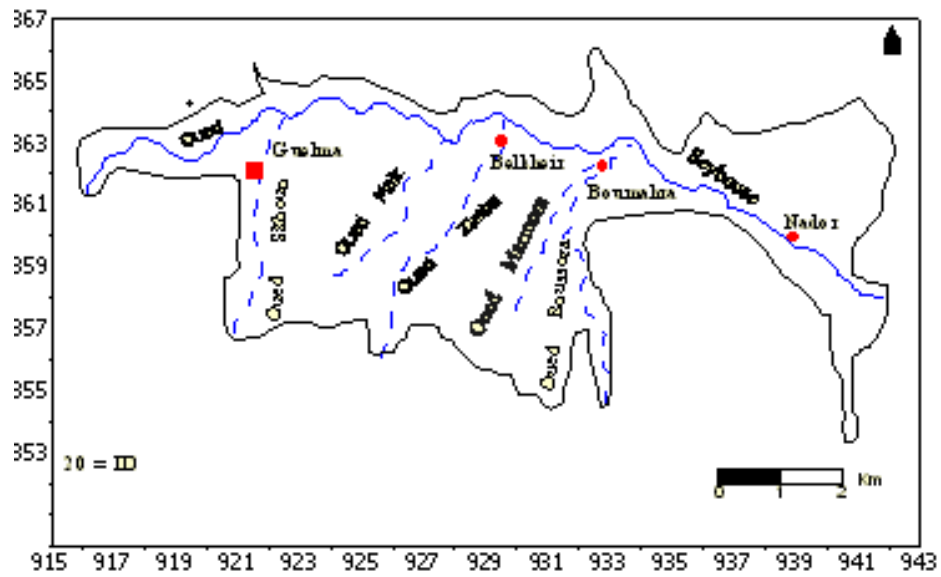


Figure 33d: Carte d'indice DRASTIC relatif au sol

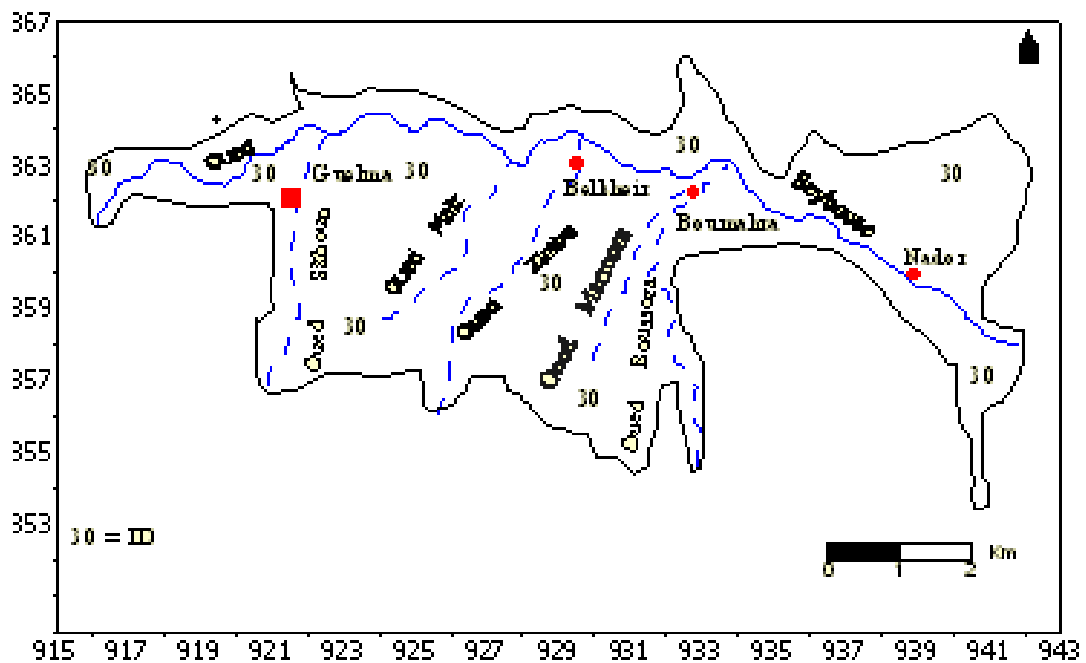


Figure 33f: Carte d'indice DRASTIC relatif à la zone vadose

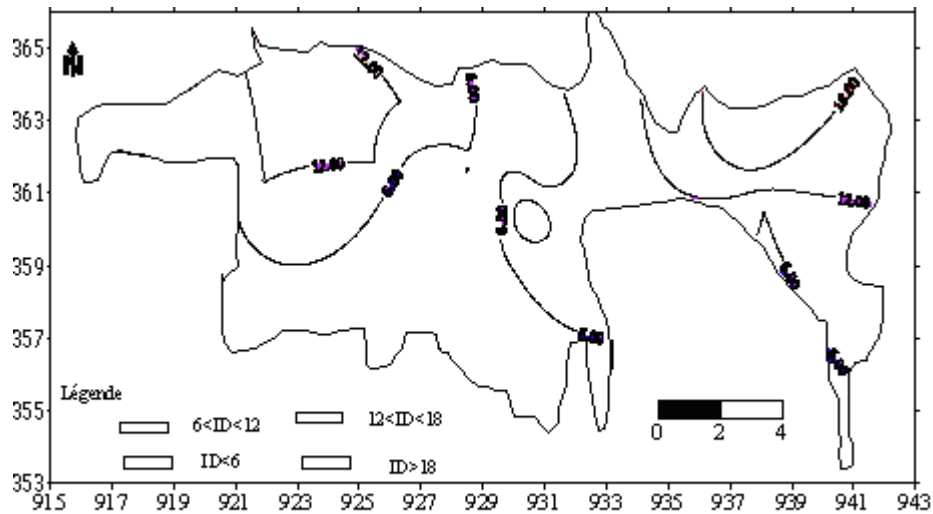


Fig.n° 32G: Carte de l'indice DRASTIC relatif à la perméabilité

3.4.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

3.4.3.1 CARTE DRASTIC GENERALE

Les cartes DRASTIC établies permettent de situer les zones potentielles à risque. Selon Isabel et al., 1990, *Le Menviq* 4 (Bulletin du ministère de l'environnement du Québec)* utilise les intervalles suivants:

$I < 100$ vulnérabilité faible

$100 < I < 150$ vulnérabilité moyenne

$I > 150$ vulnérabilité forte

Selon cette classification, la carte de vulnérabilité (figure 33) a permis de distinguer une première zone à forte vulnérabilité, aux endroits de Nador, au Nord de Belkheir et aux alentours de Guelma où l'indice DRASTIC varie entre 150 et 162. La seconde zone occupe le restant du bassin avec un indice variant entre 127 et 149.

Au niveau de la première zone (en rouge), la propagation du polluant à partir de la surface du sol est facilitée par la perméabilité des matériaux encaissant du lit de la rivière (blocs, galets, graviers et sable), par l'apport des eaux d'irrigation et par le pompage intensif des puits situés en bordure de la rivière Seybouse surtout en période sèche. De plus, la profondeur des puits et les terrains qui sont quasi-plats (pente de 3%) favorisant ainsi l'infiltration et par conséquent la contamination de l'aquifère dans ces endroits.

La seconde zone est de vulnérabilité moyenne ; où les ouvrages captant l'aquifère y sont profonds et la communication entre la nappe superficielle et la nappe profonde ne peut se faire que par phénomène de drainance là où les niveaux captés sont situés entre 10 et 70 m de profondeur.

L'analyse chimique des échantillons d'eau pris respectivement des puits, forages, sources et oueds confirment l'approche DRASTIC (voir chapitre hydrochimie).

3.4.3.2 CARTE DRASTIC DES PESTICIDES

De même, la carte des pesticides (figure 34) a fait ressortir deux zones :

- La première de forte vulnérabilité est d'extension Ouest–Est de part et d'autre de la Seybouse ; elle couvre une superficie de 45% de la surface totale avec des indices variant entre 152 et 170. L'analyse chimique sur les mêmes échantillons a montré des teneurs importantes en nitrates et phosphates dans cette zone. L'abondance de ces éléments est la conséquence de l'utilisation en quantité importante des engrais, là où l'agriculture intensive est pratiquée.

- La seconde zone de moyenne vulnérabilité est caractérisée par un indice variant de 130 à 150 ; le sol y est occupé par des cultures ne demandant pas beaucoup de

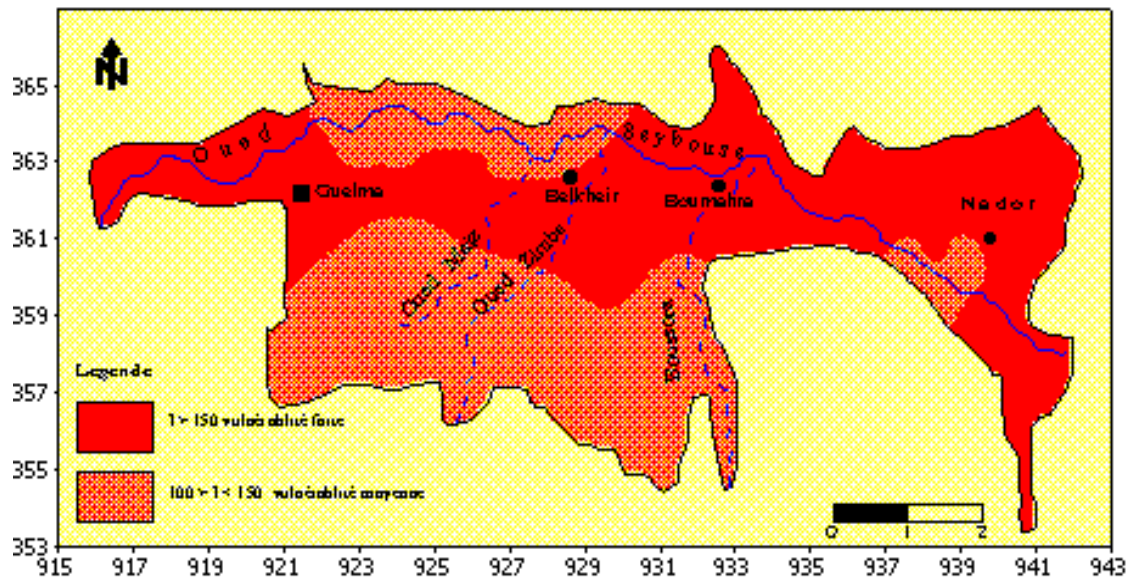


Figure 33b: carte de vulnérabilité DRASTIC relative aux pesticide fertilisants . La vulnérabilité serait importante surtout dans la partie centrale de la nappe où la rivière Seybouse et les différents cours d'eau issus du bassin gagnent, avec les rejets qu'ils véhiculent cette partie du bassin en réseau dense, ce qui accroisse plus encore les risques de contamination des ouvrages.

Comparativement à la DRASTIC générale, la DRASTIC pesticide donne des indices plus élevés.

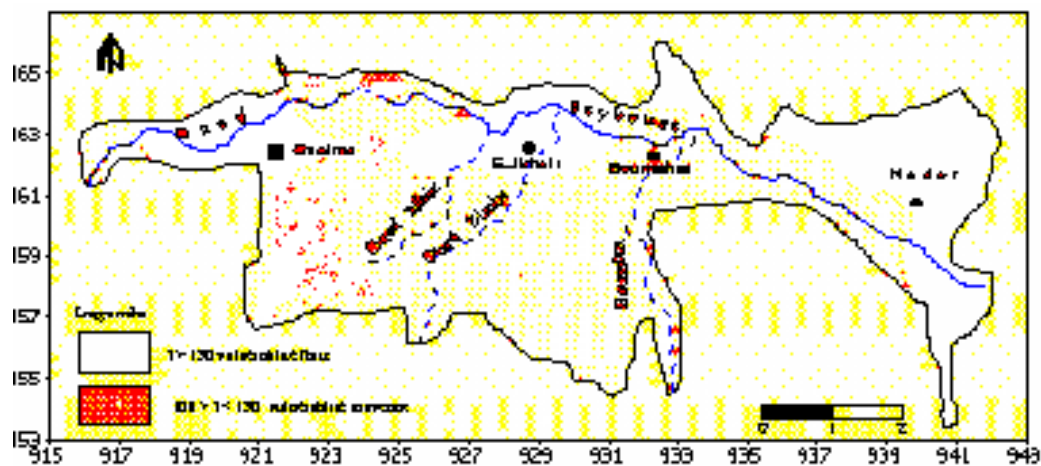


Figure 33a: Carte de vulnérabilité DRASTIC

3.5 LES SOURCES

La figure 34 visualise l'implantation des sources de la région Guelma



Figure 34 :Carte de situation des sources hors du sous-bassin de Guelma*

- * 1- Ain saboune 2-Ain Sendel 3-Ain Koton 4- Ain Kharrouba
- 5- Ras el Ma 6- Ain Beida 7- Ain Souda 8- Ain Sebayoune

Remarque : Toutes les sources sont captées

Deux types de sources existent au niveau de la région de Guelma, celles qui sont issues de la nappe alluviale et exurgent par déversement sur les marnes miocènes et des formations travertineuses pliocènes de Guelma (Gaud. B, 1988), et les sources de la limite sud, sud-est et nord du bassin émanant des calcaires crétacés et éocènes. Il s'agit d'eaux provenant de la nappe inférieure aux calcaires et qui, traversant par des fissures ces calcaires plus ou moins inclinés se trouvant arrêtées par suite de la présence d'une faille et sont obligés à cause de l'imperméabilité des marnes sous-jacentes d'exurger à leur contact (Daresté De la CHAVANNE, 1907 et 1910).

Le traçage à la fluorescéine à partir du gouffre situé à kef Djir à une distance de 200 mètres de Ain Saboune, a permis la mise en évidence d'un élément souterrain reliant cette dernière à la source Ain Sehbane située à plus de deux kilomètres, ce qui permet de déduire l'existence du phénomène de karstification non signalé sur les cartes géologiques de la région.

L'existence, du désordre est dû aussi au mouvement tectonique qui, en créant des vides, facilite la pénétration de l'eau dans un matériel perméable.

La rapidité de la réponse aux précipitations peut être liée à l'existence d'un système faillé et d'un degré élevé de fissuration favorisant un écoulement rapide.

3.5.1 ETUDE DE LA FISSURATION DES MASSIFS KEF-RIF-BARDOU ET MAHOUNA

L'étude de la fissuration a été faite sur des données prélevées sur la carrière séparant les deux massifs kef Rih , djebel Bardou et le flanc est de la Mahouna.

Ces données nous ont permis de classer les directions en familles :

- La première famille de direction N0 à N20° E représente 22% de l'échantillon
- La deuxième famille de direction N20 à N 40°E représente 35% de l'échantillon
- La troisième famille de direction N 60° à 120° E représente 43% de l'échantillon

3.5.2 HYDRODYNAMIQUE DES SOURCES

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la décomposition des hydrogrammes de crue. Pour les formations karstiques, les formules de (A. MANGIN, 1975) s'avèrent la plus adaptées à ce type de régime. L'équation est :

$$Q(t) = q_0 \frac{1-nt}{1+\epsilon t} + Q_{R0} e^{-\alpha t} \quad (21)$$

N'importe quel hydrogramme d'une source est caractérisé par les trois caractéristiques suivantes : la montée de la crue, la pointe, la décrue et le tarissement (figure 35).

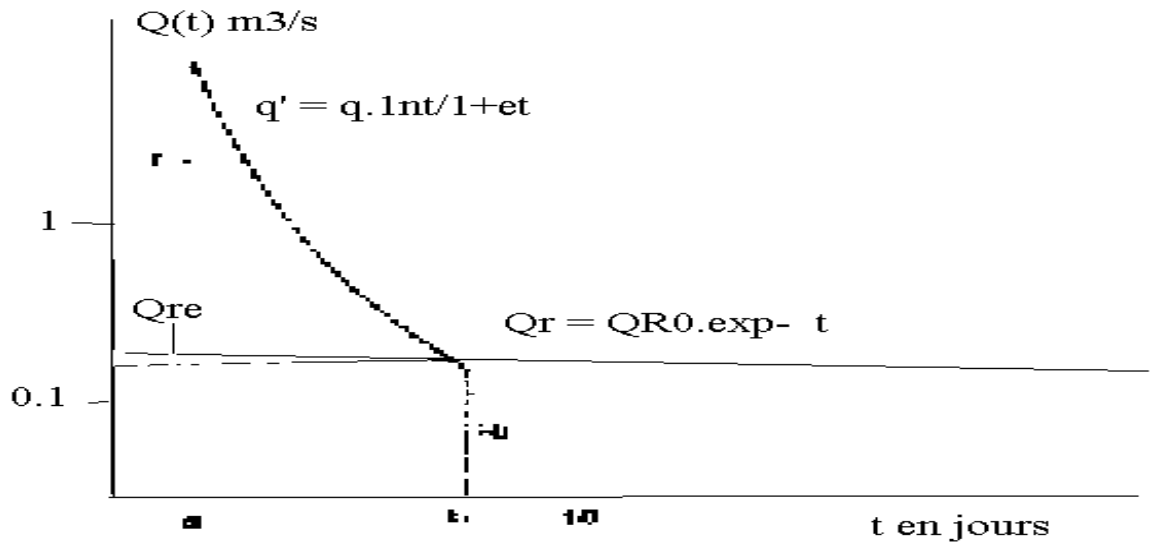


Figure 35 : Modélisation d'une courbe de récession

(d'après A. MANGIN, 1975)

Tout hydrogramme d'une source est caractérisé par la pontée de la crue, la pointe, la décrue et le tarissement (figure 35) et il connaît un écoulement rapide et un écoulement différé, ainsi la réponse à l'exutoire est la suivante :

$$Q(t) = q(t) + Q_R \quad (22)$$

$$Q(t) = Q(t) = q_0 \frac{1 - nt}{1 + \epsilon t} \quad (23)$$

La dernière équation correspond à la courbe de décrue et l'équation suivante définit la courbe de tarissement :

$$Q_R = Q_{R0} \cdot e^{-\alpha t} \quad (24)$$

La courbe de récession désigne donc toute la partie décroissante de l'hydrogramme. Cette méthode est appliquée aux sources du massif calcaire, et pour les sources issues des formations alluvionnaires, nous avons adopté la méthode de Maillet (équation 24).

Q_R = Débit de base

Q_{R0} = Débit de départ de vidange

α = coefficient de tarissement

Le coefficient de tarissement de la source est égal à l'inverse du temps que met le débit pour décroître de 0.632^{ème} partie de sa valeur c'est à dire $\alpha = 1/T$ ou T correspond au temps nécessaire pour qu'un débit de 1 m³ passe de 0.368 m³ / s (in BOUCHAOU. L., 1988).

La détermination de α est donnée par la formule :

$$\alpha = [\text{Log } Q_{RA} - \text{Log } Q_{Rb}] / [0.4343 (t_2 - t_1)] \quad (25)$$

Dans le cas d'une loi décroissante exponentielle et en prenant $t = 0$, la relation donnant le volume d'eau soutenant le tarissement s'exprime comme suit :

$$V_d = \int_t^{\infty} Q dt = \int_t^{\infty} Q_0 e^{-\alpha t} dt = \frac{-1}{\alpha} e^{-\alpha t} = \frac{Q_0}{\alpha} \quad (26)$$

Le volume de transit V_t est la quantité d'eau moyenne écoulée annuellement

$$V_t = Q_{\text{moyen}} \times 86400 \times 365 \text{ m}^3/\text{an} \quad (27)$$

Le tableau n°25 récapitule les différents paramètres moyens de récession des sources allant de 2001 à 2003.

Tableau n°25 : paramètres moyens de récession des sources (de 2001 à 2003)

Source	$\alpha(J-1)$	$QI \frac{M^3}{s}$	TI(J)	Q 10^{-3}	$V_D 10^3 M^3/S$	$V_T 10^3$ M^3/s
Saboune	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	90	0.32	12521.73	10091.52
Sendel	$3.23 \cdot 10^{-5}$	$0.82 \cdot 10^{-3}$	57	2.4	18782.60	75686.40
Beida	$22 \cdot 10^{-7}$	$0.28 \cdot 10^{-3}$	123	0.53	10996.36	16714.08
Souda	$2.30 \cdot 10^{-5}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$	57	2.2	1878260.9	69379.20
Ras El ma	$13.21 \cdot 10^{-7}$	$0.09 \cdot 10^{-3}$	150	0.19	58864.49	5991.84
Kharrouba	$11.51 \cdot 10^{-7}$	$0.3 \cdot 10^{-3}$	51	0.86	2251.95	27120.96
G bousba	$21.57 \cdot 10^{-7}$	$0.09 \cdot 10^{-3}$	94	0.24	3605.00	7568.64
Koton	$13.8 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-3}$	93	3.6	3756.52	113529.6
Sebayoune	$19.18 \cdot 10^{-7}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	120	0.14	4504.69	44150.04
Ain Cheikh	$6.90 \cdot 10^{-5}$	10^{-3}	126	2.1	12521.73	66225.6
Zeouazou	$2.30 \cdot 10^{-6}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	63	0.60	37565.52	18921.6
Rosfa	$2.30 \cdot 10^{-6}$	$0.01 \cdot 10^{-3}$	60	0.41	375.65	12929.76
Zeouaniz	$4.60 \cdot 10^{-6}$	$0.02 \cdot 10^{-3}$	63	0.73	375.65	23021.28
Gauci1	$19.18 \cdot 10^{-6}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	120	0.72	4504.69	22705.92
Gauci2	$2.30 \cdot 10^{-6}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	110	0.31	3756.21	9776.16
Guergour	$29.23 \cdot 10^{-6}$	$0.3 \cdot 10^{-3}$	90	0.99	866.02	31220.64
Amara	$15.86 \cdot 10^{-6}$	$0.06 \cdot 10^{-3}$	87	0.27	3268.60	8514.72
Sellaoua	$2.53 \cdot 10^{-6}$	$0.04 \cdot 10^{-3}$	120	0.23	6570.34	7253.28
Bouchiha	$13.53 \cdot 10^{-6}$	$0.04 \cdot 10^{-3}$	68	0.29	255.53	9145.44
Rahabi	$10.59 \cdot 10^{-6}$	$0.2 \cdot 10^{-3}$	160	0.36	1631.72	11352.96

DISCUSSION DES RESULTATS:

La méthode hydrodynamique, par l'étude des courbes de récession, ne peut à elle seule donner avec précision le volume total du réservoir du fait du manque de l'étude géophysique, de la porosité du milieu et la limitation des sous bassins qui reste trop confuse surtout au niveau de la région sud-est du bassin.

Par ailleurs, l'étude structurale montre des fracturations abondante des séries anticlinales avec des directions variables qui semblent favoriser l'écoulement et la karstification de la région.

L'analyse hydrodynamique a permis de mettre en évidence des vitesses d'écoulement inférieures à 50 mètres par heure et des coefficients de tarissement de 10^{-5} à 10^{-7} , ce qui indique des systèmes peu karstifiés ou mal drainés. Même pour les sources de la partie Nord du bassin où le coefficient de tarissement est de 10^{-6} , on peut penser à une vidange très lente des réservoirs, conséquence de l'abondance de la trame argilo-marneuse.

3.5.3 CONCLUSION

L'interprétation de la carte piézométrique, a permis de mettre en évidence la relation oueds-nappe qui est mixte en plusieurs points. Par ailleurs, il faut signaler que les niveaux piézométriques sont faibles et par conséquent l'alimentation se fait essentiellement par les précipitations.

Par ailleurs, l'interprétation des essais par pompage réalisés sur les forages et puits équipant la nappe, a permis de déceler une même succession au niveau des transmissivités de l'ordre de 10^{-3} m²/s. La superposition de la carte des

transmissivités et de la carte des perméabilités fait défaut à cause de l'importance des épaisseurs mouillées ($D \geq 10$ m) surtout au sud de Boumahra.

Les cartes DRASTIC générale et DRASTIC pesticide ont montré que l'aquifère est vulnérable à la pollution, et de ce fait la protection de la nappe s'impose.

L'étude hydrodynamique des sources a montré par le biais du calcul du coefficient de tarissement des valeurs de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-7} conséquences de l'obstruction des conduits karstiques et l'existence de la trame argileuse qui ralentit la circulation rapide des eaux.

CHAPITRE 4 : HYDROCHIMIE

Dans cette partie, nous avons réalisé des analyses physico-chimiques qui ont trait aux eaux superficielles et aux eaux souterraines (forages, puits et sources) éparpillés sur le bassin de Guelma. Les prélèvements des eaux souterraines ont été réalisés sur deux années hydrologiques août 2001/2002 en août 2002/2003 (480 échantillons concernant les sources et 120 provenant de la nappe). Le dosage des métaux lourds des échantillons prélevés sur les forages, puits et sources proches de Guelma, a été réalisé par spectrophotomètre (Spektra). Les analyses physico-chimiques ont été réalisées au laboratoire (LCGH, université de Guelma) et analysées par référence à Rodier et al, 1996 et à l'Afnor. Les nitrates, nitrites, orthophosphates ont été analysés à l'ANRH Constantine.

