

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Année 2018

Faculté des Sciences de la Terre
Département de géologie

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Etude de la vulnérabilité des nappes aquifères
de la région de Guelma et évaluation du rôle
des STEP dans la protection des eaux.

Option: Hydrogéologie

Par : LATIFI Sabah

DIRECTEUR DE THÈSE : Mr. CHAAB Salah Professeur, U.B.M., Annaba
CO-DIRECTEUR DE THÈSE : Mr.HOUHAMDI Moussa Professeur, Univ. Guelma

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : Mr.KHANCHOUL Kamel Professeur, U.B.M., Annaba
EXAMINATEURS :
Mr.MAHIA Mouhamed MCA, U.B.M., Annaba
Mr.MAOUI Amar Professeur, Univ. Guelma
Mr.KACHI Slimane Professeur, Univ. Guelma

A mon défunt père

Remerciements

Je tiens à remercier avant tout Dieu le tout puissant de m'avoir donné la patience et l'énergie pour mettre à terme ce travail.

Je dois énormément remercier Mr. CHAAB. S qui, après avoir accepté de prendre la Direction de la thèse, il m'a laissé bien souvent gérer mon travail tout en apportant les critiques et conseils nécessaires lors de son élaboration. Je le remercie vivement pour l'intérêt qu'il a apporté à ce travail, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et sa sympathie.

J'exprime mes vifs remerciements à Mr HOUHAMDI.M, d'avoir accepté d'être Co-encadrant de cette thèse, pour son appui et sa disponibilité. Je lui en suis très reconnaissant.

Je voudrais remercier également Les membres du jury de leur intérêt manifesté à cette étude et d'avoir accepté de bien vouloir la juger.

Je remercie aussi les ingénieurs de la DHW, de l'ADE, et les Ingénieurs de la direction d'ONID, DSA, ABH, La STEP qui sont toujours disponible pour me faire profiter de ses informations.

Mes remerciements à tous mes collègues enseignants pour leurs aides et encouragements et en particulier Mr HAID N, SAYAD L et BOUGHRIRA N.

Mes sincères remerciements s'adressent également aux enseignantes Melle KHADRIS et HARKET K, qui m'ont soutenu et témoigné leur amitié.

Finalement, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui par leur soutien et leurs conseils ont contribué à la réalisation de cette thèse. Je vous prie de trouver l'expression de ma profonde considération.

Tables des matières

- Remerciements
- Résumé en arabe
- Abstract
- Résumé en français...
- Tables des matières
- Liste des Tableaux
- Liste des Figures
- Introduction générale

	Page
Chapitre 1: Cadre physique et géologique	
A. OBJECTIF DE L'ETUDE.....	1
B. CADRE GEOGRAPHIQUE ET MILIEU NATUREL.....	2
I. Introduction.....	2
II. L'orographie et l'hydrographie.....	3
II.1.Zones de montagnes.....	3
II.2. Présentation du bassin de la Seybouse à Guelma.....	4
a) Bassin versant de l'Oued Seybouse: (plaines de Guelma - Bouchegouf).....	4
b) Bassin versant de l'Oued Mellah.....	5
III. Evolution du relief et mise en place du réseau hydrographique.....	5
IV. Les terrasses quaternaires et la morphologie de la vallée de la Seybouse.....	5
IV.1.Les terrasses de la haute Seybouse.....	5
IV.2.Les terrasses de la moyenne Seybouse.....	5
V.ETUDE GEOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIQUE.....	6
V.1. Le Primaire.....	6
V.2. Le Trias.....	6
V.3. Le Néritique.....	7
V.3.1. Le Jurassique.....	7
V.3.2. Le Crétacé.....	7
V.3.3. L'unité tellienne.....	7
V.3.4. L'unité ultra – tellienne.....	7
V.3.5. Le Numidien.....	8
V.3.6. Les faciès post – nappe.....	8
V.3.6.1. Le Mio-Pliocène.....	8
V.3.7. Le Quaternaire.....	8
V.3.7.1. Les Alluvions anciennes.....	8
V.3.7.2. Les Alluvions récentes.....	9
VI. RECONSTITUTION PALEOGEOGRAPHIQUE.....	12
VII. TECTONIQUE.....	12
VIII. Conclusion.....	15
Chapitre II : CARACTERISTIQUES CLIMATOLOGIQUES	
I.INTRODUCTION.....	18
II. Caractérisation du climat de la région de Guelma.....	18
II.1. Calcul de l'indice d'aridité de De Martonne.....	18
II.2. Calcul de l'indice d'aridité mensuel De MARTONNE (1923).....	19
II.3. Indice de l'UNESCO (1977).....	20
II.4. Indice d'aridité d'Emberger.....	21
II.5. Récapitulation.....	23
II.6. Diagramme pluviométrique de Gausson (P = 2T).....	23

III. Etude des paramètres climatiques.....	24
III.1. Les précipitations	24
III.1.1. Variation moyennes mensuelles interannuelles des précipitations	24
III.1.2. Variations interannuelles des précipitations.....	25
III.1.3. La variabilité des précipitations annuelles.....	26
III.2. Température.....	27
III.2.1. Variation des températures moyennes mensuelles.....	27
III.2.2. Variation des températures moyennes annuelles.....	28
III.3. Humidité.....	28
IV. Estimation des paramètres du bilan hydrique.....	29
IV.1. Evapotranspiration.....	30
IV.1.1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon la méthode Thornthwaite.....	30
IV.1.2. Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	31
IV.1.2.1. Calcul de l'ETR selon la formule de Thornthwaite.....	31
IV.1.2.2. Calcul de l'ETR selon la formule de Turc.....	32
IV.1.2.3. Interprétation des résultats (ETR)	32
IV.1.3. Estimation du ruissellement (R).....	32
IV.1.4 Estimation des réserves facilement utilisables (RFU).....	33
IV.1.5. Estimation de l'infiltration (I)	33
IV.2. Bilan hydrique.....	33
V. Conclusion.....	35

Chapitre III : HYDROGEOLOGIE

I. INTRODUCTION.....	37
II. LES GRANDS ENSEMBLES HYDROGEOLOGIQUE.....	37
III. Géométrie de l'aquifère.....	38
III.1. Synthèse des correspondances résistivité-lithologie.....	40
III.2. Interprétation des coupes géo-électriques.....	40
III.2.1 Basse terrasse alluvionnaire de l'Oued Seybouse (Profil GV).....	40
III.2.2 La moyenne terrasse (Profil GT).....	41
III.2.3 Haute terrasse entre Guelma et Boumahra (Profil GZ).....	41
IV. IDENTIFICATION DES DIFFERENTS ASSEMBLAGES HYDROGEOLOGIQUES.....	42
IV.1. La nappe alluvionnaire.....	43
IV.1.1. La vallée actuelle « basse terrasse ».....	43
IV.1.2. La moyenne terrasse.....	43
IV.1.3. La vallée ancienne « haute terrasse ».....	44
IV.2. Aquifère à milieu fissuré.....	44
IV.2.1. Aquifère des calcaires travertineux.....	44
*Interpretation des coupes hydrogéologiques.....	44
IV.3. Piézométrie.....	47
IV.4. Conditions aux limites.....	48
IV.4.1. Limites externes.....	48
IV.4.2. Sous limites internes.....	49
IV.5. Caractéristiques hydrodynamique.....	49
IV.5.1. La carte de transmissivité.....	49
V. Conclusion.....	50

**Chapitre IV : HYDROCHIMIE ET QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DU SYSTEME
AQUIFERE DE LA PLAINE DE GUELMA**

I. INTRODUCTION.....	52
II. MATERIELS ET MOYENS D'ANALYSE.....	52
III. POLLUTION DES EAUX	52

III.1.Les principaux types et origines de pollutions dans la zone d'étude.....	52
III.1.1.Origine domestique.....	52
III.1.2.Origine Industrielle	54
III.1.3.Origine agricole	56
IV. CARTOGRAPHIE HYDROCHIMIQUE.....	58
IV.1. EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACES.....	59
IV.1.1. Variation des paramètres mesurés in situ.....	59
IV.1.1.1 La température.....	59
IV.1.1.2 Le Ph.....	61
IV.1.1.3 La conductivité électrique.....	63
IV.1.1.4 L'oxygène dissous.....	65
IV.1.2 Les éléments chimiques majeurs.....	67
IV.1.2.1 Le calcium.....	67
IV.1.2.2 Le Magnésium.....	68
IV.1.2.3 Sodium.....	70
IV.1.2.4 Potassium.....	71
IV.1.2.5 Les Chlorure.....	73
IV.1.2.6 Sulfates.....	75
IV.1.3. Faciès chimique des eaux.....	76
IV.1.3. 1. Eaux de surface.....	76
IV.1.3. 2.Eaux souterraines.....	77
IV.1.4.Eléments de pollution	79
IV.1.4. 1. Les nutriments : (Cycle de l'Azote).....	79
a- les Nitrates (NO_3^-)	79
b- les Nitrites NO_2^- ou Azote Nitreux.....	81
c- l'Ammonium (NH_4^+).....	82
IV.1.4. 2. Schéma de transformation des éléments nutritifs (NO_3^- ; NO_2^- et NH_4^+).....	83
IV.1.5. Caractérisation bactériologique des eaux de surface	83
IV.2. LES EAUX D'IRRIGATION	85
IV.2.1. Aptitude des eaux de l'oued Seybouse à l'irrigation.....	85
IV.2.1.1.Le risque de salinité.....	86
IV.2.1.1.1.Evolution temporelle et spatiale de la salinité.....	86
IV.2.1.2.Le risque de sodicité.....	87
V. Conclusion.....	91

**Chapitre V : VULNERABILITE A LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES DU
SYSTEME AQUIFERE DE LA PLAINE DE GUELMA**

1. INTRODUCTION.....	92
II. VULNERABILITE DU SYSTEME AQUIFERE DE LA PLAINE DE GUELMA.....	92
II.1. VULNERABILITE DU SYSTEME SELON LA METHODE GOD.....	92
II.1. 1. Description des paramètres et réalisation des cartes thématiques.....	92
II.1. 1. 1. Application à la nappe aquifère de la plaine de Guelma.....	93
a. Carte des profondeurs « D »	94
• <i>Calcul des indices globaux ou carte de vulnérabilité</i>	94
II.2. VULNERABILITE DU SYSTEME SELON LA METHODE DRASTIC	95
II.2.1.Conditions d'utilisation de la méthode DRASTIC.....	95
II.2.2. Construction de la carte de vulnérabilité	95
II.2.3.Les cartes thématiques	96
II.2.3.1. <i>Profondeur de l'eau (D)</i>	97
II.2.3.2. <i>Recharge efficace (R)</i>	98
II.2.3.3. <i>Matériaux de l'aquifère (A)</i>	99

II.2.3.4. Type de sol (S).....	100
II.2.3.5. Type de sol (T).....	101
II.2.3.5. Impact de la zone vadose (I).....	102
II.2.3.6. Conductivité hydraulique (C).....	103
II.2.4. Carte globale des indices	104
II.2.5. Carte de la vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC.....	105
III. CONCLUSION.....	106

**Chapitre VI : LE ROLE EPURATOIRE DE LA STATION D'EPURATION
DE LA PLAINE DE GUELMA**

I. Introduction	108
II. Description de la station d'épuration des eaux usées de Guelma (STEP de la ville de Guelma)...	108
II.1. Localisation.....	108
II.2. Réseau de raccordement	108
II.3. Procédé et capacité de traitement	109
II.4. Qualité de l'effluent rejeté	109
III.1. Fonctionnement de la station d'épuration des eaux usées avec le procédé de culture libre (boues activées).....	110
III.1.1. Le prétraitement physique de l'effluent.....	110
III.1.1.1. Le dégrillage	111
III.1.1.2. La dilacération	112
III.1.1.3. Le dessablage.....	112
III.1.1.4. Le dégraissage-déshuilage	112
III.1.1.5. La neutralisation	113
III.1.1.6. L'évacuation et le traitement des sables et refus	113
III.1.2. La décantation primaire.....	113
III.1.3. Le traitement biologique	114
A-L'élimination du carbone	114
B-L'élimination de l'azote.....	115
C-L'élimination de phosphore.....	116
III.1.4. La décantation secondaire	117
III.1.5. Les lits de séchage	117
III.1.6. Désinfection.....	118
III.2. Méthodes et Points de prélèvements.....	120
III.2.1. Méthode de prélèvements.....	120
III.2.2. Point de prélèvement	120
III.3. Résultats d'analyses physico-chimique.....	120
III.3.1. Le potentiel Hydrogène (PH).....	120
III.3.2. La température (T°C).....	121
III.3.3. La conductivité électrique (CE).....	122
III.3.4. Les matières en suspension (MES).....	123
III.3.5. La demande biochimique en oxygène DBO5.....	124
III.3.6. La demande chimique en oxygène (DCO).....	125
III.4. Nitrification, dénitrification au niveau de la station d'épuration.....	125
III.4.1. Définitions.....	125
III.4.2. Les nutriments.....	126
III.4.2.1. Les nitrates NO_3^-	126
III.4.2.2. Les Nitrites (NO_2^-).....	127
III.4.2.3. L'Azote ammoniacal NH_4^+	128

III.4.2.4.L'ortho phosphate (OPO ₄).....	129
III.4.2.4.L'ortho phosphate (OPO ₄)	130
IV. Performances de fonctionnement de la station.....	131
IV. 1.Variation de la DBO ₅	131
IV.2. Variation de la DCO.....	132
IV.3. Variation des MES.....	132
V. Conclusion	133
Conclusion générale	134
Références bibliographiques	

Chapitre I : CADRE GENERAL DE LA REGION D'ETUDE		page
Tableau 01.	Description géologique et hydrogéologique des formations de la région d'étude (D'après S. Mouassa, 2007).....	16
Chapitre II : CARACTERISTIQUES CLIMATOLOGIQUES		
Tableau 02.	Coordonnées et période d'observation de la station pluviométrique de Guelma.....	17
Tableau 03.	Indices d'aridité mensuels (IDM) à la station de Guelma.....	20
Tableau 04.	Classification des différentes formes d'aridité (Science et changement planétaires, 2005).....	21
Tableau 05.	Estimation de la valeur de Q ₂	22
Tableau 06.	Comparaison des indices d'aridité pour la zone d'étude.....	23
Tableau 07.	Valeurs de l'évapotranspiration potentielle à la station de Guelma par la méthode de Thornthwaite.....	31
Tableau 08.	Résultats de l'ETR selon Thornthwaite et Turc.....	32
Tableau 09.	Résultats du calcul du ruissellement.....	32
Tableau 10.	Bilan hydrique à la station de Guelma (1985-2013) selon la méthode de Thornthwaite.....	34
Chapitre III : HYDROGEOLOGIE		
Tableau 11.	L'échelle des résistivités est fixée selon la CGG (1971) (Nouar.T 2007).....	40
Chapitre IV : HYDROCHIMIE ET QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DU SYSTEME AQUIFERE DE LA PLAINE DE GUELMA		
Tableau 12.	Les caractéristiques des eaux usées domestique dans la wilaya de Guelma (Juillet 1997). (MOUCHARA Nabil, 2009).....	54
Tableau 13.	Actualisation des installations classées de la ville de Guelma et les milieux récepteurs de leurs rejets (Direction de l'Environnement Guelma, 2014).....	55
Tableau 14.	La répartition des stations de lavage et de vidange des véhicules à travers la région.....	56
Tableau 15.	Types et quantités de fertilisants utilisés au niveau de la nappe alluvionnaire de Guelma (2005 / 2006). (KACHI N, 2015).....	57
Tableau 16.	Principaux engrais utilisés dans le périmètre Guelma-Boumahra	58
Tableau 17.	Variation de la température des eaux souterraines et de surfaces dans le bassin de Guelma.....	61