4.1 FACIES HYDROCHIMIQUE

Pour mieux apprécier les principaux grands traits hydrochimiques et les rapports mutuels, les résultats analytiques ont été représentés sur le diagramme de Piper (figure 36 à 39) en relation avec les anions et cations. Le faciès hydrochimique observé est chloruro-sulfaté et calco-magnésien, bicarbonaté et calco-magnésien dans la partie sud-est, sud et nord du bassin. Cependant, il existe un faciès mixte (figure 36-39).

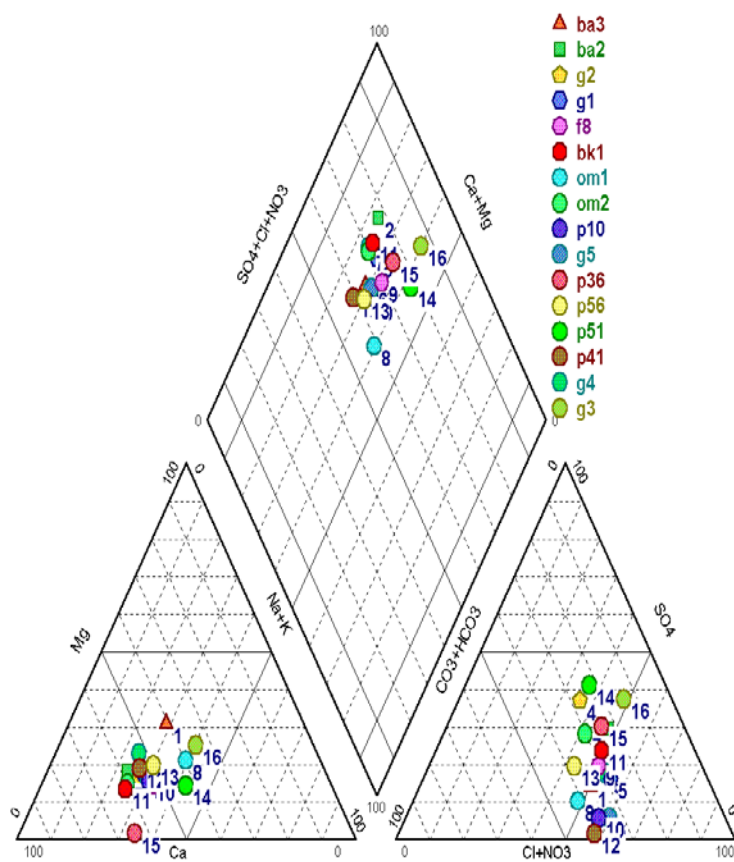


Figure 36 : Diagramme de Piper des forages et des puits périodes de hautes eaux

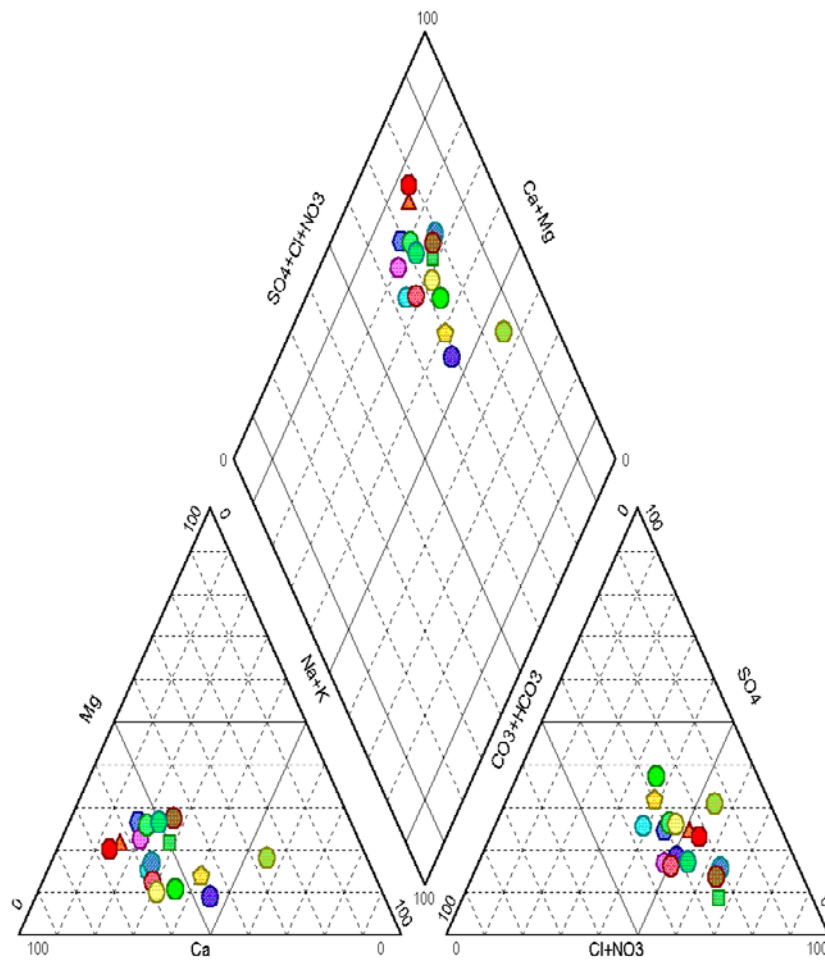


Figure 37. Diagramme de Piper des forges et des puits, période de basses eaux

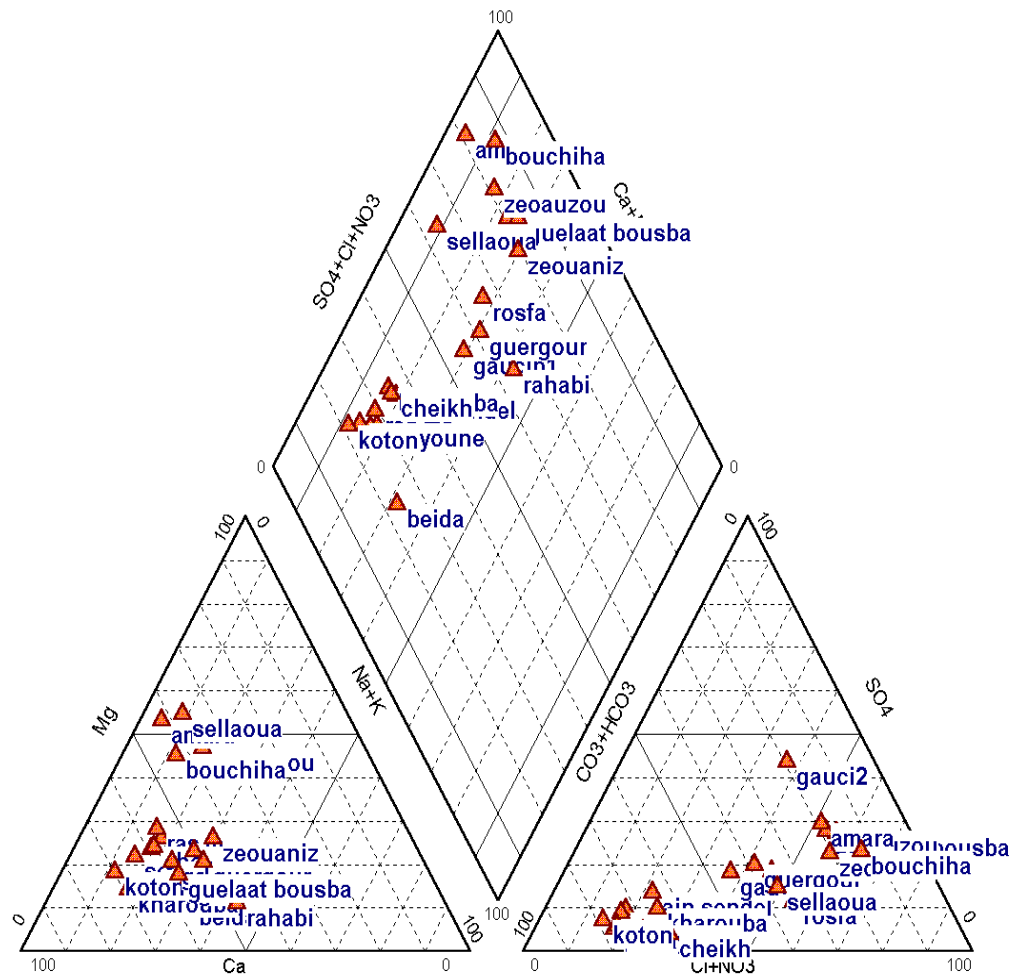


Figure 38. Diagrammes de Piper des sources périodes de hautes eaux

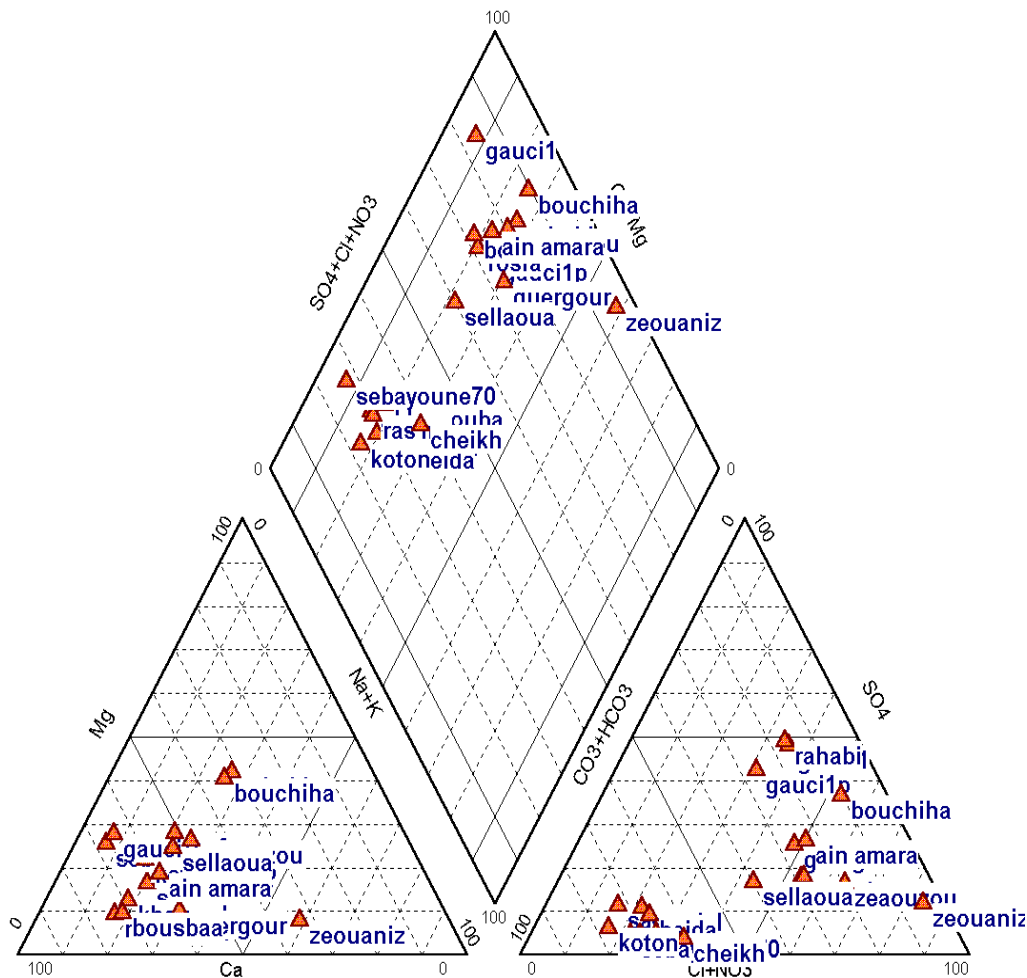


Figure 39. Diagrammes de Piper des sources périodes de basses eaux

4.2 ANALYSE EN COMPOSANTES PRICIPALES

Elle permet de comparer les résultats des différentes eaux des forages puits et sources, de synthétiser, de représenter graphiquement les données en se basant sur les corrélations entre les différents paramètres et de réduire un système complexe en un petit nombre de dimensions.

C'est une méthode factorielle, c'est-à-dire qu'elle permet de déterminer des axes factoriels indépendants dans l'hyperespace des « n » paramètres mesurés. Ces axes sont orthogonaux dans cet hyperespace, ce qui induit une indépendance entre ceux-ci.

L'ACP peut être calculée à partir de la matrice des covariances ou bien à partir de celle des corrélations. Dans le premier cas, la méthode favorise les paramètres dont les mesures donnent des valeurs élevées, au détriment des autres

paramètres. Comme dans les analyses des eaux, il existe des mesures de nature diverses telles que le pH mesuré en unité pH, c'est à dire logarithmique, où les concentrations (mg/l), il est préférable d'effectuer les calculs à partir de la matrice de corrélation qui élimine ces inconvénients.

4.2.1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES FORAGES ET PUIITS

La conductivité présente un ensemble de valeurs comprises entre (838 et 2283 uS/cm) ; les valeurs extrêmes correspondent à des mesures obtenues dans des points d'eau situés en G3, P56, P51 et P36 du 1103 à 2283us/cm ; alors que les secteurs sud-est enregistrent les valeurs intermédiaires entre (969 et 1046 us/cm), et le secteur situé aux alentours de l'oued Maiz enregistre des valeurs minimales comprises entre (838 et 873 us/cm). Ainsi la conductivité augmente dans le sens de l'écoulement souterrain c'est à dire du Sud au Nord.

La température varie entre 15 et 22°C, alors que le pH varie entre 7.00 et 8.30.

4.2.2 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

4.2.2.1 Statistique descriptive

Qualité et Variabilité de la composition des eaux

De manière générale, La composition chimique des eaux est très variable. Le coefficient de variation (Tableau 26a) de la plupart des paramètres est important pour le magnésium, sodium, potassium, sulfates, nitrates, nitrites, ammonium et orthophosphates et à moindre degré calcium, bicarbonates et chlorures (24.30 à 39 %), exception faite pour le pH.

Ce résultat est relativement fréquent en milieu laguno-lacustre ou la majeure partie des paramètres physico-chimiques présente une grande variabilité spatiale.

Tableau 26 a : Paramètres statistiques

Variable	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	pH
Moyenne	122	25.39	87.89	9.35	194.22	121.68	202	52.60	0.078	0.13	0.090	7.82
E.type	29.96	13.99	57.70	10.77	77.07	65.34	51.61	23.82	0.12	0.12	0.098	0.15
Min	72	13.99	26.00	0	90	8	115	16	0	0	0	7.56
Max	192	96.00	296.00	36	360	295	342	100	0.512	0.56	0.32	8.25
C.V %	24.30	54.00	64.74	113	39	53.13	25.24	44.80	164.29	89.07	105.90	1.93

4.2.2.2 CORRELATION ENTRE PARAMETRES

La matrice de corrélation (Tableau 26b) montre que certains paramètres sont bien corrélés entre eux. Habituellement ce sont les éléments solubles, dont la concentration ne peut être affectée par des processus de précipitation, dissolution, ou échange ionique, qui présentent ces corrélations élevées.

Les coefficients les plus forts relient Na⁺-Cl⁻ et Mg²⁺- Cl⁻

Tableau 26b : Matrice de corrélation des différents paramètres (mg/l)

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO ₃	NO ₃	NO ₂	HN ₄	Hp	PO
Ca	1											
Mg	0.101	1										
Na	0.010	0.631	1									
K	0.316	-0.280	0.415	1								
Cl	0.664	0.664	0.744	0.170	1							
O4	0.467	0.118	0.390	0.448	0.139	1						
HCO3	0.479	-0.013	0.018	0.337	-0.01	0.279	1					
NO ₃	0.022	--0.001	0.207	0.219	-0.011	0.185	0.271	1				
NO ₂	-0.02	0-0.15	0.071	0.080	-0.169	0.128	0.008	0.109	1			
HN ₄	0.240	-0.01	0.087	0.175	0.064	0.186	0.353	0.462	-0.175	1		
pH	0.189	0.203	0.343	0.477	0.142	0.491	0.130	0.387	0.146	0.391	1	
PO ₄	0.162	0.166	0.379	0.404	0.39	0.422	0.096	0.374	0.072	0.401	0.573	1

Une ACP a été pratiquée sur le tableau général des analyses "complètes" réalisées sur l'ensemble des points de mesure du réseau (forages et puits). Les deux premiers facteurs fournissent une inertie expliquée de 54,40 % (37.30 et 17.10 %) qui semble assez bonne compte tenu de l'inertie moyenne. Toutefois le pourcentage cumulé tend lentement vers 100 % ce qui traduit la complexité des influences qui s'exercent sur le chimisme des eaux. Nous avons aussi sélectionné le 3^{ème} facteur qui représente 12,0 % de l'inertie totale.

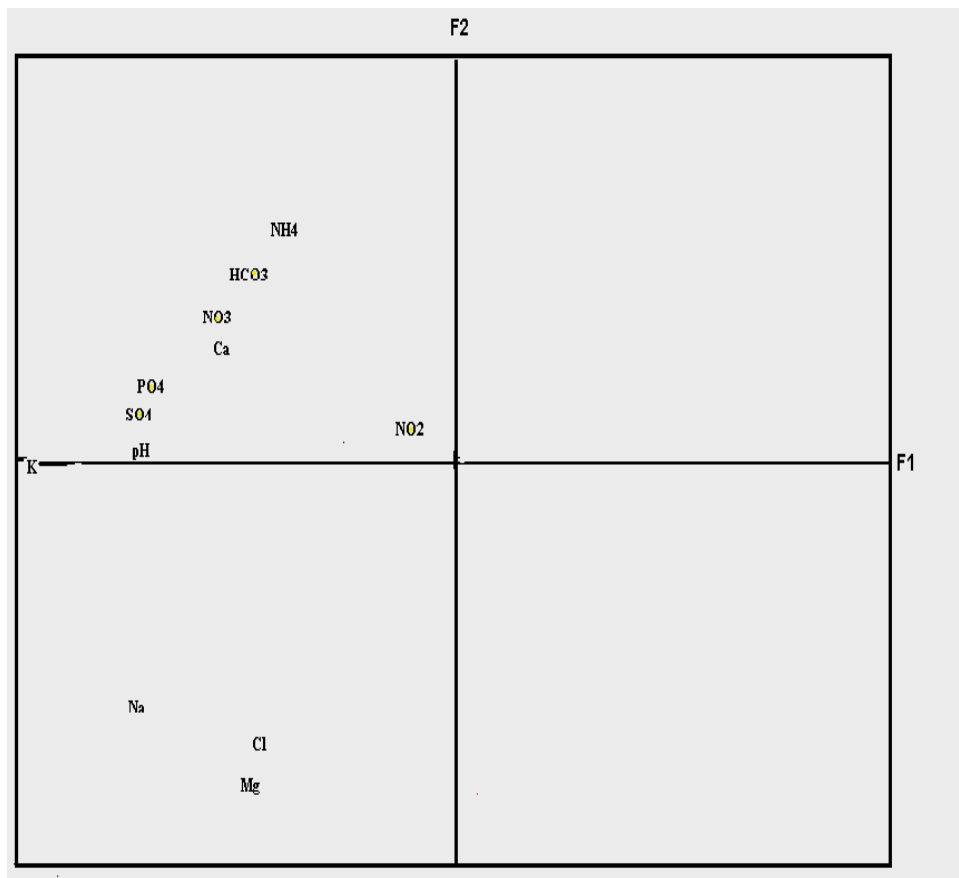
4.2.3 INTERPRETATION DES PRINCIPAUX FACTEURS

4.2.3.1 Etude de la contribution des observations au premier facteur

La répartition des variables dans le plan I-II permet d'attribuer une signification au premier facteur (figure 40a). Il regroupe dans sa partie gauche l'ensemble des éléments chimiques constituant la minéralisation des eaux. Il convient cependant de noter que les éléments de la pollution (PO₄, NH₄, NO₃) contribuent aussi significativement au pôle de la minéralisation que les paramètres K et Na, caractéristiques du faciès chloruré sodique des eaux de la nappe des alluvions. On peut en conclure que l'axe I est apte à discriminer les points de surveillance où les échanges de base, la pollution de surface et probablement les influences de l'évaporation font augmenter les concentrations.

4.2.3.2 Etude de la contribution des observations au second facteur

Selon le facteur II il y a opposition de deux groupes bien distincts. Il s'agit de l'ensemble formé par les ions NO_3 , NH_4 , HCO_3 , Ca , SO_4 , et PO_4 et du groupe Na , Mg et Cl . Le premier a une origine à rechercher en surface et le second correspond à une minéralisation naturelle. Il apparaît donc que l'axe 2 caractérise l'origine de la minéralisation.



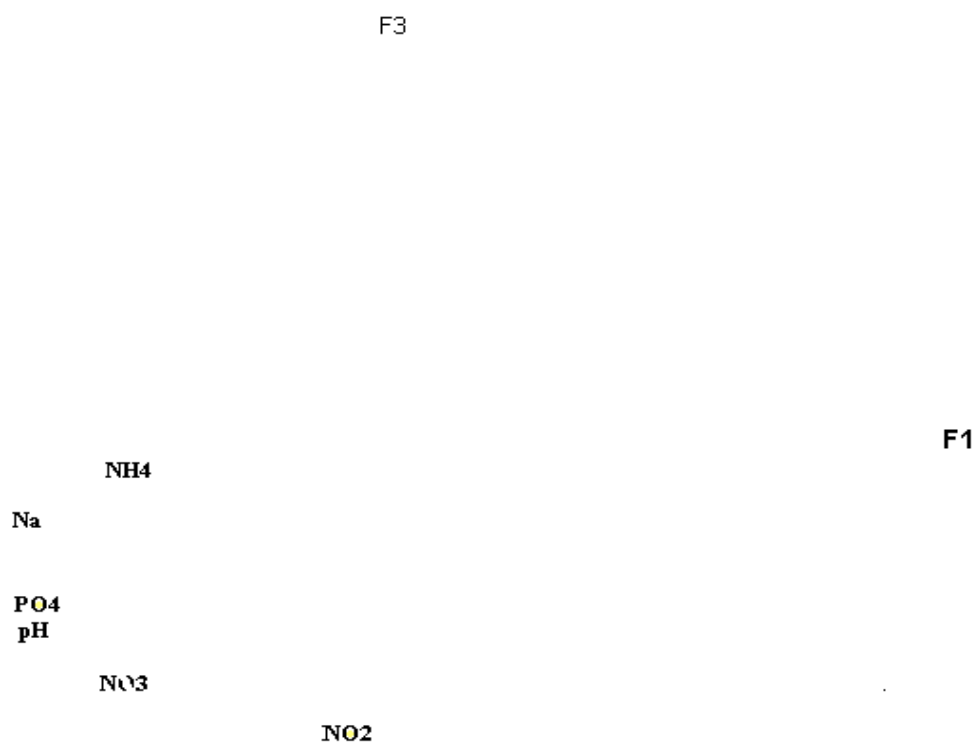
F1 Axe horizontal (37.30%) : F2 Axe vertical (17.10%)

Figure 40a : Résultats de l'analyse en composantes principales : -Cercle des variables (plan I-II).

4.2.3.3 Etude de la contribution des observations au troisième facteur III

Il représente près de 12,1% de la variance totale. Sur cet axe, on retrouve la même répartition des variables que pour l'axe II sauf en ce qui concerne l'ion NH_4

qui occupe plutôt une position intermédiaire. Il est donc probable que l'on assiste au passage des conditions de milieu oxydantes (NO_3^-) à des conditions réductrices (NH_4^+) liées notamment au confinement de la nappe sous une couverture argileuse protectrice. L'axe III peut être interprété comme un indicateur des conditions du milieu (figure 40b).



F1 Axe horizontal (37.30%) : F3 Axe vertical (12.00%)

Figure 40 b : Résultats de l'analyse en composantes principales : -Cercle des variables (plan I-III)

4.2.3.4 SYNTHESE DES RESULTATS

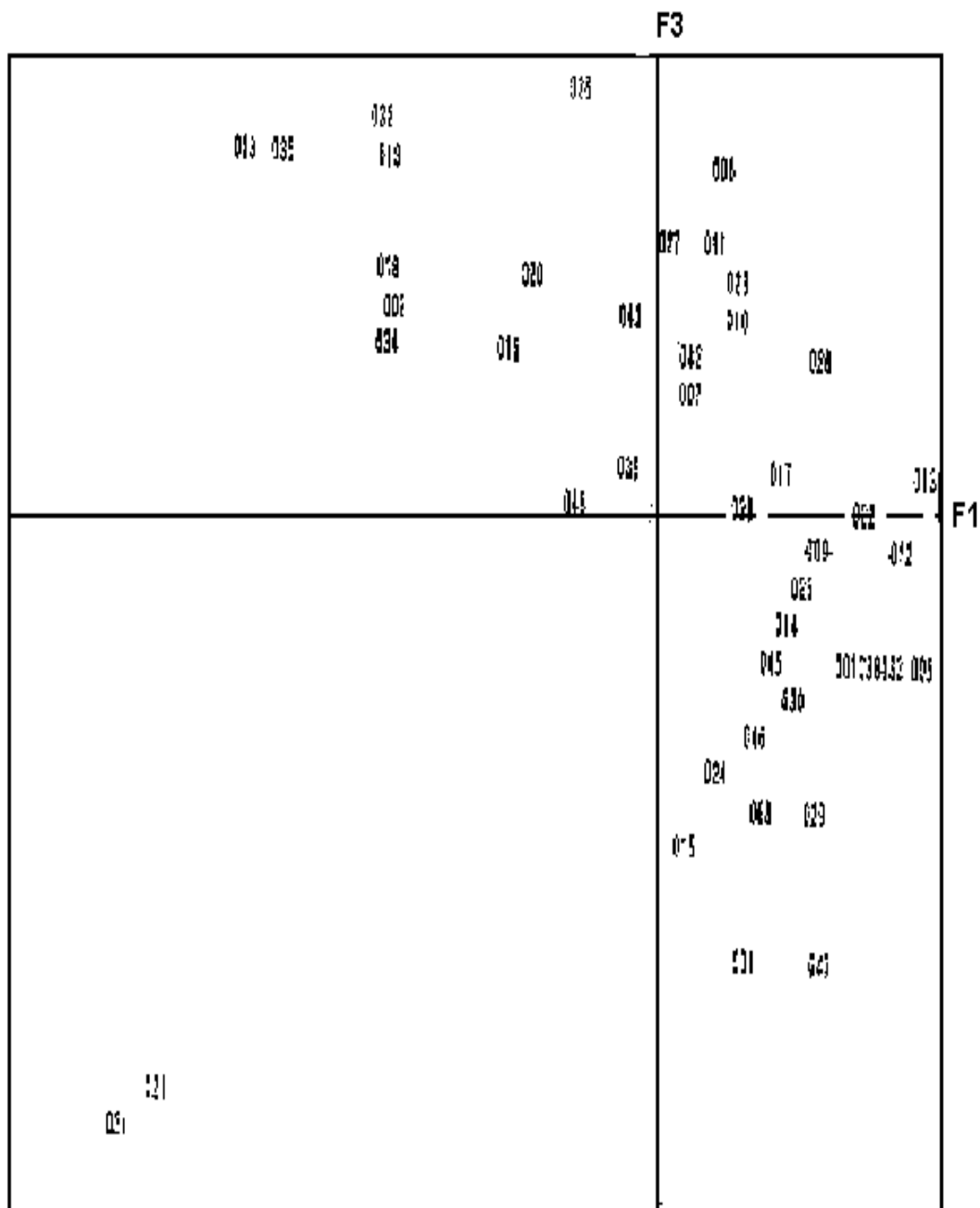
L'interprétation des nuages d'individus est souvent rendue difficile du fait de l'encombrement des graphiques associés assez paradoxalement à la relative dispersion de certains groupes d'individus, ce qui met en doute l'appartenance de

certaines échantillons au groupe qui leur a été affecté à l'origine (figure 41a et 41b). Une répartition plus objective des eaux souterraines tenant compte par ailleurs de leur zonalité géographique, est réalisable par la cartographie des facteurs, chaque individu étant repéré sur les axes 1 et 2, puis 1 et 3, par les coordonnées numériques.

F1 : Axe horizontal, F2 : Axe vertical

Figure 41a : Résultats de l'analyse en composantes principales :

-plan des individus (I-II)



F1 Axe horizontal : F3 Axe vertical

Figure 41b : Résultats de l'analyse en composantes principales :

-plan des individus (I-III)

La moyenne des composantes sur le premier vecteur propre, par point de surveillance, indique quels sont les endroits les plus minéralisés de la nappe (figure 42). On distingue, dans le bassin de Guelma, trois zones minéralisées : la première

située à la limite de la Seybouse où l'abondance des formations à tendance lagunaire caractérisée par l'abondance des sulfates, chlorures et calcium ; la seconde est située dans le secteur limité par les oueds Maiz et Zimba où calcium et bicarbonates dominant surtout en période humide. Enfin, la dernière zone, située au sud de Boumahra où les chlorures et calcium prédominent.

Les valeurs les plus faibles observées au niveau des forages (F8, OM1, OM2, fr, BK1, G2 et G4) traduisent l'influence de l'alimentation de la nappe par les bordures calcaires fissurés qui amènent des eaux très peu chargées entraînant la dilution des eaux de la nappe. Cette alimentation est également possible en bordure du sud-est par la molasse où la minéralisation peut s'expliquer par la nature géologique des terrains environnants.

Le facteur II traduit surtout une pollution par les nitrates, ces concentrations augmentent progressivement de l'Est vers l'Ouest et du Sud vers le Nord où elles dépassent largement les 45 mg/l et contribuent fortement à la minéralisation (Figure 43).

Le facteur III traduit le pouvoir réducteur, il apparaît surtout au niveau des forages BA2, BA3, G5, BA5, BA1 et P42 (Hasnaoui R et Labadlia S, 2005). Ces points d'eau sont caractérisés par les nitrates qui sous l'effet de la réduction se transforment en ammonium, aussi les teneurs en sulfates sont faibles par rapport aux autres points d'eau de la nappe. Ce sont les niveaux argileux qui sont à l'origine du confinement du milieu (figure 44).

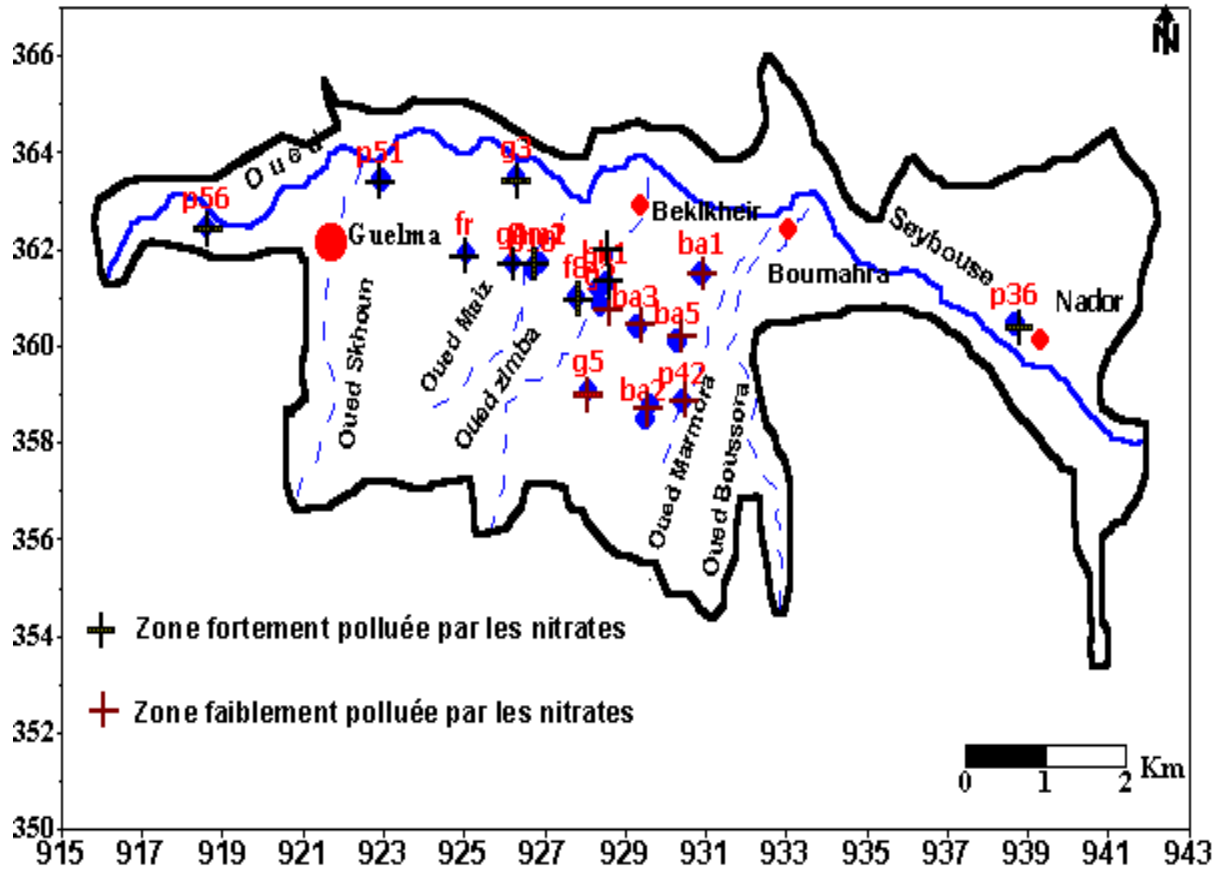


Figure. 42 : Représentation cartographique du facteur « minéralisation » selon les coordonnées moyennes sur l'axe I.

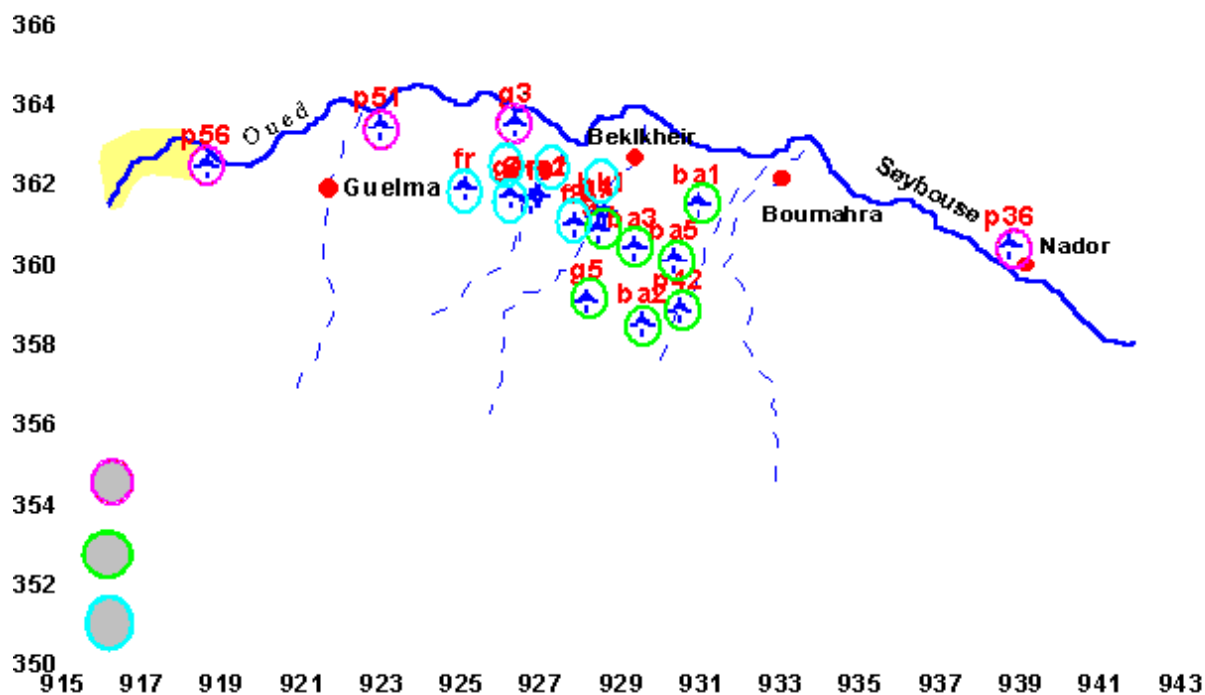


Figure 43 : Représentation cartographique du facteur « origine de la minéralisation » selon les coordonnées moyennes sur l'axe II.

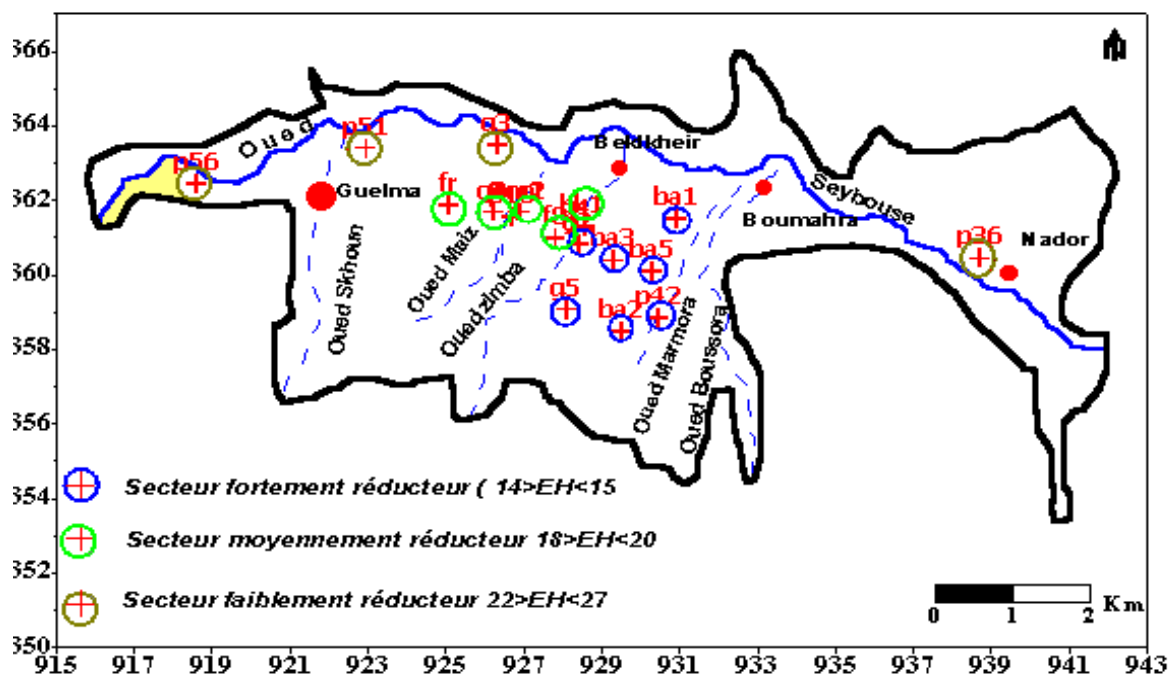


Figure 44 : Représentation cartographique du facteur « milieu » selon les coordonnées moyennes sur l'axe III.

4.2.3.5 CONCLUSION

L'analyse des données analytiques observées sur le réseau de surveillance de la qualité des eaux de la nappe alluvionnaire de Guelma a permis d'identifier les trois principaux facteurs d'influence sur le chimisme des eaux; la minéralisation, la pollution et l'oxydo-réduction. La teneur totale en sels minéraux des eaux de l'aquifère alluvial est due à deux causes : naturelle et anthropique. Les processus naturels sont dus aux conditions climatiques, l'évaporation et la concentration par dissolution; en ce qui concerne les processus anthropiques: l'irrigation et la pollution urbaine. A partir de l'analyse en composantes principales, on a pu différencier deux zones selon leur degré de salinité : le passage de la nappe alluviale d'un état libre à un état captif est marqué par la réduction des nitrates en ammonium. Enfin cette étude a montré l'existence d'une pollution des eaux de l'aquifère par les formes azotées, surtout les nitrates, qui se manifestent essentiellement sur la partie centrale (du côté de l'oued Maiz), les flancs ouest et nord-est. Des concentrations en ion nitrate supérieures à 45 mg/l ont été détectées (voir sous chapitre pollution souterraine).

4.2.4 ANALYSE EN COMPOSANTES DES SOURCES

4.2.4 .1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

La conductivité présente un ensemble de valeurs comprises entre 393 et 11417us/cm. Les valeurs extrêmes sont obtenues dans le secteur Nord avec des valeurs comprises entre 1061 et 1569 us/cm; alors que les secteurs sud-est enregistrent les valeurs intermédiaires entre (393 et 584 μ s/cm). La température varie entre 15 et 22°C, avec une valeur moyenne de 17°C, alors que le pH varie entre 7.00 et 8.30.

Cette ACP comporte 20 sources communes aux 9 campagnes plus ou moins complètes 2003/2004. L'étude est basée sur 13 variables et 198 unités statistiques (μ s).

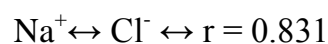
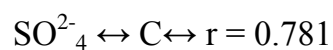
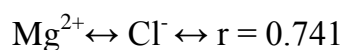
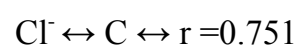
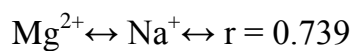
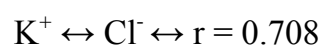
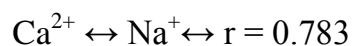
4.2.4.2 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES SOURCES

Une ACP a été pratiquée sur le tableau général des analyses "complètes" réalisées sur l'ensemble des sources de la région. Les deux premiers facteurs fournissent une inertie expliquée de 63.10 % de l'inertie totale (51.10 et 12 %) qui semble assez bonne compte tenu de l'inertie moyenne.

La matrice de corrélation (tableau) montre des corrélations supérieures à 0.70 entre les éléments associés deux à deux.

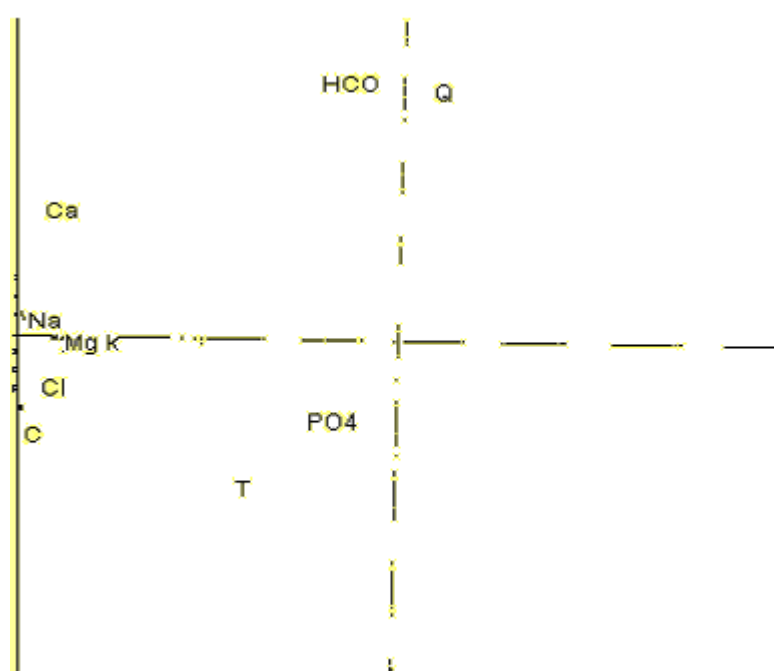
Tableau n°26c : Matrice de corrélation

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	C	pH	T	Q	PO4
Ca	1												
Mg	0.654	1											
Na	0.783	0.739	1										
K	0.581	0.680	0.680	1									
Cl	0.649	0.741	0.741	0.831	1								
SO4	0.660	0.639	0.693	0.781	0.579	1							
HCO3	0.479	0.131	0.225	0.225	0.103		1						
NO3	0.548	0.583	0.767	0.620	0.603	0.647	-0.005	1					
C	0.588	0.689	0.824	0.684	0.751	0.038	-0.064	-0.021	1				
PH	-0.044	0.648	-0.03	0.029	0.054	0.038	-0.064	-0.021	0.066	1			
T	0.129	0.288	0.295	0.379	0.337	0.261	0.261	-0.085	0.160	0.096	1		
Q	0.597	0.648	-0.047	-0.081	-0.162	-0.202	0.397	-0.164	-0.05	-0.267	-0.267	1	
PO4	0.597	0.648	0.747	0.600	0.661	0.633	0.066	0.733	-0.054	0.77	0.72	-0.189	1



Le premier facteur absorbe les 51.10%, donc la structure du nuage autour de cet axe est plus ou moins forte. Dans le plan factoriel 1 et 2 (figure 45), le facteur I est défini par Ca, Na, Mg, K, NO₃ et C qui lui sont bien corrélés et sont

opposés au débit. Cet axe exprime probablement le temps de séjour des éléments à l'acquisition de la chimie. C'est donc un axe de minéralisation et de dilution suivant que le débit augmente ou diminue. Le facteur II fournit 13.90 % de l'inertie totale, est bien représenté par le débit et s'oppose aux bicarbonates. Ce facteur semble rendre les variations des concentrations selon que le débit croît ou décroît.

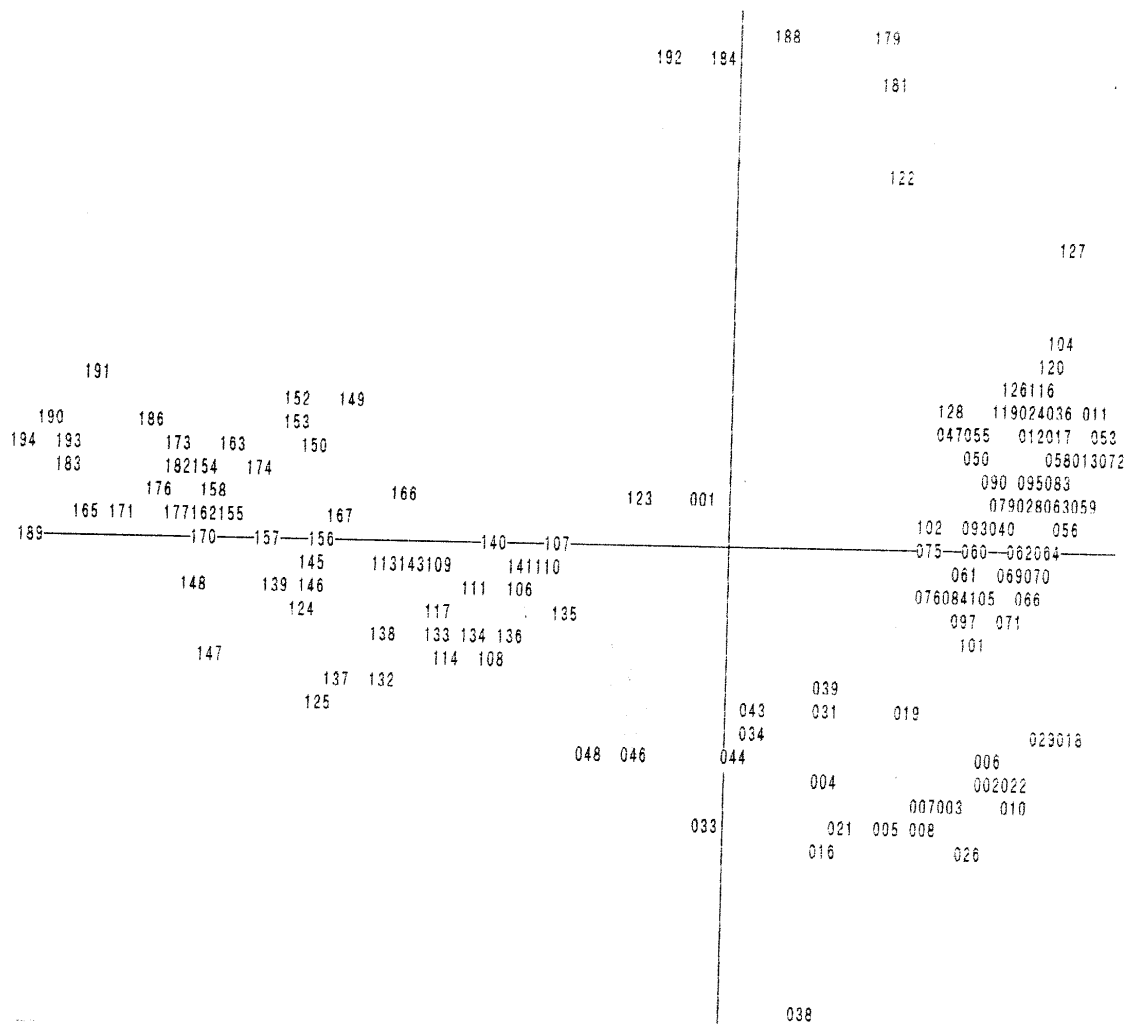


F1: axe horizontal (51.10%) ; F2: Axe vertical (13.90%)

Figure 45 : Résultat de l'ACP des variables des sources

4.2.4.3 PLAN DES INDIVIDUS

Sur le plan des individus (figure 46), le facteur I est représenté par les eaux riches en calcium et sodium qui s'opposent aux eaux minéralisées riche en chlorures et polluées par les nitrates. Selon le facteur II, il y'a opposition entre les eaux bicarbonatées et les eaux à pH probablement équilibré.