Tableau 18.	Variation du pH des eaux souterraines et de surfaces dans le bassin de Guelma.....	62
Tableau 19.	Variation de la conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des eaux souterraines et de surface dans le bassin de Guelma.....	63
Tableau 20.	Variation de l'oxygène dissous des eaux souterraines et de surface dans le bassin de Guelma.....	65
Tableau 21.	Variation du calcium (mg/l) des eaux souterraines et de surface dans le bassin de Guelma.....	67
Tableau 22.	Teneurs en magnésium (mg/l) des eaux souterraines et de surfaces dans le bassin de Guelma.....	68
Tableau 23.	Teneur en sodium des eaux souterraines et de surface dans le bassin de Guelma.....	70
Tableau 24.	Teneur en potassium des eaux souterraines et de surfaces dans le bassin de Guelma.....	71
Tableau 25.	Teneur en chlorures des eaux souterraines et de surface dans le bassin de Guelma.....	73
Tableau 26.	teneur en sulfates des eaux souterraines et de surfaces dans le bassin de Guelma.....	75
Tableau 27.	Teneur en nitrates des eaux souterraines et de surface dans le bassin de Guelma.....	80
Tableau 28.	Classe de salinité selon Richards (Faby et al, 2000).....	86
Tableau 29.	Classification des eaux par degré d'aptitude à l'irrigation (Méthode du SAR)..	88
Chapitre V : VULNERABILITE A LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES DU SYSTEME AQUIFERE DE LA PLAINE DE GUELMA		
Tableau 30.	Les paramètres DRASTIC et leur poids respectif (Aller et al, 1987).....	96
Tableau 31.	Cotation du paramètre profondeur de l'eau.....	97
Tableau 32.	Cotation du paramètre recharge de l'aquifère.....	98
Tableau 33.	Cotation du paramètre matériau de l'aquifère.....	100
Tableau 34.	Cotation du paramètre type de sol.....	100
Tableau 35.	Cotation du paramètre pente de terrain.....	101
Tableau 36.	Cotation du paramètre impact de la zone vadose.....	102
Tableau 37.	Cotation du coefficient de perméabilité.....	103

**Chapitre VI : LE ROLE EPURATOIRE DE LA STATION D'EPURATION
DE LA PLAINE DE GUELMA**

Tableau 38.	Capacité de traitement de la station d'épuration (Younci 2015).....	109
Tableau 39.	Valeurs limites des eaux usées traitée de la station d'épuration (Younci 2015).....	109
Tableau 40.	Qualité des eaux de la STEP entrée et sortie (Sep.2014-Mars 2016).....	131

Chapitre I : CADRE GENERAL DE LA REGION D'ETUDE		Page
Figure 01.	Carte de situation géographique de la plaine de Guelma.....	2
Figure 02.	Carte du relief de la wilaya de Guelma (Mouchara N., 2008).....	4
Figure 03.	Esquisse géologique de la région d'étude (d'après Djabri et al; 2003 modifié).....	9
Figure 04.	Bloc géologie Guelma (D'après Djabri, 1996).....	11
Figure 05.	Coupes Géologiques de la plaine de Bouchegouf (D'après Chaoui, 2007).....	11
Figure 06.	Coupe schématique des différents types de terrasses dans la plaine de Bouchegouf. (Chaoui, 2007).....	11
Figure 07.	Carte structurale de la région de Guelma, Extraite de la carte géologique (JM.Vila, 1988)	14
Chapitre II : CARACTERISTIQUES CLIMATOLOGIQUES		
Figure 08.	Localisation des postes pluviométriques de référence (LOUAMRI. A, 2013).....	18
Figure 09.	-a : Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne.....	19
	-b : Abaque de l'Indice d'aridité mensuel de De Martonne.....	20
Figure 10.	Climagramme de L. Emberger de la station de Guelma	22
Figure 11.	Diagramme pluviométrique de la station de Guelma.....	24
Figure 12.	Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station de Guelma (1985-2013).....	25
Figure 13.	Variation interannuelle des précipitations à la station de Guelma (1985-2013).....	26
Figure 14.	Variations du coefficient pluviométrique à la station de Guelma (1985-2013).....	27
Figure 15.	Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Guelma (1985-2013).....	27
Figure 16.	Evolution des températures moyennes annuelles à la station de Guelma (1985-2013).....	28
Figure 17.	Variations moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air à la station de Guelma (1985/2013).....	29
Figure 18.	Représentation graphique des paramètres du bilan hydrologique.....	34
Figure 19.	Représentation graphique du bilan hydrologique à la station de Guelma.....	35
Chapitre III : HYDROGEOLOGIE		
Figure 20.	Les zones hydrogéologiques du bassin versant de la Seybouse à partir de Guelma (D'après Ghachi, 1982).....	38
Figure 21.	Carte de position des sondages électriques de la plaine de Guelma (CGG.1971, in Kachi. N 2015).....	39
Figure 22.	Coupes géoélectriques transversales Nord-Sud dans la plaine de Guelma (CGG.1971 in KACHI.N 2015).....	42
Figure 23.	-a : Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma, montrant la présence des aquifères (alluvionnaire et fissuré) et la relation alluvions-travertins (B.Gaud, 1974).....	46
	-b : Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma, (B.Gaud, 1974).....	46
	-c. Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma, (B.Gaud, 1974).....	47
Figure 24.	Carte piézométrique de la zone d'étude (décembre, 2013)	48

Figure 25.	Carte de transmissivité de la nappe alluviale de Guelma.....	50
Chapitre IV : HYDROCHIMIE ET QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DU SYSTEME AQUIFERE DE LA PLAINE DE GUELMA		
Figure 26.	-a : Température des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (Hautes eaux, Avril 2015).....	60
Figure 26.	-b : Température des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015).....	60
Figure 27.	-a. pH des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (Hautes eaux, Avril 2015).....	62
	-b. pH des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Avril 2015)	62
Figure 28.	-a. Conductivité électrique des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015).....	64
	-b. Conductivité électrique des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015).....	64
Figure 29.	-a : Oxygène dissous des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015).....	66
	-b : Oxygène dissous des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015).....	66
Figure 30.	-a: Teneur en calcium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015).....	67
	-b : Teneur en calcium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (Basses eaux, Aout 2015).....	68
Figure 31.	-a : Teneur en magnésium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015).....	69
	-b : Teneur en magnésium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015).....	69
Figure 32.	-a : Teneur en sodium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (Hautes eaux, Avril 2015).....	70
	-b : Teneur en sodium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015).....	71
Figure 33.	-a : Teneur en potassium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015).....	72
	-b : Teneur en potassium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015).....	72
Figure 34.	-a : Teneur en chlorures des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015).....	74
	-b : Teneur en chlorure des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015).....	74
Figure 35.	-a : Teneur en sulfates des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015).....	75
	-b : Teneur en sulfates des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015).....	76
Figure 36.	Le faciès chimique des eaux d'Oued Maiz et Zimba (Avril	77