(F1 : axe horizontal, F2: axe vertical)

Figure 46 : Résultat de l'ACP des plans des individus

4.3 INDICE DE SATURATION

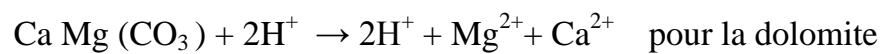
4.3.1 Théorie de l'indice de saturation

L'équilibre de CaCO_3 , $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$, le produit de l'activité ionique $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ est une constante donnée à n'importe quelle température et est définie par la constante thermodynamique. K_{CaCO_3} (K calcite dans la matrice minéral), le degré de saturation calcite est défini par l'indice de saturation et donné par la relation suivante :

$$IS \text{ calcite} = \log_{10} [(Ca^{2+}) \times (CO_3^-)] - \log_{10} K_{\text{calcite}}$$

Où la saturation est déterminée à l'échelle logarithmique, est un degré de saturation dans les eaux naturelles variant par ordre de magnitude. Pour cette expression, la valeur de IS est égale à 0 correspond à la solubilité de la calcite dans l'état d'équilibre. Cependant les valeurs de +1 et -1 correspondent à 10 fois à 1/10 de temps de saturation respectivement.

Les mêmes étapes sont applicables aux autres minéraux.



4.3.2 APPLICATION AUX EAUX DU BASSIN

Afin de bien identifier les processus géochimiques responsables de l'évolution chimique observée dans les eaux du bassin de Guelma, on a calculé, à partir des données analytiques relatives à l'échantillonnage, l'état de saturation des minéraux qui réagissent dans le système pendant les périodes humides et sèches.

La simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel PHREEQ (Parkhurst et al., 1990). Les valeurs obtenues de l'indice de saturation pour la calcite, l'aragonite, la dolomite et le gypse ainsi que la pression partielle de CO₂, sont réunies dans les tableaux 27 et 28. Sur ces tableaux, il est clair que les eaux du bassin de Guelma sont quasi sous-saturées en calcite, aragonite et dolomite (forages et puits) surtout en période de hautes eaux, ce qui leur donne un enrichissement en calcium et magnésium. En revanche les points d'eau situés en bordure sud, donc situés dans la zone de transit des eaux en provenance de la zone d'alimentation, présentent des indices positifs, sont donc sous-saturés en ces

minéraux. L'analyse des données montre que ces eaux ont des concentrations faibles en calcium et magnésium.

Les indices de saturation obtenus pour le gypse, démontrent une sous-saturation généralisée en ce minéral qui est, peut-être, à l'origine des hautes teneurs obtenues en calcium et en sulfates. Les valeurs obtenues de la pression partielle en CO₂ varient entre (0.06 10⁻³ et 4.06 10⁻³ atm) en période de hautes eaux et de (1.09 10⁻³ et 19.38 10⁻³ atm). On peut noter que cette pression est en général faible dans la majorité des points d'eau étudiés, alors qu'elle augmente dans les forages et puits qui se trouvent dans le flux souterrain des eaux les plus minéralisées. En effet, les eaux en provenance des sources sont en général sur saturées en calcite, aragonite et sous saturées en dolomite et gypse.

Tableau n°27 : Indice de saturation et PCO₂ des forages et puits

Indice de saturation et PCO ₂ 10 ⁻³ (atm)	
Période de basses eaux	Période de hautes eaux

Code	C	Ar	D	G	PCO2	C	Ar	D	G	PCO2
BA3	0.83	0.68	0.77	-1.21	1.47	0.22	0.07	-0.09	-1.43	19.38
BA2	0.56	0.42	0.34	-1.63	0.361	-0.17	-0.31	-1.26	-1.27	7.82
G2	0.50	0.35	0.06	-1.38	1.87	-0.06	-0.20	-1.12	-1.43	3.42
G1	0.63	0.49	0.53	-1.48	1.42	0.04	-0.11	-0.82	-1.62	5.43
G4	0.43	0.29	0.18	-1.50	1.65	-0.11	-0.26	-1.00	-1.55	9.37
F8	0.53	0.39	0.24	-1.59	2.64	-0.20	-0.35	-1.38	-1.69	6.01
BK1	0.69	0.54	0.44	-1.31	1.18	-0.17	-0.32	-0.09	-1.54	5.70
OM1	0.26	0.12	-0.47	-1.21	1.14	0.05	-0.09	-0.58	-0.66	2.81
OM2	0.76	0.62	0.79	-1.29	1.71	-0.11	-0.25	-1.23	-1.25	1.59
P10	1.23	1.08	1.34	-1.41	0.79	-0.06	-0.20	-1.06	-2.06	1.09
G5	1.25	1.11	1.56	-1.31	0.60	0.13	-0.02	-0.71	-1.77	1.90
FR	0.34	0.53	-0.09	-1.48	1.47	0.15	0.015	-0.20	-2.03	2.32
P41	0.67	0.53	0.71	-1.48	0.06	0.39	0.24	-0.09	-2.41	9.37
P36	0.15	0.01	-0.78	-1.11	4.06	1.23	1.09	0.86	0.48	3.71
P56	0.64	0.49	0.08	-1.02	05.39	1.23	1.09	0.48	-0.64	2.95
G3	1.03	0.89	1.50	1.16	1.00	0.71	0.56	0.86	-0.78	2.29

C = calcite, Ar = aragonite D = dolomite et G = gypse

Tableau n°28 : Indice de saturation et PCO₂ des eaux des sources*

Code	Période de hautes eaux					Période de basses eaux				
	C	Ar	D	G	PCO ₂	C	Ar	D	G	PCO ₂
1	0.48	0.34	0.18	-1.95	6.88	0.26	0.11	-0.04	-2.14	7.31
2	0.51	0.37	0.03	-1.89	6.73	0.23	0.09	-0.64	-2.06	4.32
3	0.46	0.31	-0.38	-2.06	4.87	0.18	0.03	-0.77	-2.57	4.83
4	0.15	0.01	-0.54	-2.51	8.75	0.15	00	-0.52	-2.28	4.83
5	0.43	0.29	-0.30	-2.36	4.66	0.19	0.05	-0.72	-2.21	6.33
6	0.24	0.09	-0.83	-2.49	5.44	0.22	0.08	-0.26	-2.29	4.54
7	0.40	0.26	-0.04	-2.38	6.02	0.13	-0.01	-0.62	-2.51	4.42
8	0.38	0.23	-0.04	-2.32	10.05	0.21	0.07	-0.37	-2.43	5.18
9	0.46	0.32	0.06	-2.20	7.69	0.38	0.23	-0.25	-2.46	8.59
10	0.60	0.46	0.143	-0.77	7.09	0.56	0.42	-0.22	-1.37	5.86
11	0.33	0.19	-0.12	-0.75	4.24	0.40	0.26	-0.04	-0.79	8.01
12	-0.09	-0.24	-0.47	-1.03	5.86	0.28	0.14	-0.48	-1.51	5.03
13	0.50	0.35	0.32	-1.09	1.31	0.66	0.52	0.58	-1.35	6.56
14	0.52	0.38	-0.14	-1.03	6.95	0.65	0.50	0.51	-1.20	10.28
15	-0.33	-0.47	-1.95	-1.82	3.80	-1.63	-1.77	-4.18	-2.35	8.97
16	0.11	-0.04	-0.47	-1.46	5.37	-0.19	-0.34	-0.69	-1.39	2.34
17	-0.16	-0.30	-1.23	-1.44	5.37	0.14	-0.01	-0.04	-1.23	5.16
18	-0.30	0.15	-0.16	-1.65	5.16	0.04	-0.10	-0.16	-1.84	5.59
19	0.19	0.05	-0.66	-1.65	0.18	0.13	-0.01	-0.39	-1.32	4.69
20	-1.05	-1.19	-2.44	-2.04	0.69	0.94	-1.08	-2.27	-2.07	1.13

* 1- Ain saboune 2- Ain Sendel 3- Ain Beida 4- Ain Koton 5 – Ain Kharouba 6- Ras El Ma 7- Sebayoune 8- Ain Cheikh 9- Ain Koton 10- Gauci1 11- Gauci2 12- Rahabi 13 – Rosfa 14- Ain Guergour 15- Guellat Bousba 16- Zéouazou 17-Ain Guergour 18- Ain Amara 19- Ain Sellaoua 20- Ain Bouchiha

4.4 POLLUTION SUPERFICIELLE DU BASSIN DE GUELMA

4.4.1 Introduction

L'oued Seybouse représente un réseau hydrographique superficiel, prenant naissance à vingt kilomètres de Guelma par la jonction des oueds Charef et Bouhamdane. A son entrée, au niveau de Guelma, le réseau hydrographique du bassin versant secondaire le rejoint, créant ainsi un réseau plus ou moins dense. La croissance démographique accélérée (160.000 hab en 2000) s'est opérée en parallèle avec l'implantation du tissu industriel (mécanique, parachimique, transformation plastique, briqueterie,...). Toutes ces activités industrielles contribuent à la charge hydraulique, charriant d'importantes quantités de substances toxiques et minérales susceptibles de contaminer les cours d'eau du bassin. A ces activités industrielles, s'ajoutent les industries agroalimentaires (raffinerie de sucre, conserverie de tomate, minoteries, laiterie) et les rejets domestiques qui génèrent une importante charge en matières organiques sous formes azotées et phosphorées. De plus, Cette situation est aggravée par les rejets sauvages de certaines stations services situées à l'approche des ces oueds. Cent trente mille (130.000) mètres cubes d'eaux usées domestiques et industrielles se déversent quotidiennement (DHW. 2005) et rejoignent la Seybouse par le biais des ses affluents.

Nous proposons dans cette partie, à la lumière des résultats d'analyses physico-chimiques et bactériologiques, de déterminer la nature et l'impact de la pollution sur la qualité des eaux du bassin de Guelma.

4.4.2 Description de la zone d'étude

Le bassin de Guelma est localisé dans la zone tellienne de la chaîne alpine de l'Algérie du nord-orientale. Il a une forme allongée d'Est en Ouest sur 20 km de long et de 3 à 10 km de large. Cette zone, est constituée d'un ensemble de terrasses emboîtées les unes aux autres correspondant à une dépression de 50 km² de surface (Gaud B.1988). Elle est traversée d'Ouest en Est par la Seybouse, le principal cours d'eau superficiel de la région, où viennent se jeter des petits oueds du bassin versant secondaire avec les rejets qu'ils charrient. Le présent travail est conduit sur un réseau de 7 stations réparties sur les différents cours d'eau du bassin, leur distribution est en figure 47.

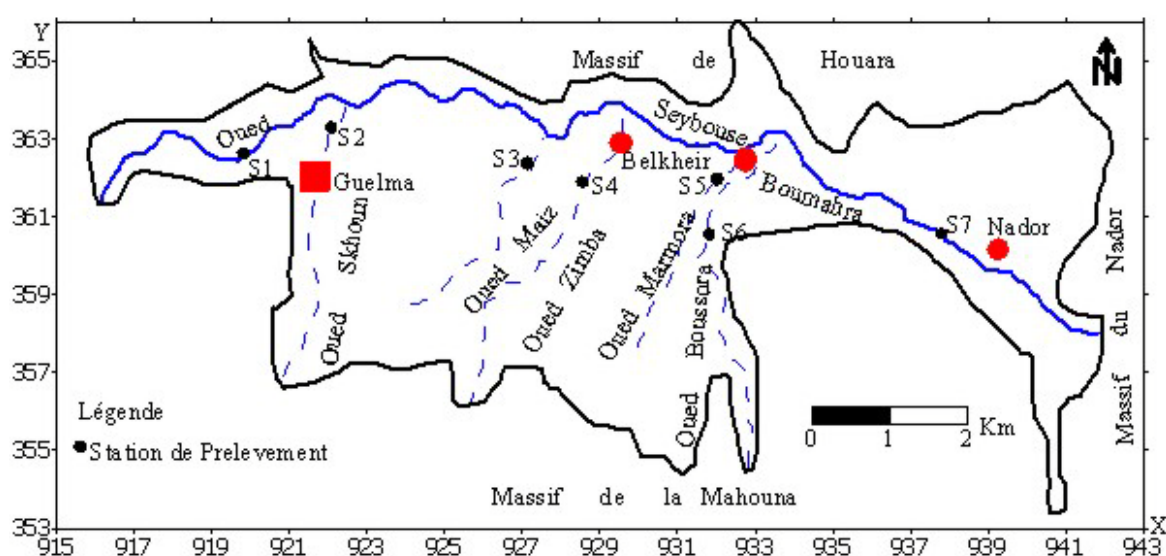


Figure 47 : Situation géographique des sites de prélèvement

4.4.3 ECHANTILLONNAGE

Douze (12) campagnes de prélèvement ont été effectuées entre mars 2004 et avril 2005 à raison d'un prélèvement mensuel. L'échantillonnage a été effectué soit dans des flacons en plastique rincés à l'eau distillée, soit dans bouteilles en verre étuvées à 220°C pour l'analyse bactériologique. Les pH, oxygène dissous et conductivité électrique, ont été mesurés in situ. Les analyses chimiques ont été

effectuées au laboratoire en référence à Rodier et al. (1996), sur les échantillons transportés à basse à basse température (4°C) depuis le terrain.

Les paramètres bactériologiques ont été déterminés en filtrant des aliquotes homogènes de 100 ml dilués dans de l'eau stérile de manière à obtenir un nombre formant colonie (UFC) compris entre 30 et 300 (Chippaux, J.P et al, 2002). Le taux de dilution a été calculé empiriquement au cours des campagnes de prélèvement. Chaque aliquote a été filtré sur une membrane dont le diamètre des pores était de 0,45µm. Les membranes ont été ensuite placées sur des milieux sélectifs pendant 24 heures à 37°C. Les colonies ont été dénombrées selon une grille fournie par le fabricant. Les réactifs utilisés sont les suivants : NKS Standard, NKS Endo et NKS Azide qui permettent de dénombrer respectivement les germes totaux, les coliformes totaux et les streptocoques fécaux.

4.4.4 RESULTATS ET DISCUSSION

4.4.4.1 Les paramètres abiotiques

Les taux obtenus pour l'oxygène dissous diminuent fortement au niveau des sites de prélèvement (Figure 48). Cette diminution est en relation avec le métabolisme bactérien qui utilise cet élément pour dégrader la matière organique abondante surtout au niveau des stations médianes. Ces résultats sont confirmés par les teneurs en DCO qui croissent de l'aval à l'amont (Nouar T, 2004). Ils traduisent l'abondance d'une importante charge organique s'accroissant de l'amont à l'aval en provoquant une diminution de l'oxygène dissous (Figure 48). Cependant l'accroissement du taux d'oxygène au niveau des stations S1 et S7 relativement aux autres, est probablement dû aux apports des oueds Bouhamdene et Charef qui aèrent les eaux de la Seybouse.

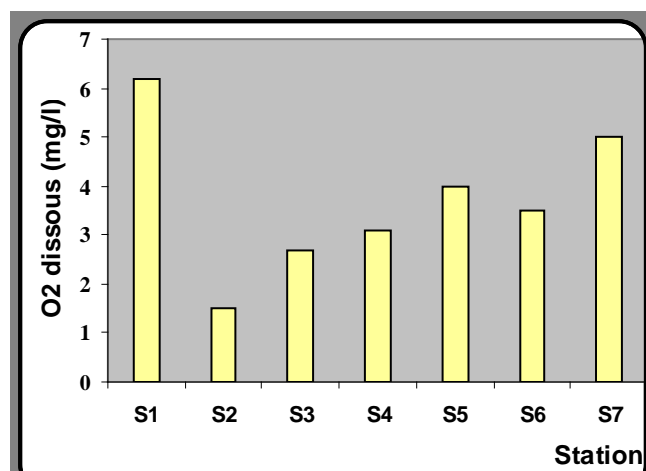


Figure 48 : Evolution des teneurs moyennes en oxygène dissous

Les conductivités électriques et salinités (>1.5g/l) (Figures 49 et 50) suivent la même évolution et sont proportionnelles aux sels dissous, ce qui traduit ainsi une forte minéralisation des eaux de la région. Ces valeurs sont probablement liées à l'érosion mécanique et l'apport des rejets industriels (unité céramique et marbre).

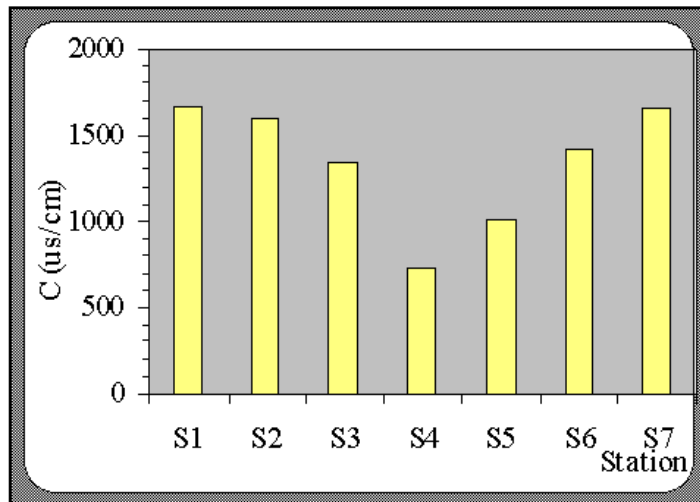


figure 49 ; Evolution des conductivités électriques

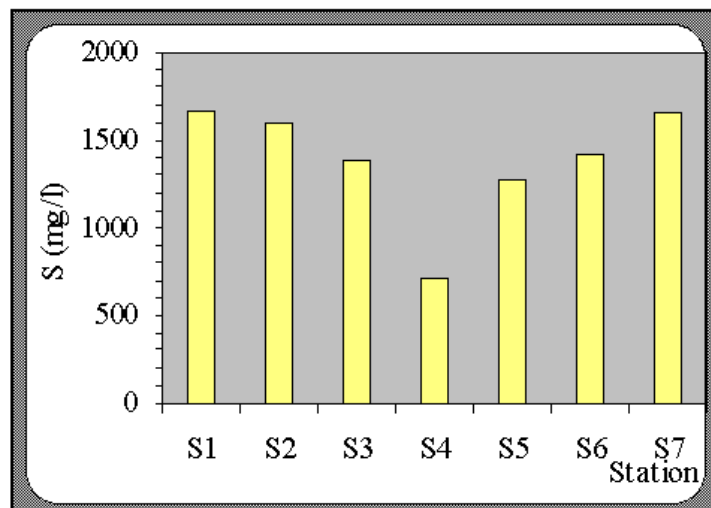


Figure 50: Evolution de la salinité moyenne

L'enrichissement des stations en matière en suspension (Figure 51) est en relation avec l'érosion mécanique du bassin et l'apport des rejets des unités

céramique, marbre et briqueteries qui déversent des matières minérales de couleur blanche dans les oueds du secteur étudié, sous formes de particules argileuses se qui traduira par des duretés importantes des eaux (Figure 52).

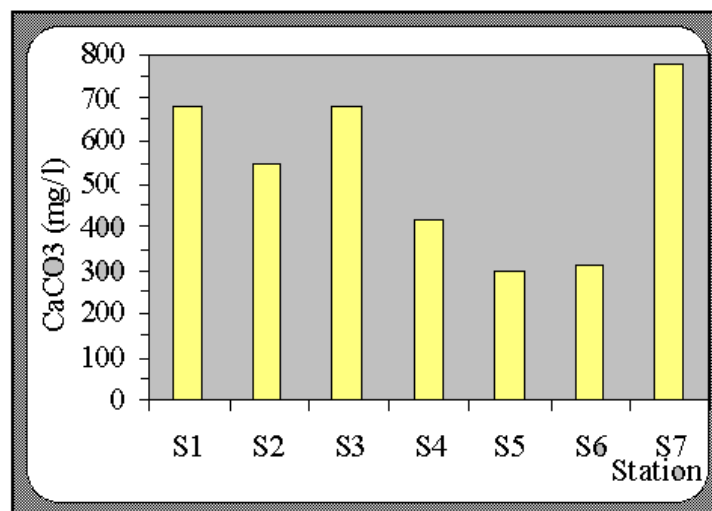
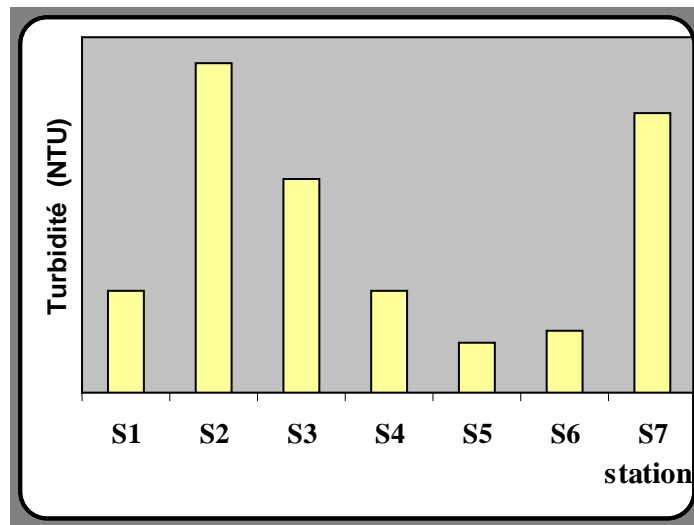


Figure 52 Evolution spatiale de la dureté moyenne

Les valeurs maximales enregistrées en orthophosphates indiquent une pollution provoquée par les rejets domestiques et industriels (Figure 53).

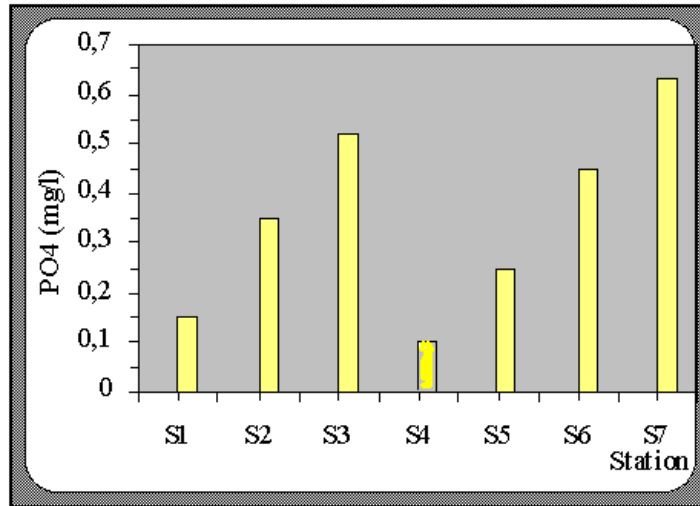


Figure 53 : Evolution des teneurs en orthophosphates

Les teneurs en formes azotées sont importantes (> 50 mg/l) en période sèche et décroissent sensiblement par effet de dilution en période de hautes eaux. Leur présence dans les eaux du bassin s'explique par les rejets domestiques et le lessivage des parcelles agricoles, et par les précipitations des nitrates enfouis dans le sol ou épandus pendant la saison agricole (Figure 54).

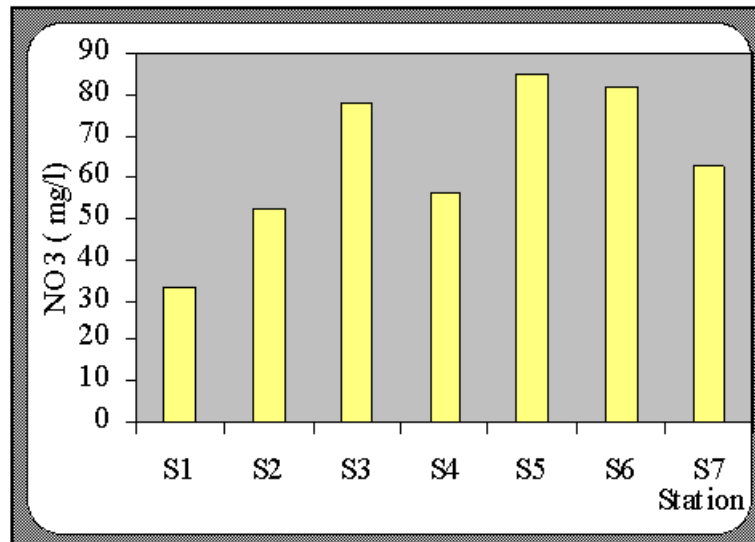


Figure 54 : Evolution des teneurs moyennes en nitrates

4.4.4.2 METAUX LOURDS

Cadmium

La présence du cadmium (Figure 55) est effective au niveau des stations S1, S2, S3 et S7. La contamination par cet élément est importante ; elle est causée par les briqueteries et les rejets provenant des fourneaux de l'unité céramique, etc ...).

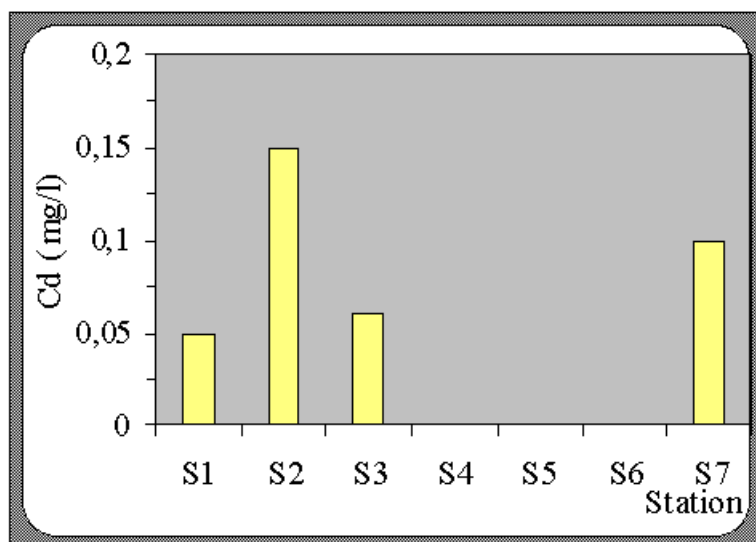


figure 55: Evolution des teneurs moyennes en cadmium

Plomb

Il est présent au niveau des stations et témoigne d'une pollution régulière avec des teneurs qui varient d'une station à l'autre de 0.10 à 0.42 mg/l en moyenne (Figure 56). Ces fortes teneurs sont liées aux rejets des industries utilisant le plomb et ceux des stations services implantées à proximité des oueds (Stations S1, S2 et S3) qui évacuent directement les huiles dans le milieu récepteur.

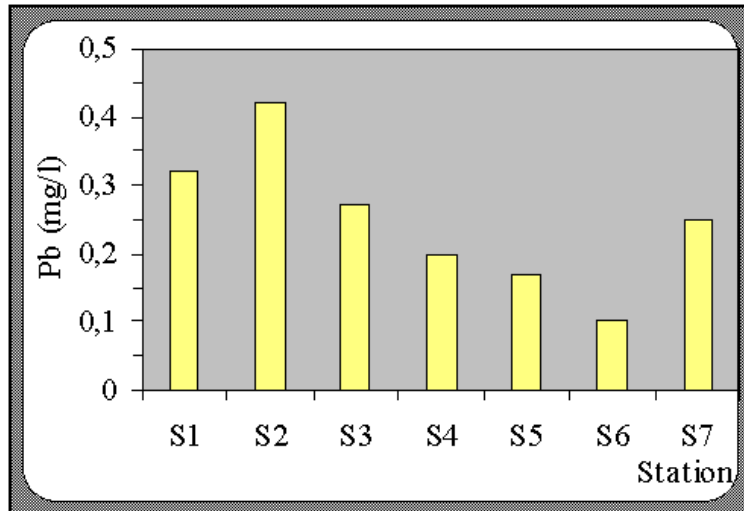


Figure 56 : Variation des teneurs moyennes en plomb

Les chromates

Ils sont présents dans les rejets des Stations S2 et S3 (Figure 57) avec des taux respectifs de 0,12 à 0,45 mg/l. La pollution de ces deux stations est liée aux unités mécaniques implantées entre elles et utilisant le chrome pour le traitement de surface de l'acier.

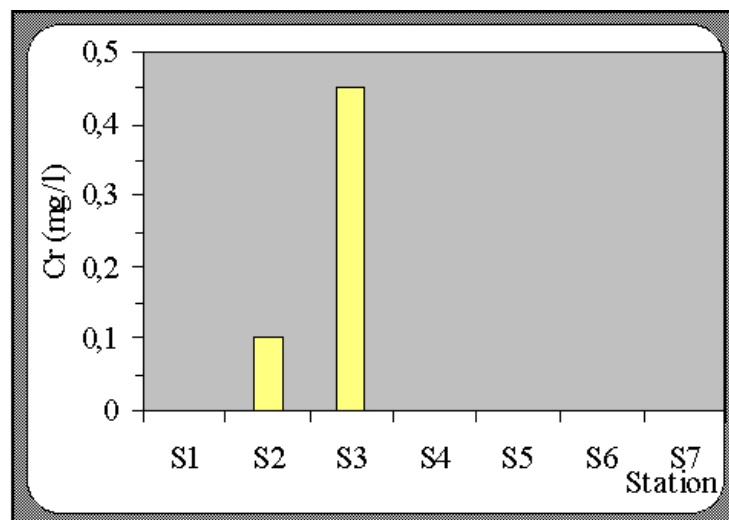


Figure 57 : Variation des concentrations moyennes en chromate

4.4.4.3 BACTERIOLOGIE

Le dénombrement des indicateurs de contamination fécale indiquent que les eaux de ces cours d'eau sont fortement chargées en streptocoques fécaux. Les concentrations moyennes oscillent entre 5000 et 28000 UFC. L'abondance des germes est essentiellement d'origine domestique car l'accès des animaux aux rivières, apparaît très modeste à l'échelle du bassin.

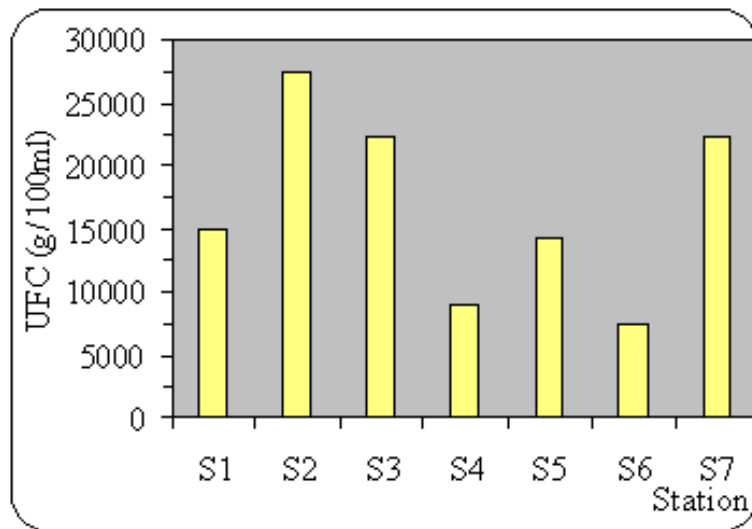


Figure 58 : Variation des concentrations des streptocoques

CONCLUSION

La présente étude a mis en évidence la dégradation quasi- générale des eaux de surface de la région et ce par la présence d'une pollution chimique et bactériologique de l'amont à l'aval des différents sites de prélèvement du bassin de Guelma. Les polluants sont présents à des concentrations qui varient d'un site à l'autre. En général, les sites de prélèvement situés dans la partie médiane, sont les plus contaminés par les rejets urbains et industriels de la ville de Guelma et des villages limitrophes.

La présence surtout des nitrates et métaux lourds en concentrations élevées, est très inquiétante. En effet, surtout les nitrates en fortes teneurs fonctionnent comme un véritable polluant aux effets

perturbateurs, permettant la prolifération des algues et l'eutrophisation des cours d'eau (Claise D et al., 1992) et (ROSECCHIE et al., 1995).

Dans tous les cas, le non traitement des rejets serait à l'origine d'une grande partie de la contamination des eaux superficielles du bassin de Guelma.

4.5 ETUDE DE LA POLLUTION DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES

4.5.1 Contamination par les formes azotées et Orthophosphatées

Les résultats de cette étude indiquent que les activités anthropiques telles que les pratiques agricoles et l'irrigation affectent la qualité des eaux du bassin surtout dans sa partie nord. Les valeurs enregistrées lors d'un suivi bi-annuel 2003 à 2005, varient entre 16 à 140 mg/l dans la partie libre de la nappe et de 14 à 85 mg/l dans sa partie semi-captive pour les nitrates. Les nitrites avec des fortes valeurs enregistrées du côté des forages OM1, OM2, P56 et F8 approchent la valeur de 0.6 mg/l, en revanche les faibles valeurs proviennent de G1 et des forages équipant la partie semi-captive de la nappe. Pareillement l'ion ammonium évolue dans le même sens que les nitrates et nitrites, il varie de 0 à 0.20 mg/l au niveau du forage BA2 et de 0 à 0.3 mg/l dans la partie libre. En effet les fortes valeurs proviennent des puits P10, P51, P56 et F8 (figures 59 à 64). Les orthophosphates sont présents avec des teneurs variant entre 0 et 0.35 mg/l dépassant les 0.1 mg/l durant l'année (figure 64a).

Dans le milieu naturel, les nitrates sont la principale forme d'azote combiné; et ont deux origines :i) -épandage des engrais, source externe, et minéralisation de la matière organique, source endogène (Groen . J et a.l, 1998). L'origine des nitrates ne pourrait être expliquée que par l'apport des engrais azotés utilisés comme fertilisant au niveau du bassin et entraînés depuis la surface par les eaux d'irrigation vers la nappe. En effet les teneurs en nitrate augmentent en période sèche et diminuent en période humide par effet de dilution.

Les nitrites et l'ammonium, ont une origine probablement externe et la pollution des captages n'est la conséquence des eaux polluées pompées depuis la Seybouse et les oueds du bassin versant secondaires irriguant le périmètre agricole. L'absence des nitrites en période de hautes

eaux renforce notre hypothèse. La présence des orthophosphates est la conséquence des rejets agricoles et industriels.

Les concentrations en nitrates des eaux des sources, fluctuent entre les valeurs inférieures à 50 mg/l (figure 65). Cependant les concentrations en nitrates des eaux des sources issues du déversement de la nappe alluvionnaires et du flanc sud-est oscillent entre et au dessus du standard de l'OMS (figure 66).

Les cartes des nitrates établies de l'aquifère montrent que les concentrations augmentent en général du sud vers le nord du bassin figure (67a et 67b). On peut distinguer une zone centrale où les teneurs sont comprise entre 25 et inférieures à 50 mg/l et où l'activité agricole est moins intense ; une zone aval et amont où les teneurs en nitrates augmentent pour atteindre les 140 mg /l au milieu des terres agricoles à cultures intensives. Sur la totalité des points d'eau échantillonnés dans la zone étudiée, la presque quasi-totalité des points d'eau ont montré des teneurs en nitrates supérieures à la norme admise par l'OMS (50 mg/l) .

La présence, dans ces points d'eau, de concentrations excessives en nitrates constitue un indice de pollution et, par conséquent, un risque pour la santé des nourrissons (moins de 6 mois). Elle peut causer des troubles circulatoires : méthémoglobinémie ou blue baby syndrome (Rajagopal, T. Graham, 1989), comme elle peut provoquer le cancer de l'estomac (El Tayeb El Saddig M, 1993). Les nitrates peuvent aussi provoquer l'hypertension et sont les précurseurs de nitrosamines cancérigènes (Castany G., 1982). De plus, les nitrates et les phosphates sont considérés aussi comme polluants secondaires, car ils favorisent le développement d'algues aux conséquences néfastes telles que l'eutrophisation des lacs et des cours d'eau et l'engorgement des turbines en amont des ouvrages hydrauliques (Levallois P, Phaneuf D., (1992), Ben-Akhy R., (1998) et Rosecchi E, et al., . On attribue la présence des nutriments dans les eaux souterraines de la nappe de Guelma, à l'emploi excessif des engrais surtout en période de hautes eaux où l'activité agricole atteint son degré le plus élevé, aux rejets ponctuels et dispersés des produits d'élevage, aux eaux usées domestiques et industrielles qui n'ont subi aucun traitement au préalable avant leur rejet dans le milieu récepteur.

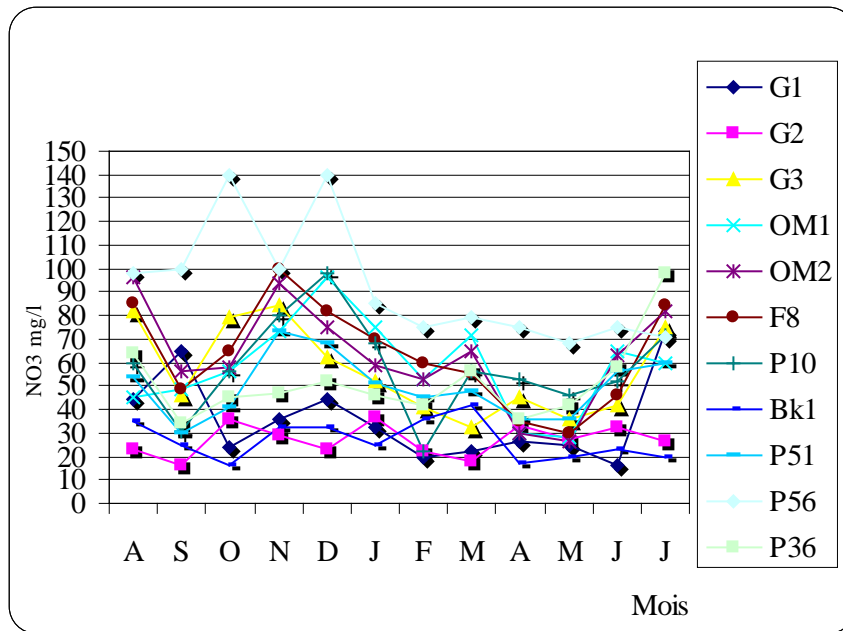


Figure 59 : Evolution spatio-temporelle des nitrates dans la nappe libre

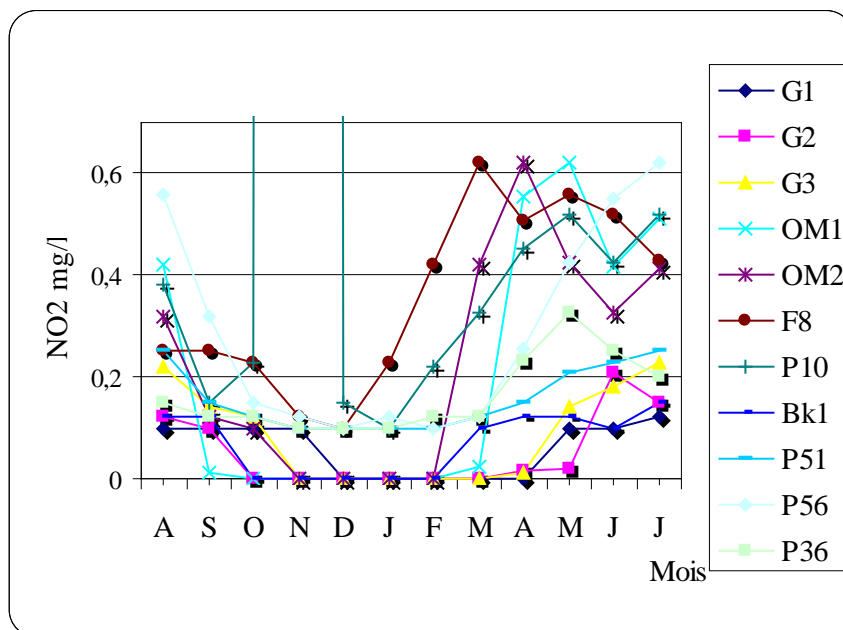


Figure 60 : Evolution spatio-temporelle des nitrites

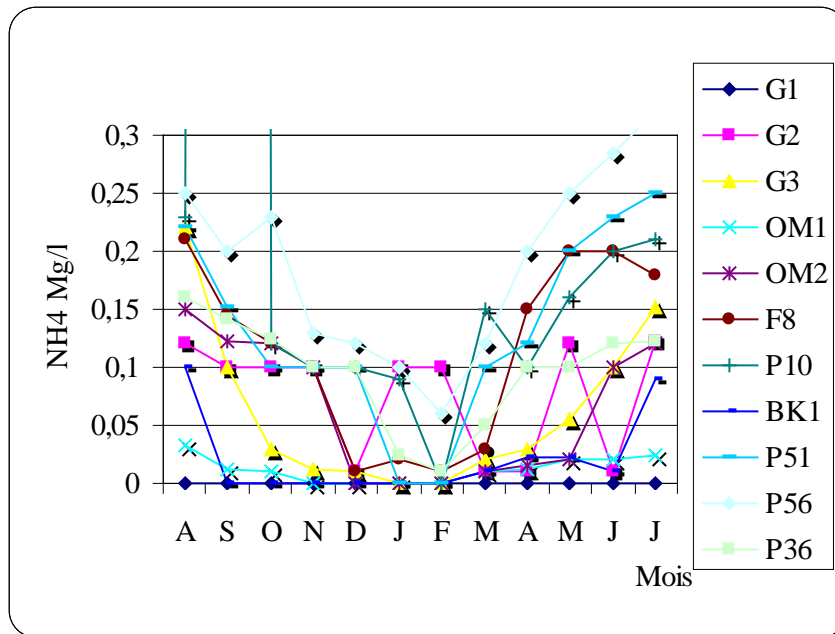


Figure 61: Evolution spatio-temporelle de l'ammonium dans la nappe libre

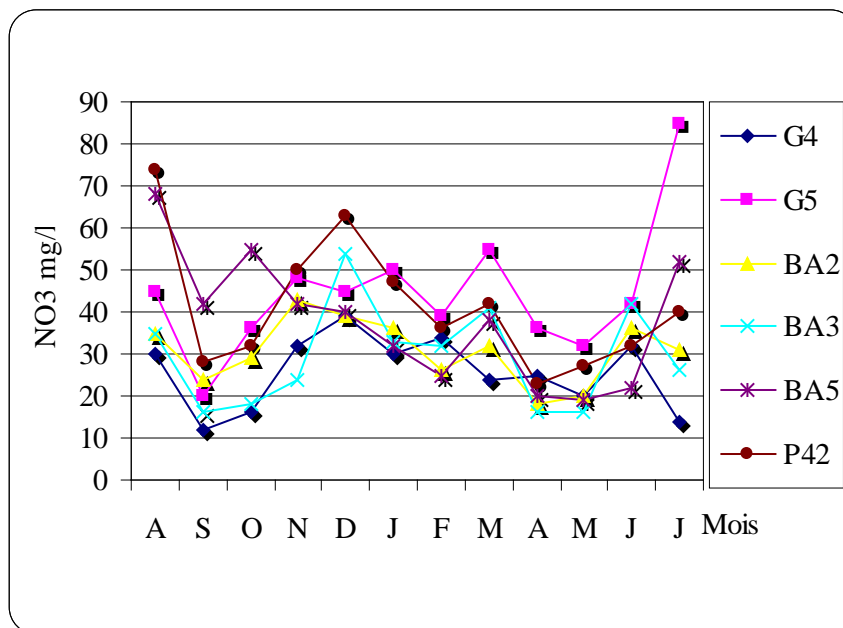


Figure 62 : Evolution spatio-temporelle des nitrates dans la partie semi-captive

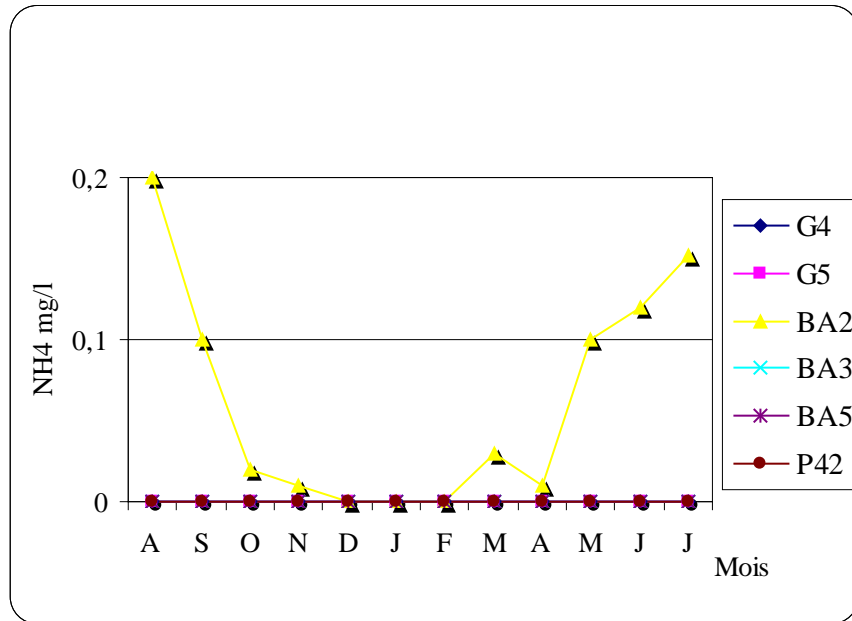


Figure 63 : Evolution spatio-temporelle des teneurs en nitrites dans la partie libre de la nappe