	2015).....	
Figure 37.	-a : Le faciès chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (période hautes eaux).....	78
	-b : Le faciès chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (période basses eaux).....	78
Figure 38.	-a : Teneur en nitrates des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015).....	80
	-b : Teneur en nitrates des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015).....	81
Figure 39.	Variation des teneurs en nitrites dans les eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma.....	82
Figure 40.	teneurs en ammonium dans les eaux souterraines.....	82
Figure 41.	Cycle de l'Azote (Debièche, 2002).....	83
Figure 42.	Variation de la teneur en coliformes totaux en périodes de crue et sèche.....	84
Figure 43.	teneur en coliformes fécaux en périodes de crue et sèche.....	84
Figure 44.	Variation de la teneur en streptocoque fécaux en périodes de crue et sèche.....	85
Figure 45.	Evolution spatio-temporelle de la conductivité des eaux d'irrigation.....	87
Figure 46.	Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Richards.....	89
Figure 47.	Digramme de Wilcox.....	90
Chapitre V : VULNERABILITE A LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES DU SYSTEME AQUIFERE DE LA PLAINE DE GUELMA		
Figure 48.	Estimation de la vulnérabilité d'un aquifère par la méthode de GOD (d'après Foster, 1987) : Cas de la nappe aquifère de Guelma.....	93
Figure 49.	Carte des valeurs de l'indice de la profondeur de la nappe aquifère de la plaine de Guelma.....	94
Figure 50.	Carte de vulnérabilité de la nappe aquifère de la plaine de Guelma selon la méthode de GOD.....	95
Figure 51.	Carte de répartition des valeurs de l'indice de la profondeur d'eau dans l'aquifère.....	98
Figure 52.	Carte de répartition des valeurs de l'indice de la de Recharge dans l'aquifère.....	99
Figure 53.	Carte de répartition des valeurs de l'indice du matériau de l'aquifère.....	100
Figure 54.	Carte de répartition des valeurs de l'indice du type de sol.....	101
Figure 55.	Carte de répartition des valeurs de l'indice de la pente de terrain.....	102
Figure 56.	Carte de répartition des valeurs de l'indice de la nature de la zone vadose.....	103
Figure 57.	Carte de répartition des valeurs de l'indice du coefficient de la perméabilité.....	104
Figure 58.	Carte de l'indice DRASTIC.....	105
Figure 59.	Carte de la vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC.....	106
Chapitre VI : LE ROLE EPURATOIRE DE LA STATION D'EPURATION DE LA PLAINE DE GUELMA		
Figure 60.	Entrée de la STEP de Guelma(Dégrillage).....	111
Figure 61.	Entrée de la STEP de Guelma (dégraissage-déshuilage).....	113
Figure 62.	Bassin de décantation primaire (décanteur).....	114
Figure 63.	Bassin d'aération. (STEP Guelma 2016).....	116

Figure 64.	Bassin de décantation secondaire(Clarificateur).....	117
Figure 65.	les lits de séchage.....	118
Figure 66.	Sortie de la STEP (bassin de désinfection).....	118
Figure 67.	Evolution temporelle du pH mesuré à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.....	121
Figure 68.	Evolution temporelle de la température à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.....	122
Figure 69.	Evolution temporelle de la conductivité électrique à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.....	122
Figure 70.	Evolution temporelle des MES mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.....	123
Figure 71.	Evolution temporelle de la DBO ₅ mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.....	124
Figure 72.	Evolution temporelle de la DCO mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.....	125
Figure 73.	Evolution temporelle de nitrate mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.....	127
Figure 74.	Evolution temporelle de nitrite mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.....	128
Figure 75.	Evolution temporelle de l'ammonium mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.....	129
Figure 76.	Evolution temporelle de l'Orthophosphate mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.....	130
Figure 77.	Rendement d'élimination de la DBO ₅ dans la STEP.....	131
Figure 78.	Rendement d'élimination de la DCO dans la STEP.....	132
Figure 79.	Rendement d'élimination des MES dans la STEP.....	132

Résumé

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

La Wilaya de Guelma, située au Nord-Est de l'Algérie, est soumise à un climat sub-humide, Dans le bassin de Guelma, les formations de calcaires constituent la bordure Sud-Ouest et les formations meubles se répartissent uniformément au centre en trois niveaux (haute, moyenne et basse terrasse) créant ainsi un système aquifère à nappes empilées. L'écoulement des eaux souterraines se fait suivant une direction Sud-Nord. L'infiltration ne laisse percoler que 13% des précipitations, donc l'alimentation latérale à travers les bordures est la plus considérée.

Le premier objectif de cette étude est d'évaluer la vulnérabilité à la de pollution des ressources en eaux souterraines des aquifères de la région de Guelma, en utilisant deux méthodes DRASTIC et GOD pour cette évaluation.

Les méthodes adoptées pour la cartographie de la vulnérabilité, ont permis de distinguer trois zones de degré de vulnérabilité différent. Les zones de faible et moyenne vulnérabilité occupent respectivement 25 et 30% de la surface totale de la plaine, alors que les zones à forte vulnérabilité occupent 45% de la dite surface.

Le second est de suivre les performances épuratoires de la station (rendement en élimination de la pollution : DBO₅, DCO et MES), la mesure d'autres paramètres qui peuvent donner des informations sur l'efficacité du traitement par boues actives (pH, température, teneur en oxygène) et l'interprétation d'une série de données des analyses physico-chimiques des eaux (brutes et traitées) afin de se rassurer sur les normes des eaux de rejet dans l'Oued Seybouse et sur la protection des eaux de surface contre la pollution.

Mots clés : Vulnérabilité, eaux souterraines, DRASTIC, GOD, Guelma, STEP.

Abstract

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

Guelma region, situated in the Northeast of Algeria, has a sub-wet climate. In Guelma basin, the limestone formations constitute the southwest border. The alluvial formations are distributed uniformly in the center in three levels (high, medium and low terrace) forming an aquifer system with stacked layers. The groundwater flow has a south-north direction. The effective infiltration is about 13% of the rainfall. The inflow in the aquifer is observed in the south border.

The first objective of this study is to assess the vulnerability to the pollution of groudwater in the aquifers of Guelma with two methods: DRASTI and GOD.

The adopted methods for mapping the vulnerability to pollution show three zones of different degree of vulnerability. The areas of low and medium vulnerability occupy respectively 25 and 30% of the total area of the plain, while the areas of high vulnerability covers 45% of the area.

The second is to observe the efficiency of the waste water treatment station (determination of suspended matter, chemical oxygen demand COD et biological oxygen demand during five days BOD₅). The measure of the parameters indicating the efficiency of the waste water treatment by activated sludge purification (i.e: pH, T°C and O₂) and the interpretation of the chemical data analysis of the waste and treated water to comfort us about the standards of the discharged treated water in the wadi Seybouse and the protection of the surface water from contamination.

Keywords: Vulnerability, groundwater, DRASTIC , GOD, Guelma ,STEP.

ملخص

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

ولاية قالمة, تقع شمال شرق الجزائر, تخضع لمناخ شبه رطب. في حوض قالمة الصخور الكلسية تشكل حدوده الجنوبية الغربية أما التشكيلات الرسوبية تتوزع في الوسط بطريقة غير جنوسة إلى ثلاثة طبقات (عالية متوسطة و منخفضة). بحيث تكون مجمع مائي ذو خزانات مائية متكدة اين تجري المياه من الجنوب في اتجاه الشمال كما تتغذى بنسبة 31 % من كمية الأمطار المتساقطة وبالتالي فان تغذيتها عن طريق الأطراف تعد الأكثر أهمية.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم الضعف و خطر تلوث المياه الجوفية لمنطقة قالمة. في الدراسة الحالية اعتمدنا طريقتين مختلفتين, هذه الأساليب قديمة : دراستيك و فود.

الأساليب المعتمدة لرسم خرائط الضعف و خطر التلوث جعلتنا من الممكن التمييز بين ثلاث مناطق من درجات مختلفة من الضعف. وتشغل مناطق الضعف الضعيفة والمتوسطة على التوالي 25 و 30% من المساحة الكلية للسهول, في حين تشغل المناطق المعرضة للخطر الشديد 45% من المساحة المذكورة.

الغرض من عملي أيضا هو متابعة تنقية المحطة للمواد الملوثة وغيرها من المعالم التي يمكن أن تأثر في العلاج بواسطة الحماية المنشطة مثل درجة الحموضة, درجة الحرارة, محتوى الأكسجين عن طريق مجموعة من البيانات الفيزيوكيميائية لتحاليل المياه الملوثة والمعالجة ومقارنة ما إذا كانت البيانات تلائم مقاييس طرح المياه القذرة.

الكلمات المفتاحية: حساسية التلوث, المياه الجوفية, قالمة, STEP,GOD,DRASTIC,

Introduction Générale

Les eaux souterraines sont confrontées à un risque de dégradation à cause des rejets non contrôlés, de l'utilisation intensive et anarchique des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que d'une exploitation intensive de la nappe aquifère. Cette situation entraîne une modification chimique de l'eau, qui la rend impropre aux usages souhaités. Ceci est accentué par une longue sécheresse qui a diminué sensiblement les ressources en eau. Pour pouvoir les préserver, un contrôle de la qualité et la maîtrise de la gestion de cette ressource sont plus que nécessaires.

A cet égard la prévention contre la pollution des nappes constitue une étape importante à laquelle les scientifiques consentent de plus en plus d'effort, notamment en étudiant la vulnérabilité et le risque de pollution des eaux des nappes souterraines.

Dans ce contexte notre travail a pour but d'évaluer la vulnérabilité à la pollution des eaux des aquifères de la région de Guelma. Plusieurs méthodes ont été développées pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères. Il s'agit des méthodes DRASTIC, GOD, SINTACS, EPIK,... dans notre travail seul les deux premières méthodes ont été adoptées.

Pour lutter contre la pollution, éviter les maladies à transmission hydrique et protéger le milieu récepteur on a recours à des solutions fiables telles que : la construction de stations d'épuration et de traitement qui englobe les analyses et le contrôle périodique des eaux.

Depuis les années 80 l'Algérie a engagé un programme de réalisation de stations d'épuration qui ont pour rôle de traiter et de décontaminer les eaux usées grâce à des procédés physico-chimiques ou biologiques et de rejeter une eau épurée répondant aux normes admises.

La station d'épuration de Guelma est implantée sur un terrain agricole de 8 Hectares à 1 kilomètre environ au Nord de la ville de Guelma, elle reçoit et épure en continu les eaux usées utilisant comme principe épuratoire le système de boues activées à moyenne charge.

La STEP est constituée de 6 compartiments et le plus important est le bassin de désinfection qui permet l'élimination des germes pathogènes existants dans l'eau usée.

L'objectif de ce travail consiste à évaluer les performances épuratoires et les rendements de la station en analysant quelques paramètres comme la DCO, DBO₅, MES...

Les analyses ont concerné deux points de prélèvements : l'un à l'entrée de la STEP et l'autre à sa sortie.

Le présent travail s'articule autour de cinq chapitres, d'une introduction et d'une conclusion:

- Le premier chapitre présente une synthèse sur la situation géographique, la géomorphologie, la géologie et la tectonique de la région d'étude.

INTRODUCTION GENERALE

- Le second chapitre vise à l'analyse des paramètres climatiques afin d'établir le bilan hydrique et estimer la recharge en eau de la nappe qui sert de base aux chapitres suivants.
- Le troisième chapitre traite l'hydrogéologie de la plaine, la lithologie et la géométrie de l'aquifère, les caractéristiques hydrodynamiques, la direction de l'écoulement des eaux souterraines et l'évaluation de certains paramètres hydrogéologiques à savoir; la transmissivité.
- Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de la qualité des eaux des ressources en eaux (Forages, puits, sources) de la plaine de Guelma
- Le cinquième s'intéresse à l'étude de la vulnérabilité des eaux à la pollution de la nappe aquifère de Guelma.
- Le sixième chapitre a pour objectif l'étude de la nature des effluents des eaux usées domestiques et les performances épuratoires de la station d'épuration (STEP) de la ville de Guelma.

A. OBJECTIF DE L'ETUDE

Les eaux souterraines représentent généralement une excellente source d'approvisionnement en eau potable. Le filtre naturel constitué par les matériaux géologiques produit le plus souvent une eau de grande qualité. Le maintien de cet avantage relatif requiert cependant que des mesures soient prises pour préserver de façon durable la qualité du réservoir naturel des eaux souterraines.

Le présent travail fait partie des études pluridisciplinaires sur la pollution et sur la qualité des eaux souterraines, notamment, celles se trouvant dans des aquifères menacés par une contamination possible de leurs eaux. Il vise à mettre en évidence la vulnérabilité du système aquifère de la plaine de Guelma.

Notre étude va s'articuler sur :

- dans le chapitre « géologie », nous décrirons les différentes formations géologiques composant le bassin, leur lithologie et leur structure.
- dans le deuxième, nous traiterons de l'hydroclimatologie de la région et la détermination des paramètres du bilan hydrologique.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la géométrie et de la structure de la nappe, ainsi que la connaissance de ses caractéristiques hydrodynamiques.
- Dans le quatrième chapitre; nous nous intéresserons à l'hydrochimie, nous traiterons la qualité des eaux de surface (Les affluents de l'Oued Seybouse : oued Maiz et oued Zimba) et des eaux souterraines (les forages, les puits et les sources), en posant les questions suivantes :
 - Quel est l'état actuel de la qualité chimique des eaux souterraines de la plaine ?
 - Quels sont les différents polluants chimiques existants dans les eaux souterraines de la plaine et qu'elles sont leurs origines ?
- Le cinquième chapitre nous avons essayé de localiser sur des cartes de vulnérabilité selon deux méthodes (God et Drastic) les zones vulnérables à la pollution au niveau de la plaine de Guelma.
- Le dernier chapitre a pour objectif l'étude de la nature des effluents des eaux usées et les performances épuratoires de la station d'épuration (STEP) traitant les eaux usées domestiques de la ville de Guelma.

B. CADRE GEOGRAPHIQUE ET MILIEU NATUREL

I. Introduction

La région de Guelma est située au Nord-Est algérien avec une superficie de 3 686,84 km², reliant le littoral des Wilaya de Annaba, El Tarf et Skikda, aux régions intérieures telles que les wilayas de Constantine, Oum El Bouagui et Souk Ahras. Elle appartient au sous bassin de la Seybouse, qui est limité au Nord par le Djebel Guerbissa, Koudiat Debdebe, Djebel Bou Zitoune, Ras El Chatah, les contreforts du massif d'El Houara, à l'Est par les massifs de Beni Marmi, au Sud par le massif de la Mahouna et ses contreforts : le Rakaat El Ras et le Kef Soultane et à l'Ouest par le massif du Djebel Arara. Le bassin de Guelma est traversé par l'un des principaux Oueds du pays en l'occurrence Oued Seybouse.. Le bassin versant de l'oued Seybouse est l'un des plus grands bassins hydrographiques de l'Algérie et couvre au total une superficie de 6471Km²

Le secteur étudié Guelma-Boumahra, appartenant à la nappe alluviale de Guelma, se situe au coeur d'une grande région ayant une activité agricole intense (périmètre irrigué Guelma-Boucheoug à l'Est du Chef-lieu de Wilaya (fig. 1).