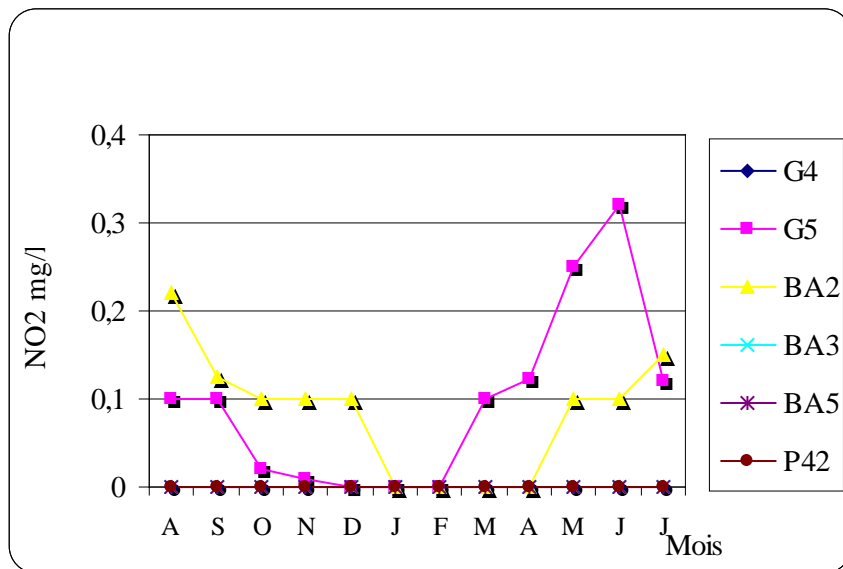


Figure 64 : Evolution de NH_4^+ dans la partie semi-captive de la nappe

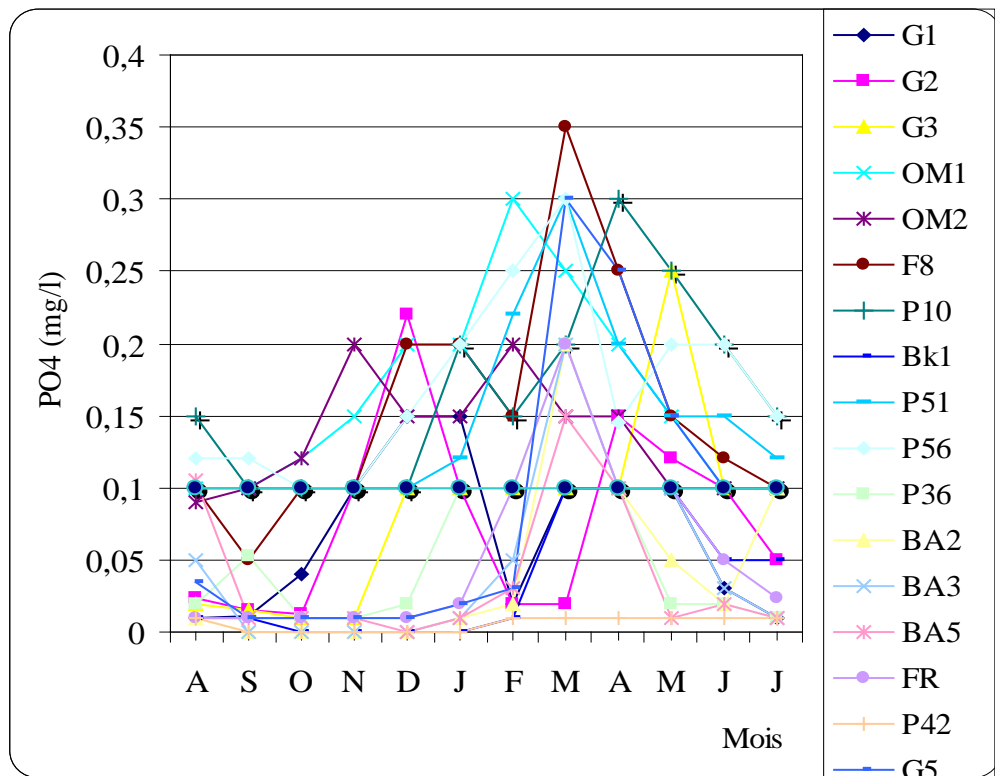


Figure 64 a : Evolution spatiale des teneurs en PO₄³⁻

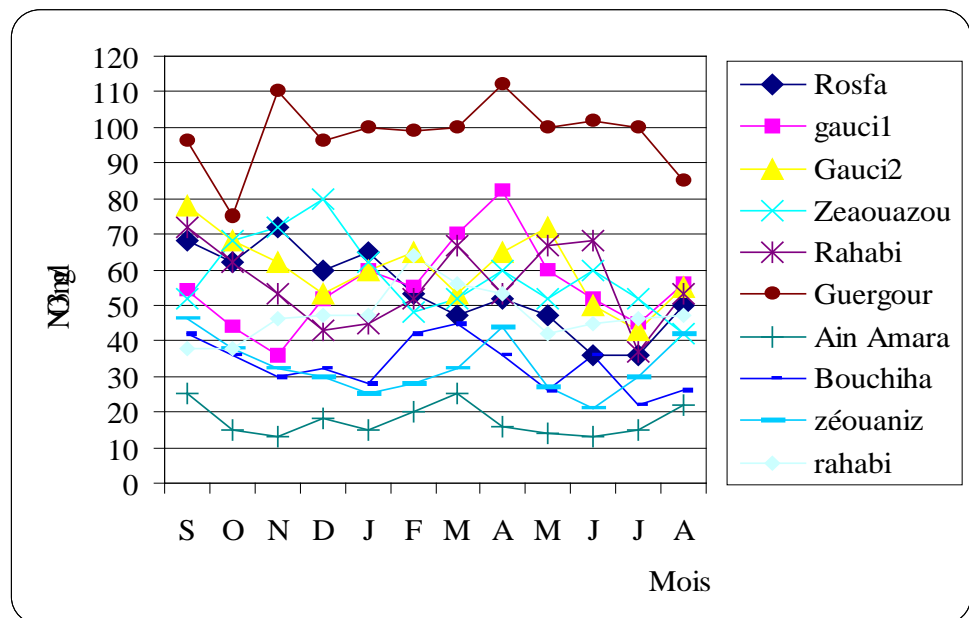


Figure 65 : Evolution des teneurs en Nitrates des sources du centre du bassin

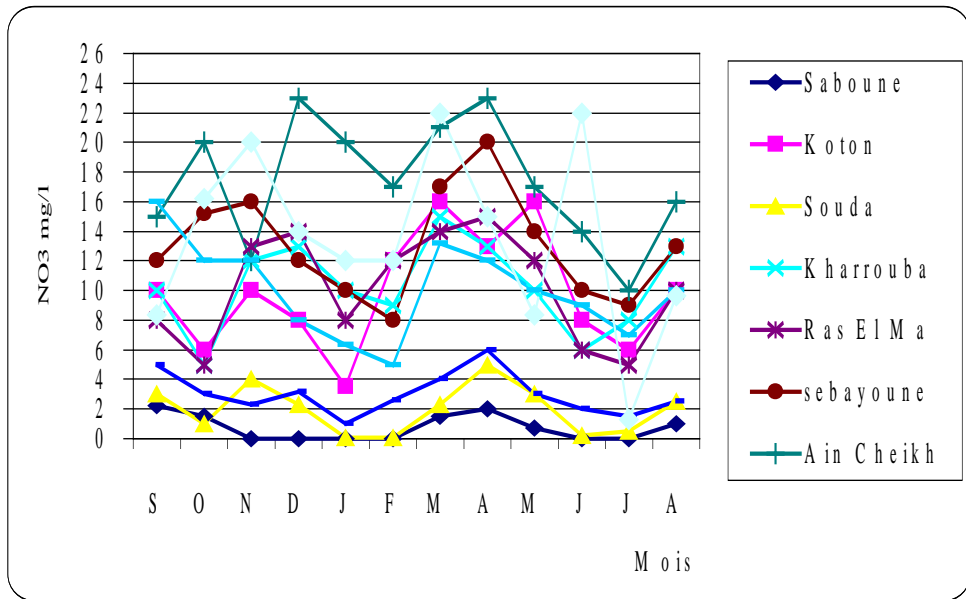


Figure 66 : Evolution des teneurs en Nitrates des sources du centre et flancs sud et sud-ouest bassin

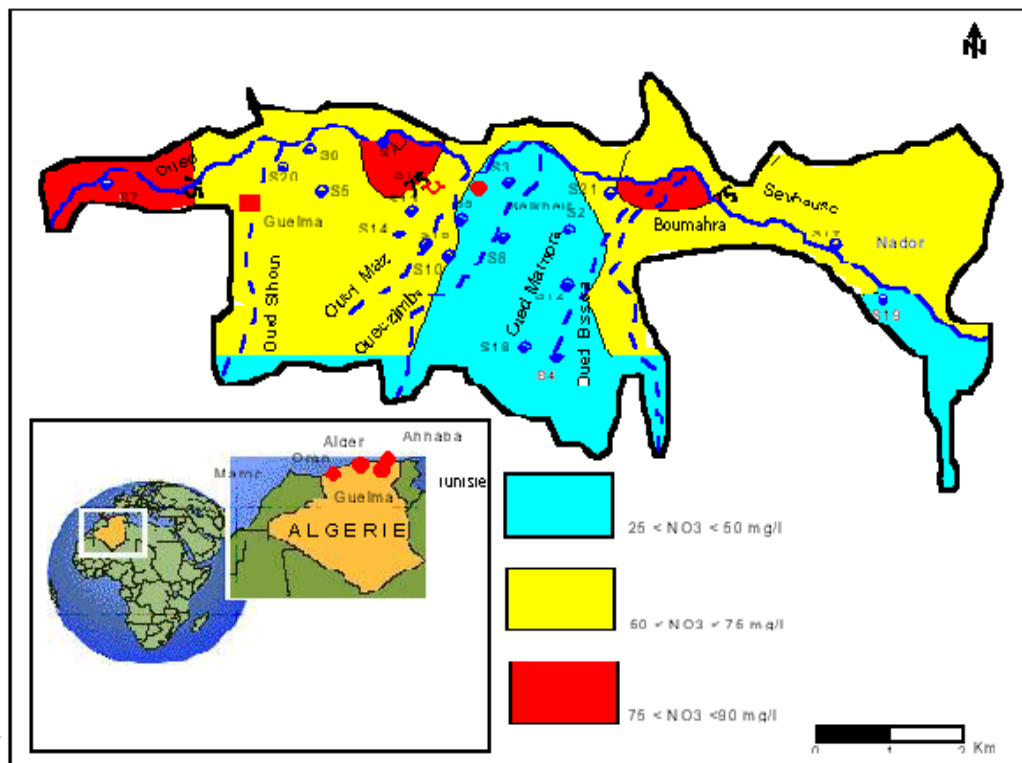


Figure 66a : Carte isoteneur en nitrate, période de basses eaux

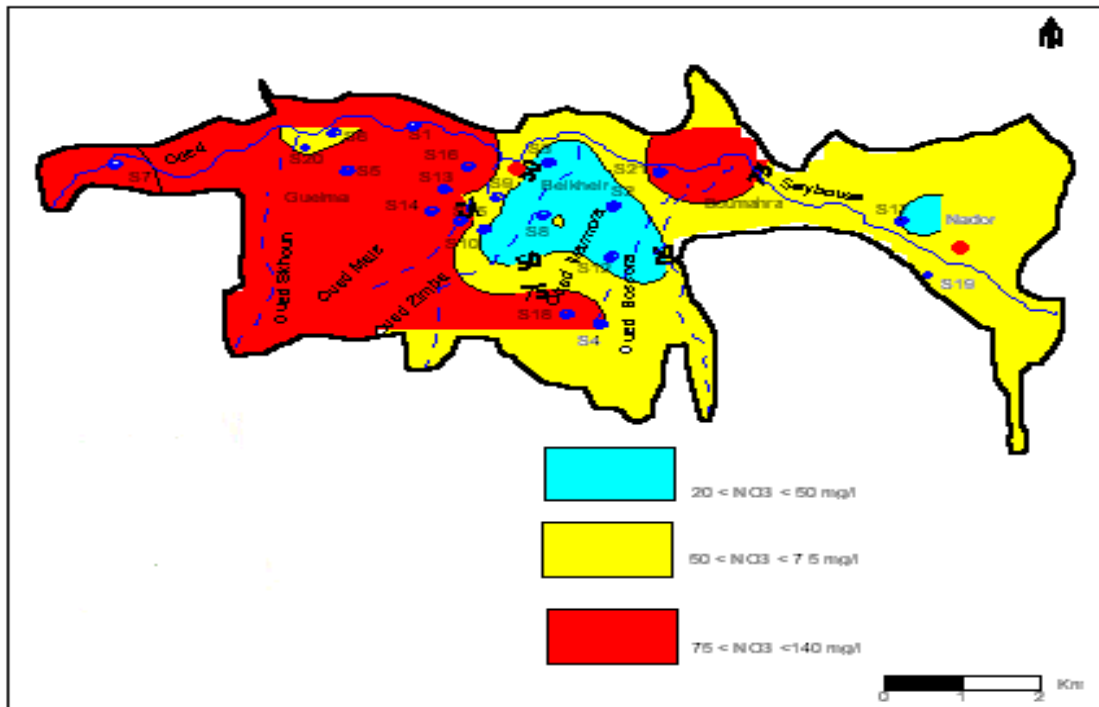


Figure 66b: Carte isonitrate période hautes eaux

4.5.2 CONTAMINATION PAR LES METAUX LOURDS

L'étude de la contamination par les métaux lourds concerne les points d'eau situés à proximité du périmètre urbain et de la source de pollution. Deux campagnes de prélèvement ont été réalisées entre octobre et novembre 2005 dans des forages, puits et sources. Les métaux dosés sont: Pb, Zn, Cr total, Cd, Fe, Cu et Mn. Les résultats sont présentés dans le tableau 30. En général, les concentrations sont variables d'un point à l'autre et d'un élément à l'autre. Ces valeurs sont discutées par rapport à la norme de l'OMS (1998), (tableau 29).

Tableau n°29 : Norme de L'OMS- 1998

Métaux lourds	Norme ug/l
Plomb	10
Zinc	3000
Cuivre	1000
Fer	300
Cadmium	3
Chromates	50
Manganèse	50

Tableau n°30 : Teneurs moyennes en métaux lourds (µg/l)

Point d'eau	Pb	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Zn
OM1	15	1.35	45	85	41	570	59.10
OM2	14	1.20	50	70	37	521	60.12
F11	8	1.00	13	56	20	310	71.18
F8	2.3	1.50	10	66	32.5	290	59.80
BK1	2.0	1.10	0	61.60	40	370	60.90
G1	0.15	1.00	0	55	32	260	44.00
G2	8	1.00	0	50	80	310	57.00
BA2	0.10	0	0	40	42	120	50.30
BA3	0.12	0	0	0.32	52	231	49.50
G4	1.5	0	0	0.2	37	210	32.10
G5	1.0	0	0	0.23	25	275	30.12
P56	12.60	1.50	43	36	37	275	42.56
P51	6.0	1.0	40	28.5	18	380	66.20
P36	1.3	0	0	57	23	400	67.20
P10	1	1.2	60	70	10	320	62.80
G3	1.0	1.2	11	65	15	185	72.50
Rahabi	1.20	1.36	11	68	80	200	30
Gauci1	5	1.20	50	90	70	390	30
Gauci2	2.20	0.12	10	28	30	360	38.50
Rosfa	0	0	0	0	25	285	22.32
Zéoauniz	0	0	32	40	30	120	36.40
Guergour	1	0.8	0	0	32	280	47.90
Bouchiha	1.2	0	0	0	25	270	0

Plomb

Il est présent au niveau de tous les points d'eau à l'exception des sources avec un minimum de 0.10 µg/l au forage BA₂ et un maximum de 260 µg/l au puits P51. En effet l'abondance du plomb ne peut être expliquée que par les rejets des unités industrielles (Naftal, Sonacome, etc...).

Chromates

Ne sont présents qu'au niveau des ouvrages situés aux alentours de l'oued Maiz qui reçoivent une partie des rejets de l'unité industrielle cycma et la source Gauci 1 qui est proche de l'oued skhoun. Les chromates sont transférés de l'oued par les eaux usées destinées à l'irrigation du périmètre. Les teneurs oscillent entre

0 et 60 µg/l, la plus forte teneur est enregistrée au niveau de P10, dépasse les 50 µg/l tolérés par l'OMS.

Cadmium

La présence de cet élément n'est effective qu'au niveau des points d'eau situés dans la partie sud-est avec des concentrations de 0.8 à 1.50 µg/l. Malgré sa présence, la contamination par cet élément reste faible par rapport au standard de l'OMS (3µg/l).

Cuivre

Il est présent dans tous les points échantillonnés à l'exception des sources Rosfa, ain Bouchiha et Guegour. Les concentrations enregistrées restent très largement en dessous de la norme de 1000µg/l.

Fer

Les résultats pour le fer varient entre 18 et 80 µg/l. Ces valeurs sont faibles et restent en deçà de la norme de 300µg/l.

Manganèse

Les valeurs pour le manganèse oscillent entre 120 et 570 µg/l. les fortes valeurs proviennent des forages OM1 et OM2 (570 et 521 µg/l respectivement) et dépassent largement la norme de l'OMS de 50 µg/l.

Zinc

Les teneurs en zinc indiquent des concentrations relativement basses par rapport aux standards de l'OMS de 3000µg/l.

4.5.3 BACTERIOLOGIE DES EAUX SOUTERRAINES

Pour les analyses bactériologiques des eaux souterraines, on a sélectionné quelques points d'eau situés à proximité des rejets. Les résultats sont consignés dans le tableau (30).

Tableau n°31 : analyse bactériologique

Bactériologie	Points d'eau échantillonnés (germe/ml)							
	OM1	Rahabi	F8	G4	P10	Bk1	P51	BA2
Coliformes totaux	1100	00	15	00	100	10	1000	1000
Coliformes fécaux	11	00	2	00	100	10	10	1000
Sulfato-reducteur	70	30	25	00	85	10	10	1000

Les points d'eau échantillonnés présentent une contamination bactériologique conséquence des rejets urbains.

4.5.4 CONCLUSION

L'analyse hydrochimique a permis de déterminer que les concentrations en sels des eaux de l'aquifère de Guelma est due à deux causes : naturelle et anthropique. Les processus naturels sont l'augmentation de la concentration par dissolution, précipitation ou par échange de base. Les processus anthropiques sont les activités humaines responsables de la dégradation de la qualité des eaux du bassin et ce par l'utilisation massive des engrais, des rejets urbains et industriels ; Ces eaux fortement polluées atteignent la nappe par le biais de l'irrigation ; lorsqu'on sait que cette dernière est située dans une couche importante de sable, graviers et galets et que la plus grande partie de l'aquifère n'est pas confiné, par conséquent, il est très vulnérable à la contamination. Le faciès hydrochimique des eaux du bassin est $(Cl^- + SO_4^{2-} + Ca^{2+} + Mg^{2+})$, $(HCO_3^- + CO_3^{2-}) + (Ca^{2+} + Mg^{2+})$ et $(Cl^- + SO_4^{2-} + (Ca^{2+} + Mg^{2+}))$.

La saturation a montré par le biais des indices que les eaux de l'aquifère sont sous saturées en minéraux carbonatés et évaporitiques à l'exception des points d'eau situés à la limite sud du bassin qui présentent des indices en calcite, aragonite et dolomite positifs et qui sont proche de la zone d'alimentation. Les indices de saturation calcite, dolomite et aragonite sont sursaturés en ces minéraux et sous-saturés en minéraux évaporitiques.

Les eaux de surfaces sont fortement dégradées et ce par la présence d'une pollution chimique et bactériologique de l'amont à l'aval. En général, les sites de prélèvement situés dans la partie médiane sont les plus contaminés par les rejets urbains et industriels.

Les ressources en eau souterraine sont surtout contaminées par les formes azotées et phosphatées et à moindre degré par les formes métalliques surtout dans la partie centrale du bassin. Les sources des bordures sud et nord sont protégées et présentent des teneurs en nitrates inférieures à la norme tolérée par l'OMS.

L'analyse bactériologique a montré que les eaux de la nappe sont contaminées par les sulfato-réducteurs et coliforme fécaux.

4.6 CARACTERISTIQUES ISOTOPIQUES DES EAUX DES SOURCES

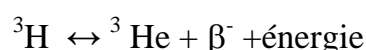
4.6.1 Théorie

On appelle isotope l'ensemble des atomes d'un élément chimique dont les noyaux contiennent le même nombre de protons Z , mais des nombres de neutrons différents, d'où un nombre de nucléons A différent avec ($A = N + Z$).

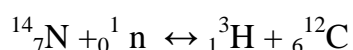
Dans le cas de l'eau, l'isotope le plus commun est ^{16}O , ^{18}O et ^{17}O . L'isotope de l'hydrogène abondant est ^1_1H , puis ^2_1H , et enfin ^3_1H .

Certains isotopes sont stables, d'autres se désintègrent au cours du temps en un autre élément en donnant de l'énergie sous forme de rayonnement, ils sont appelés radioactifs ou instables.

Dans le cas de la molécule d'eau les isotopes de l'oxygène sont stables et le tritium est instable et se désintègre en hélium selon l'équation suivante :



Le tritium naturel est produit dans la stratosphère et la haute atmosphère par l'action des neutrons issus du rayonnement cosmique sur les noyaux d'azote.



Le tritium s'oxyde facilement et rapidement et s'incorpore à la vapeur d'eau, il passe ensuite dans l'atmosphère terrestre où il participe au cycle de l'eau. Sa teneur est mesurée dans les eaux superficielles, souterraines et de surface. L'unité utilisée communément est UT qui correspond à 1 atome de tritium pour 10^{18} atomes d'oxygène de masse égale à 1.

4.6.2 RESULTATS ET APPLICATIONS ISOTOPIQUES AUX SOURCES

Le tableau 42 résume les valeurs du tritium pour les différentes sources

Tableau n°32 : valeurs des concentrations en tritium

Ordre	Sources	Teneur en tritium en UT
1	Ain Saboune	3.3
2	Ain Beida	5.1
3	Ain Sendel	5.3
4	Ain Souda	5.2
5	Ras el Ma	6.9
6	Ain Kharrouba	5.3
7	Sebayoune	3.3
8	Ain Cheikh	7.0
9	Ain Koton	6.9
10	Zéouazou	3.5
11	Ain Zéouaniz	3.1
12	Gauci1	1.5
13	Gauci2	3.6
14	Guelaat bousba	5.6
15	Ain Bouchiha	8
16	Rahabi	3.7
17	Rosfa	1.6
18	Amara	7.8
19	Sellaoua	4.5
20	Guergour	2.6

4.6.2.1 INTERPRETATION DES TENEURS EN TRITIUM

Le tableau ci-dessus donne un aperçu de la teneur en tritium des eaux des différentes sources du bassin. Nous essayons de comparer les résultats à la teneur

en tritium des eaux des précipitations analysées au niveau de la station les salines qui est de 11.4 ± 2.3 UT. A partir de cette chronique de ^3H , et au vu des teneurs observées pour les eaux des sources de Guelma, on peut émettre l'hypothèse que l'écoulement des eaux est de type mélange et la classification suivante peut être proposée :

Groupe 1 : caractérisé par des teneurs < 2 UT, correspondent aux eaux veilles. Ces points se rapportent à la source Rosfa (1.6 UT).

Groupe 2 : Teneur comprises entre 2 et 5 UT, concernent les eaux des sources des formations alluvionnaires. Ces eaux sont le résultat probable de mélange entre les eaux des précipitations et les eaux souterraines.

Groupe 3 : Teneurs supérieures à 5 UT, caractérisent les eaux des sources issues des calcaires et correspondent aux eaux récentes.

4.7 USAGE DE L'EAU

L'usage de l'eau pour l'agriculture, l'industrie et l'alimentation en eau potable, dépend des conditions physico-chimiques des eaux rencontrées au niveau de la région de Guelma.

4.7.1 Usage agricole

Pour évaluer l'aptitude de l'eau pour l'irrigation, nous avons opté pour les méthodes de Wilcox et de Riverside qui sont les plus fréquemment utilisées. Ces deux méthodes sont étroitement liées aux éléments calcium, magnésium, potassium, sodium et à la conductivité électrique.

Dans cette partie, nous avons pris en considération l'analyse de juillet 2004 pour les sources et quelques puits.

4.7.1.1 Classification de Riverside

Selon le diagramme (figure 66), les eaux des sources et puits de la région de Guelma appartiennent à deux classes :

-La classe C_2S_1 caractérisée par une faible salinité, un faible SAR et de faibles teneurs en chlorures ne dépassant pas les 4 méq/l et concernent surtout les eaux issues des sources calcaires de la bordure Sud-Est et Nord.

Selon les normes de La FAO (1985), ces eaux conviennent pour la plupart des cultures et ne leur causent aucun problème.

- la classe $C_3 S_1$ touche les puits et les sources situés dans l'axe Guelma - Boumahra avec un SAR plus ou moins élevé, des teneurs en chlorures dépassent les 4 méq/l et une conductivité comprise entre 1200 et 1600 us/cm. Ces eaux appartiennent à la catégorie à problèmes croissants pour l'irrigation.

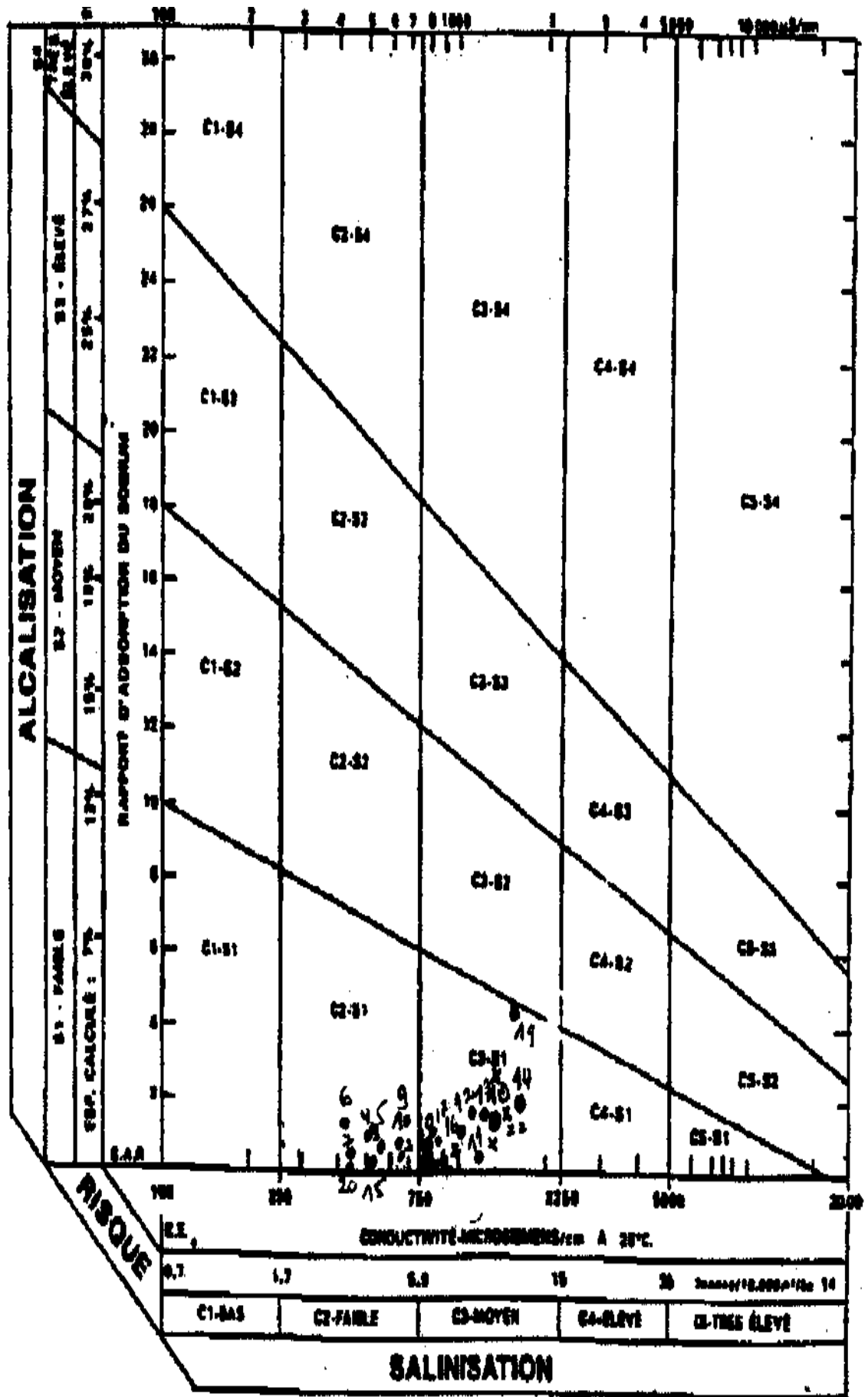


Figure 66 : Diagramme de Riverside

4.7.1.2 Classification de Wilcox

La classification de Wilcox est basée sur la combinaison de la teneur en sodium exprimée en pourcentage et la conductivité électrique. Le pourcentage en sodium est déterminé par la relation suivante :

$$\text{Na}^+ \% = (\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Mg}^{++} + \text{Ca}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)$$

Les résultats sont reportés dans le tableau 43.