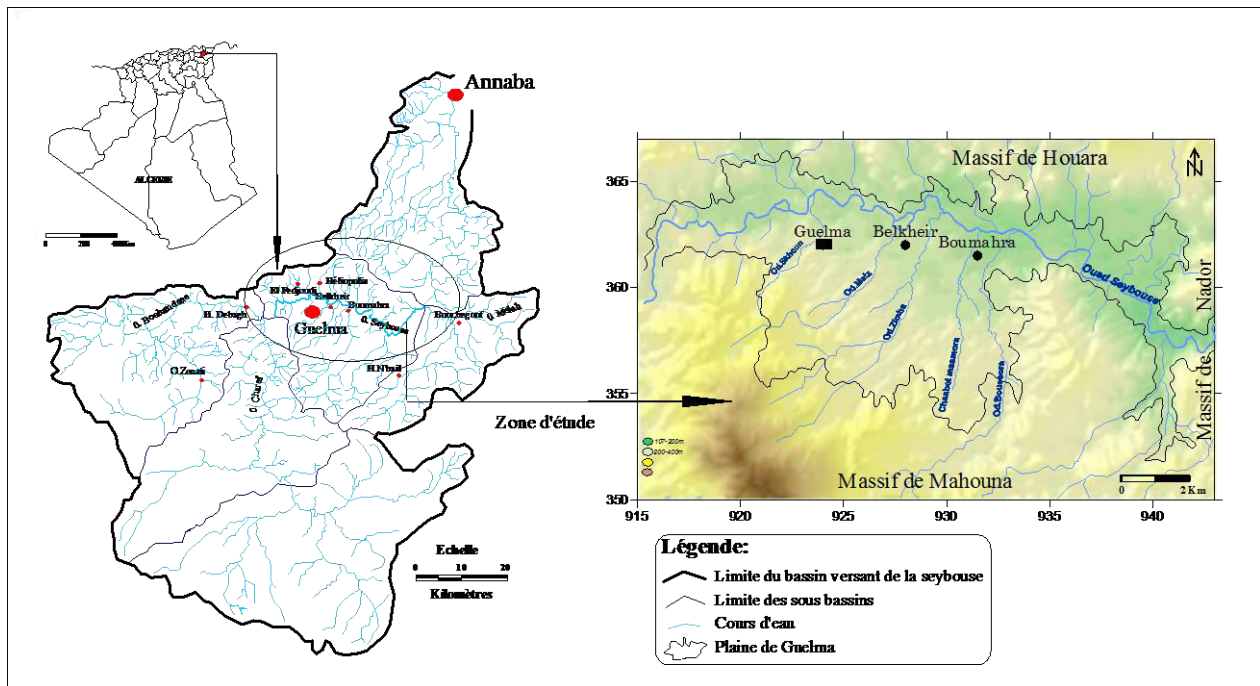


Figure.1 : Carte de situation géographique de la plaine de Guelma.

II. L'orographie et l'hydrographie

II.1.Zones de montagnes

Le relief montagneux et collinaire de la région de Guelma donne aux affluents de la Seybouse un caractère torrentiel.

Parmi les reliefs les plus élevés de la région de Guelma nous citons:

- Le Djebel Taya 1208 m d'altitude.
- Le Djebel Mermera 993 m d'altitude.
- Le Djebel Debagh 1060 m d'altitude.
- Le Djebel Houara 1292 m d'altitude.
- Le Djebel Mahouna 1411 m d'altitude.
- Le Djebel Ras El Alia 1317 m d'altitude.

La région de Bouchegouf est d'un caractère montagneux à aspect monotone sur toute son étendue. L'altitude moyenne de la chaîne tellienne locale est d'environ 500 m, par contre celle du fond de la vallée varie entre 110 m en amont et 30 m en aval.

Ce qui est important à noter est le recouvrement d'environ 75% de la partie nord-est de la région par un relief montagneux et les immenses étendues forestières de Beni Mezline, Beni Salah et Ouled Bechiah (fig. 2).

b) Bassin versant de l'Oued Mellah

Avant de se jeter dans la Seybouse, l'Oued Mellah draine une superficie de 552 Km², caractérisée par une morphologie très accidentée et une lithologie diversifiée de terrains avec une prédominance du Trias gypsifère qui se développe en diapir de Hammam N'bails au Sud à Nador et Bouchegouf au Nord.

III. Evolution du relief et mise en place du réseau hydrographique

Cette région du Tell oriental algérien a connu une évolution géologique très complexe et c'est à la fin de Pliocène que les volumes montagneux se créent suite à une série de mouvements tectoniques. Ces derniers sont aussi à l'origine du creusement ou de la reprise du creusement des cours d'eau qui ont alors sculpté de profondes vallées et de gorges. Ce faible réseau hydrographique est surimposé à partir d'une vieille topographie dont l'achèvement date du Mio-Pliocène et il est antécédent par rapport aux derniers mouvements orogéniques fini-Pliocène (Ghachi, 1982).

Ainsi l'hypothèse, selon laquelle les oueds Seybouse et Rhumel à l'Ouest sont des cours d'eau héritiers d'un réseau hydrographique qui descendaient depuis les Aurès à travers les paysages naturels de Guelma et de Constantine, allaient se jeter dans la mer Méditerranée, demeure toujours en vigueur.

Notons que l'oued Seybouse en parcourant plusieurs domaines de structures et de lithologies différentes dessine la forme des vallées qui est variable puisqu'elle passe du défilé (Gorge en V) à une vallée en U.

IV. Les terrasses quaternaires et la morphologie de la vallée de la Seybouse**IV.1. Les terrasses de la haute Seybouse**

On remarque la présence de terrasses, de glacis et de cônes de déjection. En fait, il y a surtout des glacis et un creusement de glacis puisque l'on est dans les hautes plaines avec parfois, quand les conditions s'y prêtent, une petite terrasse.

IV.2. Les terrasses de la moyenne Seybouse:

Les mouvements tectoniques plio-quaternaires ont:

- a - affecté les glacis qui se situent dans le bassin de Guelma par des déformations;
- b - permis à la Seybouse de s'encaisser progressivement.

Cinq niveaux sont identifiables dans le bassin, (d'après Cherrad, 1992, in L. Djabri, 1996)

- Le plus ancien se situe à des hauteurs relatives de plus de 100 m par rapport au lit actuel de la

Seybouse.

Le niveau 5 : Est formé par de hautes terrasses et glacis contenant des galets et de blocs de grande taille. C'est aussi la zone d'épandage des blocs (dépôt de pente), environ 100 m d'altitude relative.

Le niveau 4 : Est formé de glacis et également de hautes terrasses qui contiennent de galets et des blocs hétérométriques.

Le niveau 3 : 30 à 50 m d'altitude relative. C'est un niveau de transition, caractérisé par la présence de galets et de blocs hétérométriques avec un certain agencement.

La couche calcaire est également apparente.

Le niveau 2 : 10 à 20 m d'altitude, où terrasses et terminaisons de glacis se confondent. Un litage des éléments est visible. Les sols sont assez consolidés. Ce niveau est très étendu.

Le niveau 1 : Terrasses, datant du quaternaire récent, comportant des argiles et des sables.

La proportion d'argile est plus importante en raison de l'écoulement. Ce niveau est très étendu.

Au niveau des défilés (gorges). Ces formations quaternaires perdent de leur ampleur et se réduisent considérablement. Dans la section oued Fragha-Chihani, on retrouve les niveaux 3, 2 et 1. La haute terrasse (niveau 3) est une terrasse à gros blocs hétérométriques. La moyenne terrasse est, par contre, caillouteuse avec un grano-classement et un litage de galets. Quand à la basse terrasse, elle est argilo-sableuse (L. Djabri, 1996).

V. ETUDE GEOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIQUE

La région d'étude est caractérisée par des formations géologiques appartenant aux différents âges. Nous décrirons successivement les principales formations allant d'âge plus ancien au plus récent qui sont :

V.1. Le Primaire

Les terrains du Primaire ne présentent pas beaucoup d'affleurements, ils sont réduits et on ne les trouve qu'au Nord du massif de Nador N'Bail à l'entrée des gorges de l'Oued Seybouse.

Ces affleurements sont formés par des schistes satinés alternants avec des petits bancs de grés.

V.2. Le Trias

On le trouve uniquement à l'extrémité Est de la plaine alluviale. Il est formé d'argiles bariolées injectées de gypse, cargneules et de bancs disloqués de calcaires dolomitiques sombres.

V.3. Le Néritique

Il est caractérisé par un faciès jurassique – crétacé plus ou moins karstifié. Il est surmonté par plusieurs nappes de charriages et impliqué dans les grands accidents. Il apparaît aussi sous forme de fenêtre à Djebel Mahouna, Djebel Debagh, Nador et plus à l'Ouest à Djebel Taya.

V.3.1. Le Jurassique

Il est représenté par des dolomies noires avec des schistes calcareuses de faibles épaisseurs dans la région de Djebel Debagh.

V.3.2. Le Crétacé

Le Crétacé inférieur est représenté par des calcaires massifs et de dolomies à algues d'âge Aptien. On le rencontre à Hamam Bradâa et Djebel Debagh. Les calcaires massifs à microbrèches calcarinites avec des niveaux calcaires à chailles indiquent nettement le faciès néritique du Compagnien – Mæstrichien (Vila, 1972). Le Crétacé supérieur est caractérisé par des niveaux calcareux dolomitiques riches en Orbitolines et des débris à Rudiste datant le Cénomaniens – Vraconien d'épaisseur limitée (fig. 3).

V.3.3. L'unité tellienne

Elle appartient au domaine externe de la chaîne des Maghrébides dans le Nord – Est Algérien. Cette unité correspond au domaine Tellien externe qui est constitué de formations paléogènes, où l'on distingue:

- un ensemble méridional à Nummulite et au Sud à Globigérines ;
- un ensemble médian à sédimentation profonde ;
- un ensemble septentrional à matériels Eocène.

La série débute par des marnes noires paléocènes et atteint le Lutécien inférieur avec une faune riche en Nummulite.

V.3.4. L'unité ultra – tellienne

Le faciès dominant est celui des marnes et marno-calcaires avec des barres de micrites à microfaunes variées (Delga et al, 1969).

De bas en haut, la stratigraphie est la suivante:

- marnes à ammonites (barrémien – albien)
- marnes à micrites vertes (Campanien)
- marnes grises (Maestrichtien) (fig. 4)

A Djeballa Khemissi, cette unité est caractérisée par des formations crétacées de faibles épaisseurs.

V.3.5. Le Numidien

Le Numidien forme les principaux reliefs de la région de Guelma (Mahouna, Houara). Il est caractérisé par un flysch gréseux constitué par les trois termes suivants :

- argiles vertes et rouges d'âge oligocène
- alternance d'argile et de gros blocs de grès souvent hétérométriques d'âge aquitanien
- argile, silicites et marnes correspondants au Burdigalien inférieur.

A Hammam Debagh, le sommet est représenté par des grès grossiers à dragées de quartz (Lahondère, 1981).

V.3.6. Les faciès post – nappe

V.3.6.1. Le Mio-Pliocène

Il est représenté, au niveau du bassin de Guelma, par des marnes à gypse, argiles et conglomérats rouges. Il est considéré comme une formation post – nappe, où on y voit succéder deux cycles:

- Le premier cycle représente la molasse de Guelma qui est visible sur la route Guelma-Lakhezaras. Cette molasse est composée de grès jaunes friables, intercalés avec des formations argilo – marneuses grises ou jaunes parfois gypseuses.
- Le second cycle formé par une succession d'argiles, de conglomérats rouges, d'argiles grises à gypses et à soufre et des calcaires lacustres.

V.3.7. Le Quaternaire

Les formations du Quaternaire sont la base de cette étude puisque avec les formations pliocènes elles constituent la roche réservoir de la nappe aquifère de Guelma.

Le Quaternaire occupe le centre du bassin et correspond au faciès de terrasses où l'on distingue:

V.3.7.1. Les Alluvions anciennes

Ce sont des éboulis mélangés parfois à des argiles numidiennes. Elles sont localisées tout le long du versant ouest du bassin.

Les terrasses d'alluvions anciennes, dominant d'environ 60 m le thalweg de la Seybouse, s'écartent pour former la grande plaine qui s'étend à l'Est de Guelma et se rattache vers le Sud à la terrasse pliocène qui atteint une altitude d'environ 100 m au dessus de la Seybouse. Cette dernière terrasse comprend tantôt des limons avec cailloux roulés, tantôt des conglomérats intercalés de bancs marno – calcaires un peu travertineux