Tableau n° 33: Taux en sodium, SAR, Cl⁻ et conductivité électrique (juillet 2004)

ordre	Sources et puits	SAR (méq/l)	Cl ⁻ (méq/l)	% Na ⁺	C (us/cm)
1	Ain saboune	0.76	0.70	20.00	606
2	Ain sendel	0.84	0.95	21.36	638
3	Ain Beida	1.13	0.56	27.99	567
4	Ain souda	1.37	0.78	16.22	516
5	Ain Kharrouba	0.96	0.92	18.80	526
6	Ain Ras el MA	1.32	0.98	17.24	442
7	Ain Sebayoune	0.46	0.61	10.27	515
8	Ain Cheikh	1.12	1.54	40.92	794
9	Ain Koton	0.68	0.61	22.70	584
10	Gauci1	1.67	2.81	25.84	1474
11	Gauci2	0.27	4.11	17.10	1280
12	Rahabi	1.85	2.81	46.92	1322
13	Rosfa	1.46	7.74	23.51	1670
14	Ain Guergour	2.06	3.57	32.44	1391
15	Guelaat Bousba	0.90	1.18	29.90	543
16	Zéaouzou	1.56	2.92	27.45	1150
17	ain Amara	1.01	3.21	23.45	820
18	Ain Sellaoua	1.05	2.08	24.15	806
19	Ain zéouaniz	5.35	4.10	68.99	1417
20	Ain Bouchiha	0.84	1.29	26.98	443
21	P36	2.00	7.70	30	1456
22	P42	1.53	7.20	37	1432
23	P51	2.60	5.10	37	1189
24	P56	2.06	5.10	33	1456
25	P10	3.11	4.50	46	1000

Il ressort du diagramme de Wilcox (figure 67) que les eaux de Guelma appartiennent à 3 catégories :

Classe1 : correspond aux eaux excellentes pour l'irrigation

Classe2 : Correspond aux eaux bonnes pour l'irrigation

Classe3 : Correspond aux eaux admissibles.

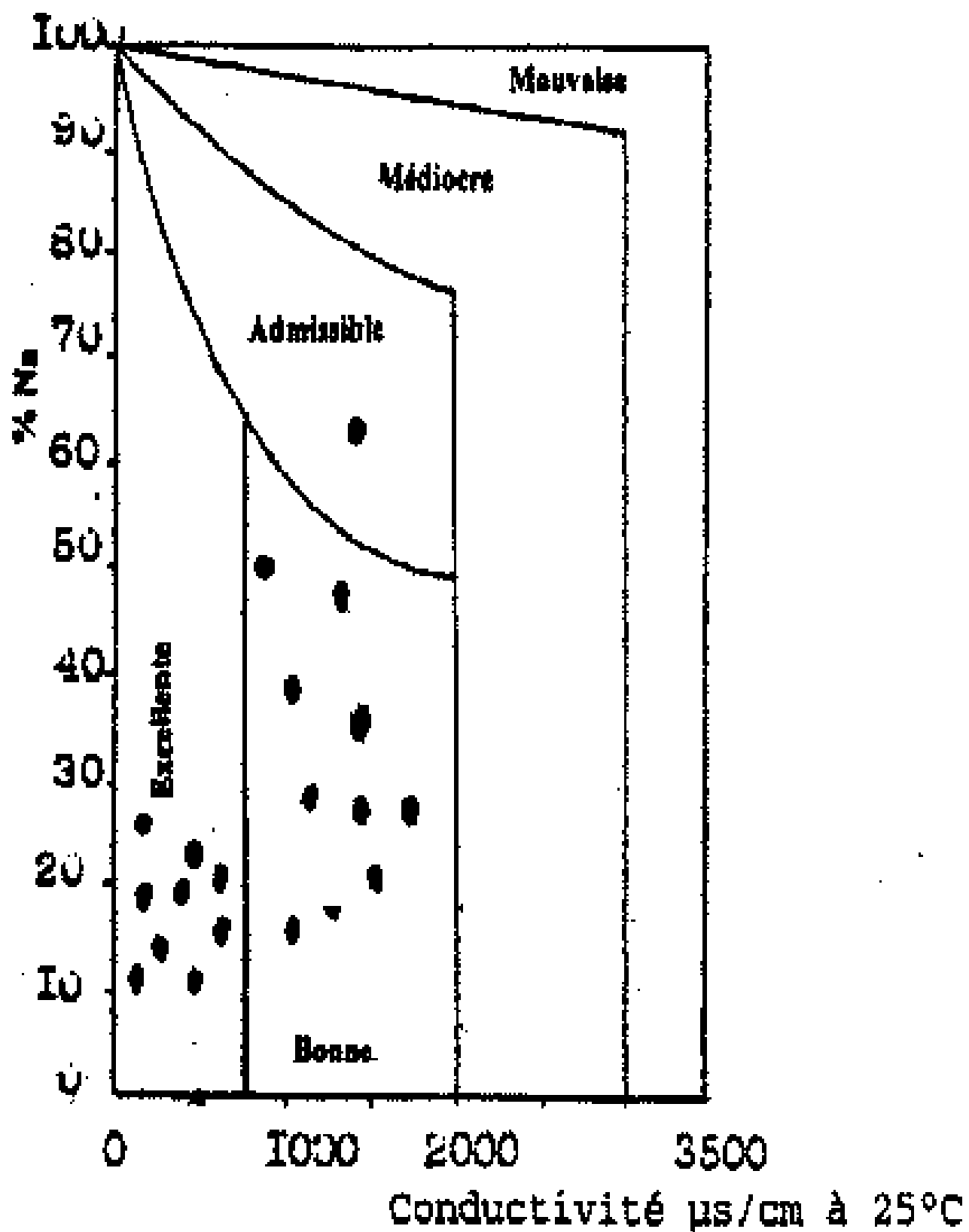


Figure 67 : Daigramme de Wilcox

4.7.2 USAGE INDUSTRIEL

Les eaux destinées à l'utilisation industrielle ne devraient être ni trop incrustantes ni agressives afin d'éviter le dépôt de tartre et la corrosion des circuits de canalisations et surtout des chaudières. Pour déterminer ces caractères, le calcul de l'équilibre calco-carbonique s'avère indispensable.

4.7.2.1 Equilibre calco-carbonique

Le ΔpH , est l'écart entre le pH mesuré et le pH de saturation théorique calculé à partir des teneurs en bicarbonates, sulfates, calcium et magnésium (Bakalowicz. M, 1979). Ce paramètre tient compte de l'ion calcium lié aux bicarbonates et aux sulfates. Le calcul du ΔpH a été réalisé par le programme « équil1) (Ravarini P, 2004). Les résultats sont consignés dans le tableau suivant.

Tableau n°34 : Valeur du Δ pH

Δ pH		
Points d'eau	Basses eaux	Hautes eaux
P36	-2.60	-5.88
Ba3	-2.00	-4.72
G5	-2.40	-3.00
Fr	-2.58	-3.16
G2	-2.80	-3.11
G1	-2.70	-3.50
G3	-3.00	-4.40
Bk1	-2.02	-3.20
F8	-2.33	-3.00
P10	-2.26	-3.50
P42	-2.08	-3.68
P56	-2.24	-2.25
P36	-2.59	-5.88
G4	-1.33	-3.74
Ba2	-2.53	-3.56
Ba1	-2.56	-3.50
OM1	-2.83	-3.38
OM2	-2.67	--4.12
Saboune	0.36	0.03
Sendel	0.40	0.01
Beida	0.54	-0.29
Koton	0.35	-0.15
Ras El Ma	0.10	-0.05
Kharrouba	0.30	-0.06
Sebayoune	0.28	-0.10
Souda	0.03	-0.03
Cheikh	0.27	0.15
Zéouazou	0.03	0.38
Rosfa	-0.47	0.52
Gauci1	0.58	0.10
Gauci2	0.29	0.53
Zéouaniz	0.73	0.48
Guergour	0.47	-1.46
Bouchiha	-1.75	0.47
Amara	-0.26	-0.26
Sellaoua	0.19	-0.20
Guellat bousba	-1.27	-1.35

Il ressort du tableau que les valeurs du Δ pH sont négatives pour les forages, puits et sources situés à la périphérie de la ville de Guelma. Elles confèrent aux eaux de ces points d'eau le caractère agressif vis à vis des carbonates, c'est à dire que les carbonates précipités sont aussitôt repris par dissolution. Cependant les eaux des autres sources présentent des Δ pH positifs, ce qui leur confère le pouvoir entartrant surtout en période de basses eaux.

4.7.3 USAGE A L'AEP

La destination de l'eau à l'alimentation humaine est discutée selon Le pH, la dureté et la minéralisation (TDS).

4.7.3.1 pH

Les eaux du bassin de Guelma présentent des valeurs de pH qui varient entre 7 et 8 donnant ainsi à l'eau une légère alcalinité.

4.7.2 La dureté

Exprimée par le titre hydrotémitrique (TH). En général les eaux du bassin de Guelma présentent un TH compris entre 25 et 54 ° F et 22 à 66°F respectivement en basses et hautes eaux respectivement pour les forages et puits, et de 14 à 70° F et 17 à 58°F en période de basses et hautes eaux pour les sources. En général, les eaux de la région de Guelma sont moyennement dure à fortement dure.

4.7.3 La minéralisation

Elle dépend directement des sels actifs (Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+) associés aux SO_4^{2-} et aux Cl^- abondants dans les résidus secs (figure 68a et b). Ces eaux présentent des teneurs en sels dissous qui varient de 0,5 à 1 g/l au sud et augmentent progressivement vers le Nord avec des concentration comprises entre 0.40 et 1.42 g/l. La répartition spatiale de la salinité au niveau de la nappe, coïncide et augmente avec le sens d'écoulement de cette zone. Ainsi, la salinité des eaux augmente en période de basses eaux sous l'effet de la remontée en sels et diminue en période sous l'effet de dilution. La salinisation observée semble être lente ; elle est due au caractère exoréique du bassin. En effet, dans un bassin endoréique, l'apport de sel par les eaux d'irrigation serait suffisant pour entraîner une salinisation rapide des sols (J L . Barrios et al, 2002).

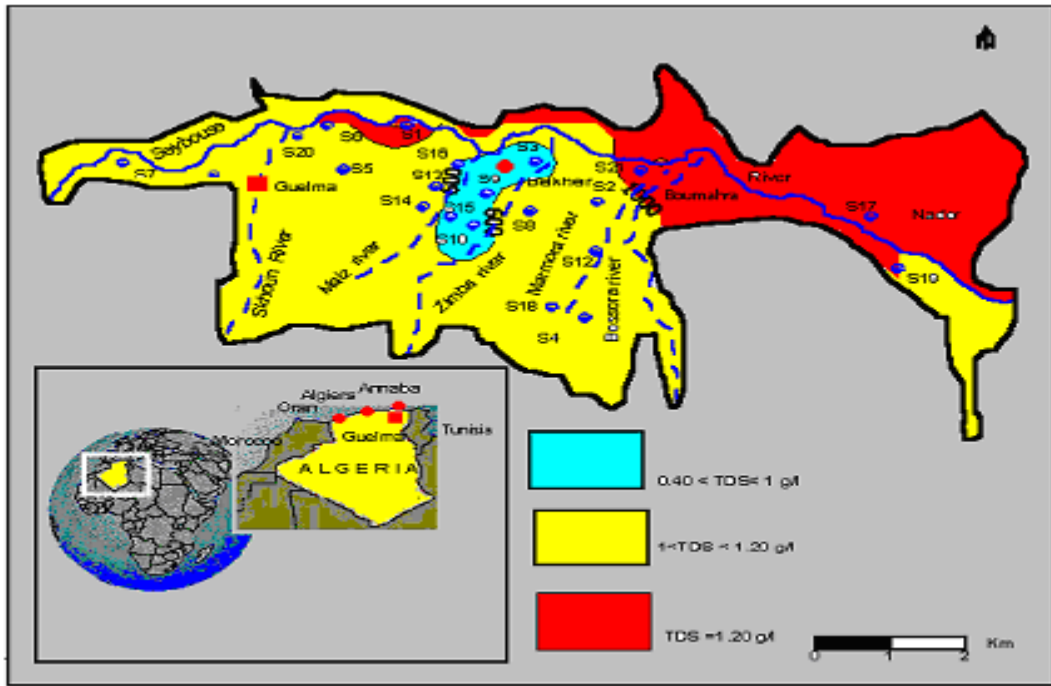


Figure 68a : Carte de salinité moyenne de la nappe (période de hautes eaux)

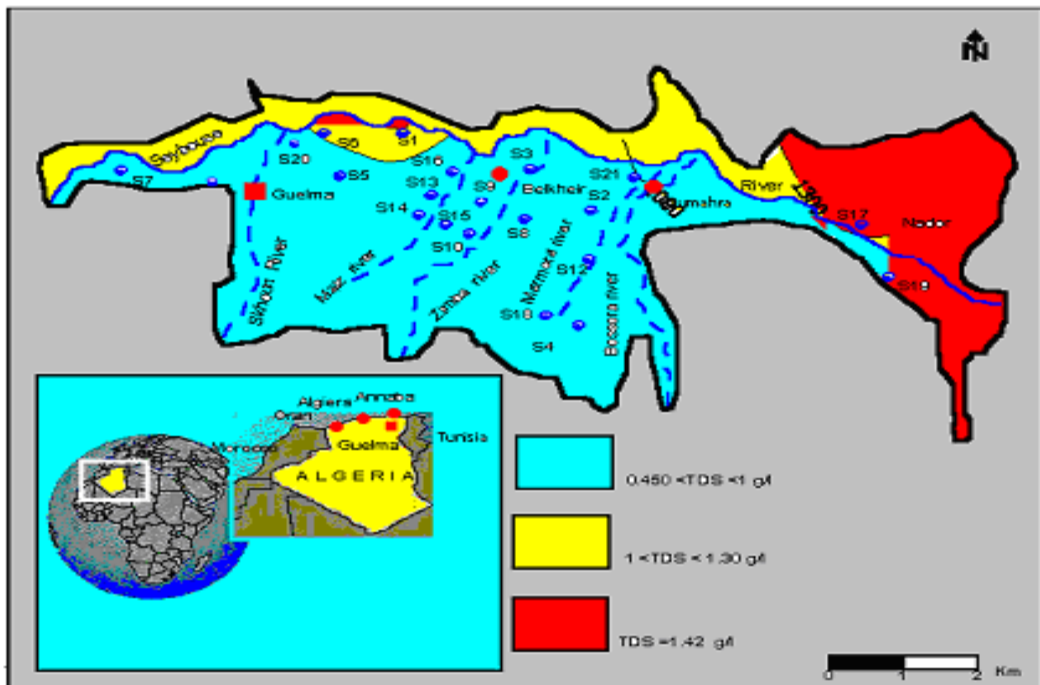


Figure 68b: Carte de salinité des points d'eau de la nappe (période de basses eaux)

4.7.4 CONCLUSION

Les classifications de Riverside et Wilcox, appliquées aux eaux de la région montrent que la salinité croît dans les puits situés à proximité de L'oued Seybouse. Ces eaux sont en général acceptables pour l'utilisation agricole, mais nécessitent un contrôle préalable surtout en chlorures. L'influence des formations lagunaires se traduit par des teneurs élevées en chlorures à Guelma. En effet, en plus du goût saumâtre, la présence excessive de chlorures de sodium dans l'eau peut être préjudiciable aux différentes cultures.

Le calcul du ΔpH a montré que les eaux de Guelma sont en général agressives vis à vis des carbonates par conséquent elles ne laissent pas se former le mince film protecteur des conduites.

Si du point de vue paramètres physiques, les eaux des forages, sources et puits de la région de Guelma sont plus ou moins aptes à la potabilité surtout dans sa partie centrale (point d'eau émanant de l'aquifère), ce n'est plus le cas pour les composés azotés et phosphatés qui les polluent et dépassent dans la majeure partie les 50 mg/l et les 0.1 mg/l tolérés (voir pollution souterraine). En revanche les eaux des sources calcaires sont aptes à la potabilité et ne présentent aucun signe de pollution.

CONCLUSIONS GENERALES

La région de Guelma est située au Nord-est de l'Algérie orientale. Cette région est connue par des potentialités hydriques importantes caractérisées surtout par les eaux souterraines et de surface. Les eaux souterraines proviennent des forages, puits et sources qui sont captés pour satisfaire la demande en eau de la ville de Guelma et les villages de la région où jadis l'eau était de qualité rurale. En effet, le développement agricole, industriel, urbain et les constructions anarchiques avec des rejets non assainis font que les eaux souterraines et les eaux de surface situées aux alentours de Guelma sont dégradées en qualité.

D'un point de vue géologique, la région de Guelma est considérée comme un bassin subsident à remplissage détritique du plio-quadernaire reposant sur un substratum miocène constitué par des argiles et marnes à gypses où parfois le soufre s'intercale. La géométrie du réservoir plio-quadernaire tient même du mode de dépôts des sédiments détritiques qui dépassent 200 m d'épaisseur au centre de la dépression. L'organisation de ces dépôts en séquences sédimentaires et même en cycle, favorise l'existence de niveaux préférentiels d'écoulements communicants au sein d'une matrice argileuse. Ce système aquifère libre à semi-captif constitue une même unité hydrogéologique (homogène en grand). La nature du sol à deux principaux aspects; i) une texture grossière (blocs de différentes tailles) près des bordures des oueds et des massifs polygéniques, et ii) une texture plus ou moins fine constituée par des argiles, graviers, sables au centre, du gypse et sels au Nord de Guelma et s'étend jusqu'à l'ouest de Belkheir. Ce bassin ayant comme bordure

les calcaires crétacés ultra-telliens et de grés numidiens au Nord, tandis que la limite Sud Est constituée par les calcaires crétacés du Néritique et des grés numidiens du massif de la Mahouna.

D'un point de vue hydrogéologique, les marnes et les argiles ont un comportement aquitard et/ou aquiclude. Les galets et graviers, graviers et sables, graviers et argiles plastiques rouges à jaunes, ont un comportement aquifère. L'alimentation de l'aquifère est régie principalement par les précipitations, l'infiltration des eaux d'irrigation et par alimentation occulte à partir des bordures calcaires fissurées. L'exutoire de l'aquifère s'effectue par prélèvement dans les captages pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau de la ville de Guelma et des villages limitrophes, par évaporation, par écoulement souterrain vers les oueds et par déversement sur les marnes en donnant naissance à plusieurs sources. L'écoulement souterrain se fait en général du sud vers le nord et suit sensiblement la direction de l'écoulement général de l'oued Seybouse.

Les transmissivités sont importantes au Nord et deviennent faibles au sud à cause des formations fines dans cet endroit.

Les eaux des nappes calcaires sont piégées par des failles et remontent en surface par des fissures.

L'établissement des cartes de vulnérabilité DRASTIC ont mis en évidence la vulnérabilité de la nappe de Guelma à la pollution par les pesticides et par les polluants en général.

Du point de vue hydrochimique, la minéralisation est caractérisée surtout par les chlorures, sulfates, calcium et magnésium pour les forages, puits et sources situées au centre du bassin et bicarbonaté calcique et magnésien pour les sources des bordures calcaires du sud-est, sud-ouest et les sources de la frontière Nord.

Les valeurs obtenues de l'indice de saturation pour la calcite, l'aragonite, la dolomite et le gypse ainsi que la pression partielle de CO₂, montrent que les eaux des puits, forages et sources de l'aquifère de Guelma sont quasi sous-saturées en calcite, aragonite et dolomite ce qui leur donnent un enrichissement en calcium et magnésium. En revanche les points d'eau situés en bordure sud, donc situés dans la zone de transit des eaux en provenance de la zone d'alimentation, présentent des indices positifs, et sont donc sur-saturés en ces minéraux.

Les indices de saturation obtenus pour les sources situées hors du sous bassin de Guelma montrent qu'elles sont sursaturées en calcite, aragonite ce qui se traduit par un appauvrissement en calcium et une sous-saturation en dolomite et gypse, ce qui se traduit par un enrichissement en magnésium, sulfate et calcium.

Les indices de saturation obtenus pour la dolomite et le gypse, démontrent une sous-saturation généralisée en ces minéraux qui est, peut-être, à l'origine des hautes teneurs obtenues en chlorures, en magnésium, en sodium et en sulfates. Les valeurs obtenues de la pression partielle en CO₂ sont en général faibles dans la majorité des points d'eau étudiés, alors qu'elles augmentent dans les forages, puits et source qui se trouvent probablement dans le flux souterrain des eaux les plus minéralisées

L'étude de la pollution superficielle a mis en évidence une dégradation totale quasi-générale et ce par la présence d'une pollution chimique et bactériologique de l'oued Seybouse et des oueds du bassin versant secondaire. L'abondance des nitrates et métaux lourds se révélant très inquiétante. En effet, les nitrates en forte concentration constituent un véritable polluant aux effets perturbateurs de l'écosystème.

Les eaux souterraines proches de la ville de Guelma sont polluées par les formes azotées et phosphatées. La présence des métaux lourds varie en fonction de la nature et de la répartition géographique des sources de pollution par rapport aux points de prélèvement. En effet, les industries (briqueterie, mécanique, galvanoplastie et céramique) situées sur le bassin seraient probablement à l'origine de la présence des métaux lourds dans les eaux souterraines. Par ailleurs, et malgré la présence des métaux lourds dans ces eaux, les teneurs enregistrées au niveau de tous les points d'eau restent en dessous des standards de l'OMS à l'exception du manganèse et des chromates.

Les eaux des sources situées hors du sous-bassin de Guelma présentent des teneurs en nitrates qui fluctuent en dessous de la norme fixée par l'OMS.

En somme les eaux du bassin central de Guelma sont polluées. Cette pollution est la conséquence des rejets les plus variés et atteignent les eaux souterraines par le biais des eaux d'irrigation du périmètre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdi A et al, (1991) Géophysique, hydrogéologie et hydrochimie de la vallée de Seybouse (Guelma-Boucheougouf-Moumna), mémoire d'ingénieur –Univ. Annaba.

Al Agha M.R (2005) Hydrogeochemistry and carbonate model of groundwater, Khanyounis governorate- Gaza Strip, Palestine. Environ. Geol. Volume 47,pp (898-906).

Aller L ., Benett T., Lehr J. H . et al. (1987) DRASTIC a standardization system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, national water well association. Report EPA-600/2-87-035,455 p.

Al Zabet T (2003) Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. Environmental geology, Vol. 43 pp (203-208).

ANRH : Relevé pluviométrique du bassin de Guelma.

Anonyme : Cours d'hydrochimie de l'université de Franche comté, Besançon, France.

Afnor. Eau : méthodes d'essai. Paris : afnor, 3^e éd, 624 p.

Ben-Akhy R., (1998). Etude des impacts anthropiques sur les eaux souterraines du Sahel oriental tunisien :caractérisation géologique, modélisation mathématique et cartographie de la vulnérabilité environnementale''. Thèse de Doctorat. Univ. Tunis II, F.S.T, 337

J L .Barios Gonzalez, J O. Job JO, R. Ahlers, Irrigation et salinisation des sols dans la partie basse aride du bassin Nazas-Aguanaval : le périmètre de la Comrca Lagunera (Nord-Mexique). Sécheresse; Vol. 13 : 244-50 (2002).

Benavente J et al., (1990) Content analysis of stable isotopes in aquifers from the coastal mountains chain of Gador-Lujar (South East of Andalusia, Spain). Memory of the 22nd conference of IAH, Volume XXII, Lausanne, pp (415-432).

Ben Hayahoum et al., (1993) Contribution à l'étude géophysique, hydrochimique et hydrogéologique de la vallée de la Seybouse. Mémoire d'ingénieur- Univ. Annaba, 3 tomes 300 p.

BNEDER (1983) Bureau national d'étude et de développement rural. Projet de développement rural intègre de la wilaya de Guelma.1^e partie. Volume1. Etude de base. Tome I. Etude climatique et hydrologique. Ministère de l'hydraulique, Alger.

Castagny G (1967) Traité pratique des eaux souterraines. Edit., Dunod, Paris, 643p.

Castagny G (1980) L'eau propre. Ed., Hachette, Paris, 192 p.

Castany G (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie'' Paris : Dunod, 236

Champagne L. R., Chapuis P. (1993) Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Mont Calm selon la méthode DRASTIC. Rev. SC. et tech, de l'eau, Vol.26 (3).

Casus J.Y., Comon D & Segrin J.J (1984) Evolution des teneurs en nitrates de la nappe de la craie, essai de prévision. Rapport du BRGM, Orléans, 36 p.

Chauve et al.,(1989) Qualité physico-chimique des eaux de la nappe alluviale de Franche Comté, Laboratoire de géologie structurale et appliquée, 206 p.

Chippaux J.P., Houssier S., Gross P., Bouvier C., & Brissaud C (2002) Etude de la pollution de l'eau de la ville de Niamey. Bull Soc Patho, 2002, pp (119-123).

Chouabi A (1987) Etude géologique de la région de Hammam N'bails Sud-Est de Guelma-Constantine, Algérie, un secteur des Maghrébides, pp (35- 49).

Claise D.,(1992) Le réseau national de l'observation de la qualité du milieu marin (RNO). Anal magaz 1992 ; 20 : 19-22.

C.G.G (1971) Compagnie générale de géophysique : prospection géophysique de la plaine alluviale de l'oued Seybouse et ses affluents, région de Guelma, 35p.

De Boer J., Van der Zande T.E., Pieters H & al. (2001) Organic contaminants and trace metals in flounder liver and sediment from Rotterdam harbours and off the Dutch coast. *J Environ Monit*; volume 3, pp (386-393).

Djabri L (1994) Etude des caractéristiques d'une nappe côtière de l'Est algérien (cas de la nappe de Guelma-Bouchehouf-Annaba), *Revue Hydrogeologia*, numéro 10, pp (13-29).

Djabri L (1997) Mécanisme de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse. Origine géologique, industrielle, agricole et urbaine. Thèse de doctorat en Sciences, Univ. Annaba, 261 p.

Djabri L., Hani D., Mania j & Mudry J (2000) Conséquences des pratiques agricoles sur la qualité des eaux du bassin de la Seybouse (Est Algérien). Colloque international ESRA 2000, Poitiers-France. S3-39-42.

Darest de La Chavanne (1907) Sur la découverte de la formation sulfo-gypseuse dans le bassin de la Seybouse. *C. R. Ac. Sc.* 29 Juillet, 1907.

Darest de La Chavanne (1910) Etude spéciale des terrains tertiaires.

Debièche T.H (2002) Evolution de la qualité des eaux (salinité, acidité et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle : Application à la basse plaine de la Seybouse, N.E. algérien. Thèse de Doctorat, Univ. de Franche Comté, France, 200 p.

Degremont (1989) *Mémento technique de l'eau*, 2 tomes, Ed.; Masson, 1415p.

D.H.W (2005) Bilan des rejets domestiques et industriels du bassin de Guelma. Rapport inédit, 20 p.

Desbordes A (2000) pollution des eaux souterraines en Picardie. Mém. Maîtrise BG, Fac. Sciences, Amiens, 50p.

El Hraiki A., Kessabi M., Sabhi Y., Bernard P & Buhler D. R (1992) Contamination par le cadmium, le chrome, le mercure, et le plomb. Pêche marocaine prélevée en mer Méditerranée. Rev Wat Med ; pp (49-56-143).

M. El Tayeb El Saddig, Les systèmes aquifères de la région de Génina-Adré (confins soudano-tchadiens) : hydrogéologie, hydrochimie et géochimie isotopique. Thèse univ. Avignon, (1993).

FAO (1985) La qualité de l'eau agriculture. Bull. FAO irrig. Drainage, n°29.

Fontes J.C (1976) Les isotopes du milieu dans les eaux souterraines. La houille blanche, volume 3, pp (205-221).

Gaud B (1988) Etude de la nappe alluviale de la plaine de Guelma, rapport inédit 85 p, DMRH, Annaba.

Ghachi A (1982) Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie, le bassin de la Seybouse, thèse de doctorat 3^{ème} cycle, Univ. Nancy 2, 372p.

Grefford j., Saria C. & Bourg. A (1987) Etude de la contamination des sols sous les champs d'épandage d'Achères. Revue Hydrogéologie n°3, pp (55-64).

Groen J., Schuchmann J.B et Geirnaer T.W (1998) The occurrence of high nitrate concentration in ground water in villages in North Western Burkina Fasso. Journal African Earth sciences; n°7,pp(45-58).

Halimi A (1980) L'atlas blidéen, climats et étages végétaux. O.P.U., Alger, 523p.

Hani A (1987) La nappe alluviale de la Moselle en Lorraine, essai de synthèse des puits et forages. Thèse de Docteur-ingénieur de l'école polytechnique de Lorraine, 180 p.

Hani A (2003) Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : applications aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de doctorat Es- Sciences, Univ. Annaba, 214 p.

Hasnaoui R., Labadlia S (2005) Etude physico-chimique des eaux du bassin de Guelma. Mémoire d'ingénieur sous la direction de Nouar Tahar, Univ. Guelma, pp (31-33).

Hiscock K.M., Loyd D.N & Lener D.N (1989) Pollution des captages. Profils de nitrates le long des sections de plusieurs forages en chemisant la partie supérieure. Journal Hydrol. 107, n° ¼ , pp (267-281).

Isabel D., Gelinas P & Aubre F. (1990) Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. REV. SC. et Tech. de l'eau, Vol. 23, pp (255- 258).

Khérici N (1993) Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système superposé en milieu industriel et agricole(Annaba- la Mafgragh) Nord-Est Algérien. Thèse de doctorat és Sciences, univ. Annaba, 170 p.

Lahondère J.C (1987) Les séries ultra-telliennes d'Algérie Nord-orientale et les formations environnantes dans leur cadre structural. Thèse de doctorat és-Sciences ,univ. Paul Sabatier, Toulouse, France, 238 p.

Landreau A & Roux J.C, (1984) Les nitrates dans les eaux souterraines. Exemples de répartition et d'évolution des teneurs dans quelques aquifères Français. Rapport BRGM, Orléans.

Landreau A et al., (1986) Procédé de dénitrification des eaux souterraines en vue de leur potabilité. Rapport BRGM, Orléans.

Levallois P, Phaneuf' D., (1992) Les risques associés à la contamination de l'eau potable par les nitrates. Pub Rés Santé publique Québec : 3 – 4.

Majour H (1996) Utilisation de l'analyse statistique pour l'étude du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique du réservoir cristallin de l'Edough (Nord–Est Algérien). Mémoire de magister, 116 p.

Montorot J.P et Al., (1987) Calcul des activités ioniques dans une solution aqueuse, programme actif pour IBM/PC compatible, Cah. ORSTOM, Service. Pédologie, vol. 13 n°2, pp 113-150.

Moser H et al (1989) Deuterium, oxygene 18, and tritium in Stripa ground water

Nouar T(1997) Hydrogéologie et hydrochimie du bassin de Guelma, mémoire de Magister, univ. Annaba. 87 p.

Nouar T & Messadi D (2004) Thermodynamique des sources de la région de Guelma. Séminaire national JSTA 1, univ. Guelma, mai 2004.

Nouar T., Kachi S & Messadi D (2004) Qualité physico-chimique et bactériologique des eaux des sources de la région de Guelma, séminaire national de géologie, univ. Tébessa.

Nouar T., Toumi A & Messadi D (2005) Etude de la pollution des eaux superficielles du bassin de Guelma. Revue LJEE, n°6, pp (32-40), 13 fig.

Parkhurst DL, Thorstenon DC, Plummer LN. PHREEQ (1990) A computer program for geochemical calculations. USGS water resources investigations report;. 80-96, 1990; 210 p.

Piper A (1944) A graphic procedure in geochemical interpretation of water analysis. Trans. Am . Geophys Union 25: pp (914-928).

Ramade F (1992) Précis d'écotoxicologie. Paris, édition, Masson, 300 p.

Rajagopal, T. Graham , " Expert opinion and groundwater quality protection. The case of nitrate in Drinking water". *Groundwater* 1989 ; 27.

Rodier J., Bazin C, Broutin J.P, Chambon P, Champsaur H & Rodi L., (1996) L'analyse des eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Paris : Dunod, 8^e édition, 1996; 1383p.

Rosecchi E (1995) L'aquaculture en milieux lagunaires et marins. Conservation des zones humides méditerranéennes. *Wat Med* 1995; 3 :94.

Schoeller H (1962) Les eaux souterraines, hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Ed. Masson et Cie,; 640 p.

Serghini A., Fekhaoui M., El Abidi A & al, (2003) Contamination métallique des eaux souterraines de la ville de Mohammadia (Maroc). Cahiers d'étude et de recherche francophone/santé. Vol.13, n°3 pp 177-182.

Sogreah (1989) Etude intégrée de la wilaya de Guelma. DHW Guelma, 182 p.

Stoyanov A (1974) Alimentation en eau potable des communes (Bensmih, Bendjarah et Guellaât Bousbaa), DHW Annaba.10 p.

Thornthwaite, C.W (1948) An approach towards a rational classification of climate. Geographical review 38,55-596.

Stitou J & Pulido-Bosch A (1995) Impacts anthropiques sur l'aquifère alluvial de Smir (Tétouan , Maroc). Revue hydrogéologie, n°3, pp (30-36), 6 fig., 2tabl.

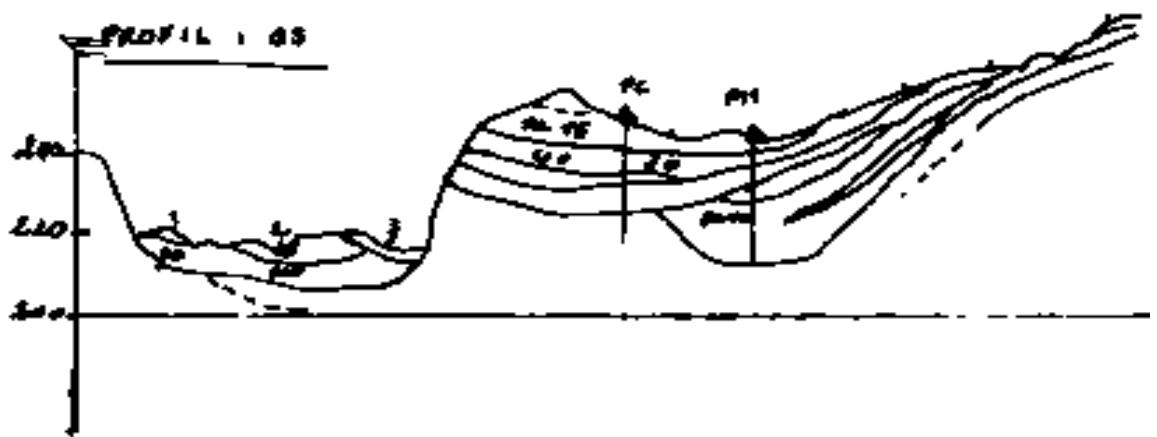
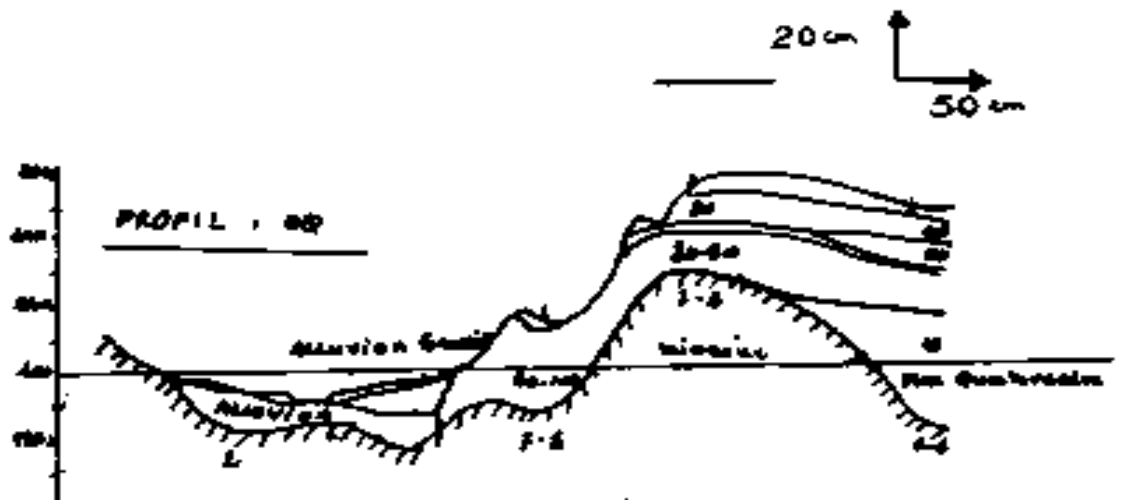
Turc L (1954) Le bilan d'eau des sols : relation entre précipitation, l'évapotranspiration et l'écoulement. Ann. Argon, 5, pp (491-496).

Vila J.M (1980) La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse de Doctorat és-Sciences, univ. Pierre et Marie Curie. Paris VI, France pp (58-72).

Vila J.M (1988) Carte géologique au 1/50.000 de Guelma et notice explicative rédigée par Vila J. M. Pub. Serv. Carte géol. Algérie, Alger.

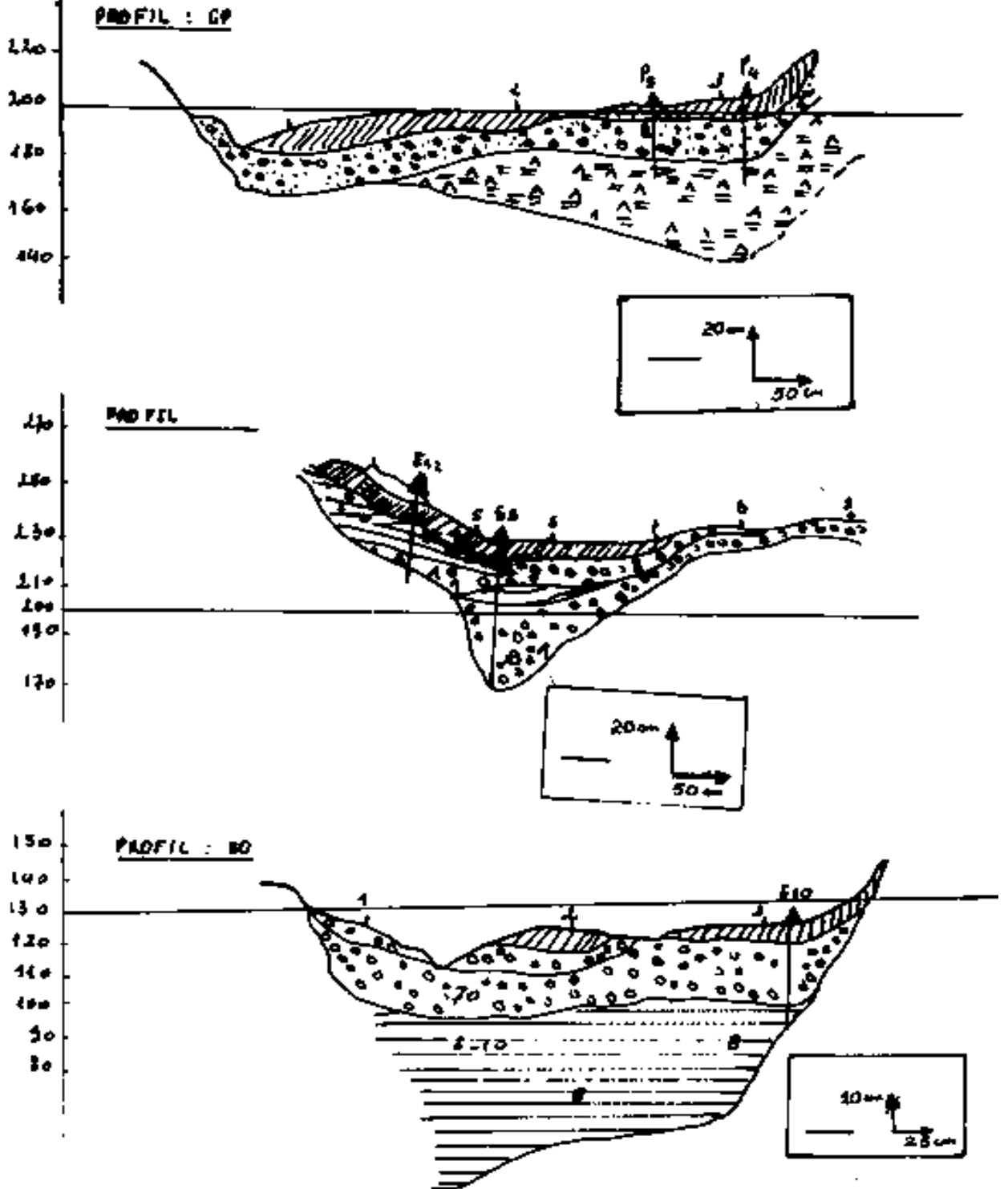
WHO (1996) WORLD Health organisation. Guidelines for drinking water quality, 2nd ed., volume2. Health criteria and other supporting information. Geneva, Switzerland, pp (914-928; 1944).

Coupe interprétatives établies à partir des sondages électrolytiques

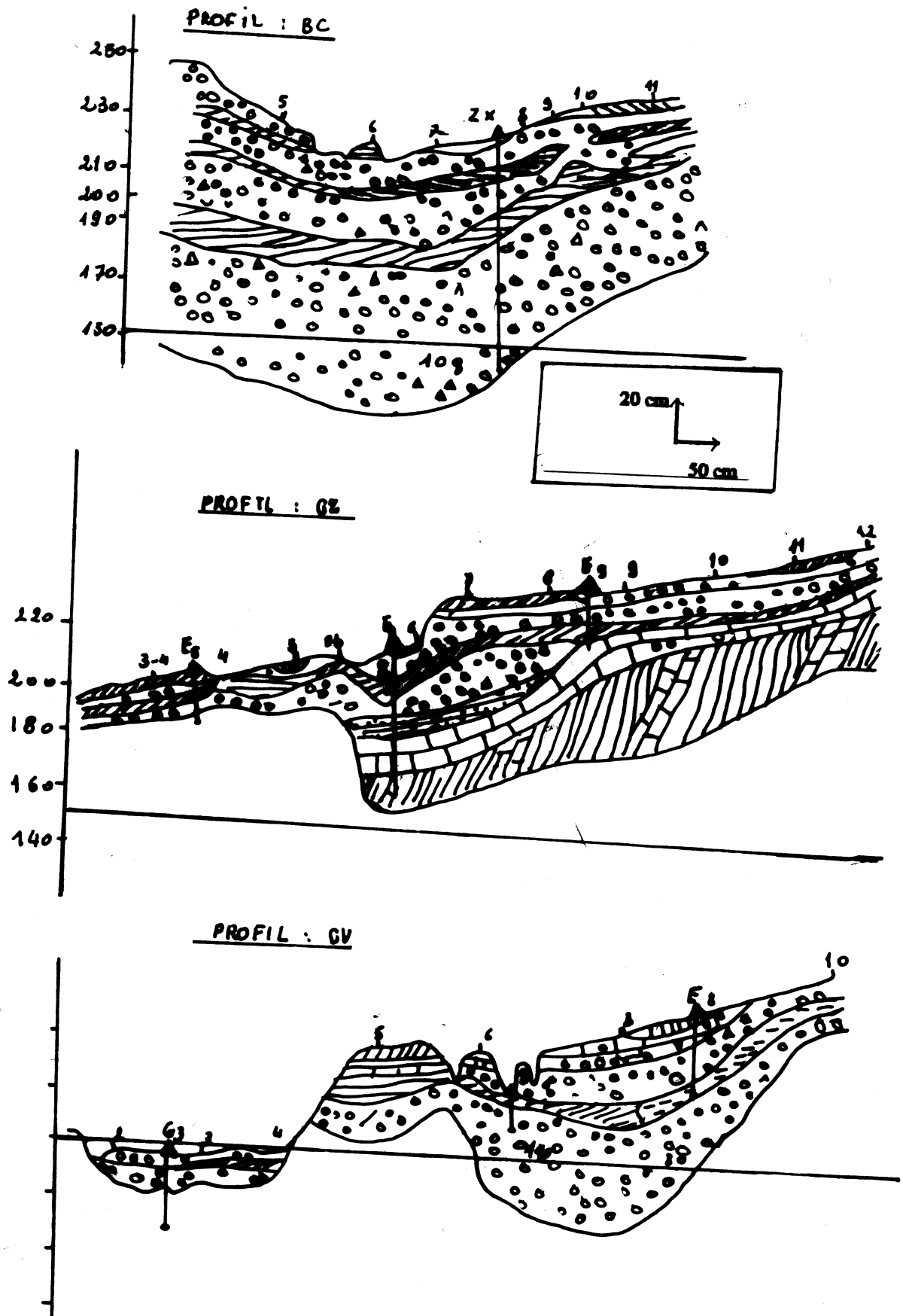


Annexes 2

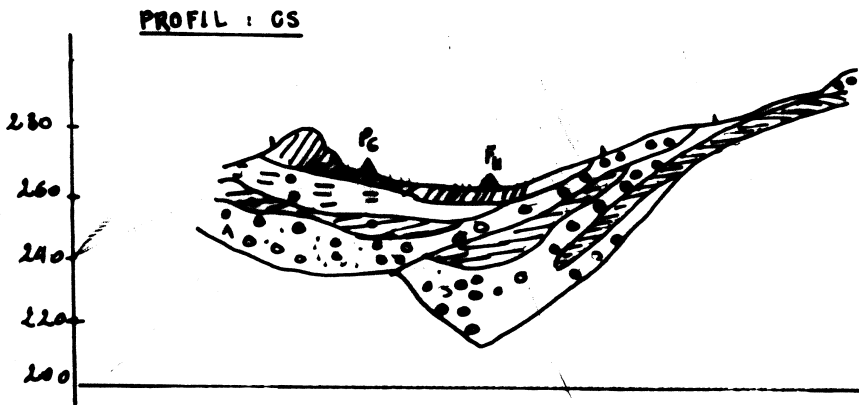
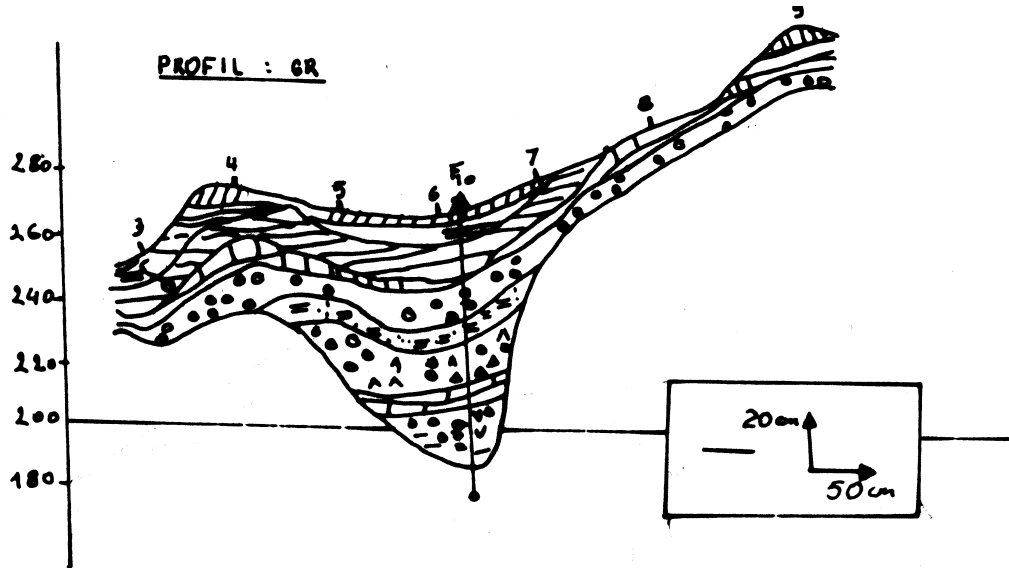
RECONSTITUTION DES SUCCESSIONS LITHOLOGIQUES SUIVANT
LES DONNÉES DE FORAGE ET BONDAGE ÉLECTRIQUE



ANNEXE 3A : RECONSTITUTION LITHOLOGIQUE



Annexe 3b : Reconstitution lithologique



- | | | | |
|--|-------------------|--|----------------------------------|
| | Terre végétale | | Forage |
| | Argile | | Marne jaune et lut calcaire |
| | Argile sableuse | | Argile sableuse |
| | Argile à graviers | | Tufcalcaire tendre |
| | Galet argileux | | Marne à graviers |
| | galet et graviers | | Sable marneux |
| | Graviers argileux | | Argile calcaire, trovertin |
| | sable et galets | | Argile, marne, gypse et graviers |
| | Sable et graviers | | Marne et galet |
| | Marne à gypse | | Nodule de cristaux |
| | | | Marne |