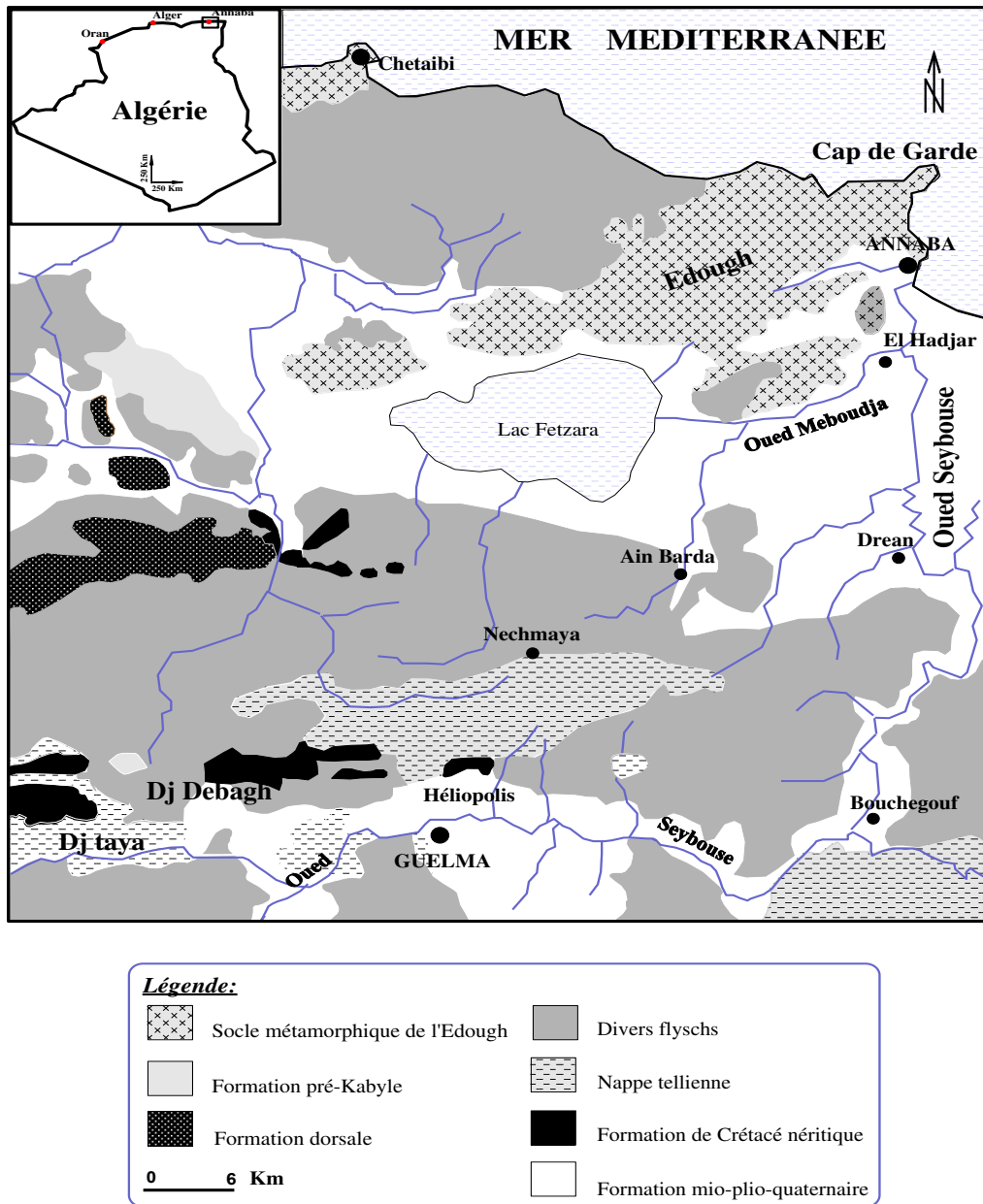


Fig. 3 : Esquisse géologique de la région d'étude (d'après Djabri et al; 2003 modifié)

I.3.7.2. Les Alluvions récentes

Elles forment la majeure partie de la vallée principale actuelle de l'Oued Seybouse. Ce sont des cailloutis, galets et graviers calcaires parfois à ciment marneux.

a) Région de Guelma :

La région qui s'étend entre Nador et Medjez Ammar est alluvionnée plus aisément que dans les autres régions de son parcours. Le Quaternaire se localise au centre de la plaine et correspond au faciès de terrasses où on distingue :

- **Les alluvions anciennes** : ce sont des éboulis qui atterrissent le long du versant ouest de la vallée de la Seybouse. Parfois, ces formations sont mélangées à des argiles numidiennes. Dans les basses terrasses ces alluvions dominent d'environ 15 mètres le lit actuel de la Seybouse et ses affluents. Dans la moyenne terrasse leur épaisseur est de 30 à 35 mètres. Au dessus de la Seybouse, pour la haute terrasse, l'épaisseur varie de 35 à 60 mètres. Ces alluvions sont constituées de galets roulés assez volumineux noyés par places dans les limons rougeâtres.

- **Les alluvions récentes** : ces formations sont peu importantes, elles sont constituées de limons et de cailloux roulés du fond des vallées, de galets et de gravier calcaire parfois à ciment marneux.

b) Région de Bouchegouf :

Le centre de la dépression de Bouchegouf est comblé par des alluvions déposées par l'oued Seybouse et qui semblent plus argileuses que celles de Guelma. Ils forment trois niveaux de terrasses (fig.n°05 et 06):

- **Alluvions de la basse terrasse** (5 m d'épaisseur), constituées de cailloutis et de limons,
- **Alluvions de la moyenne terrasse** (15 m d'épaisseur), cette unité est retrouvée en partie mineure au niveau de l'oued Mellah et s'épanouit dans la vallée de la Seybouse. Elle est représentée par des conglomérats, des galets et des cailloutis de grès numidiens,
- **Alluvions de la haute terrasse** (150 m d'épaisseur), cette unité est représentée par des argiles et des conglomérats.

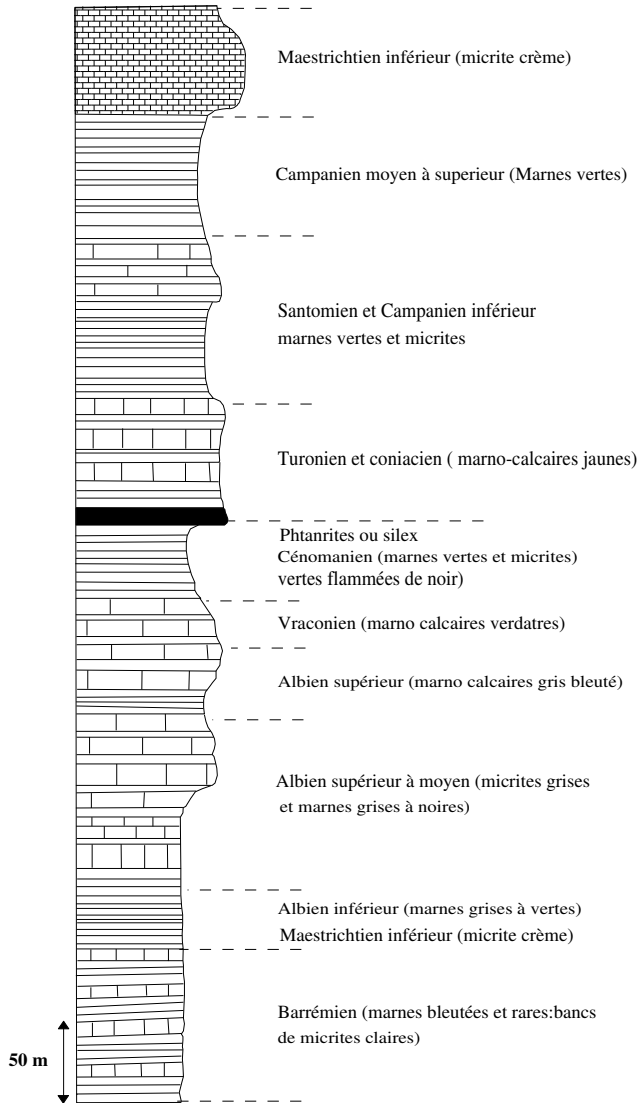


Figure. 4 : Bloc géologie Guelma (D'après Djabri, 1996)

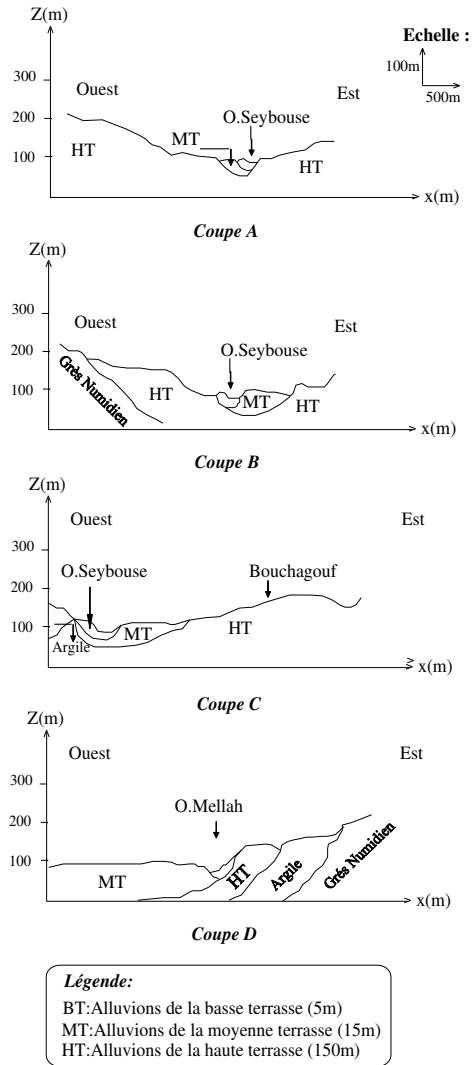


Figure. 5 : Coupes Géologiques de la plaine de Bouchegouf (D'après Chaoui, 2007)

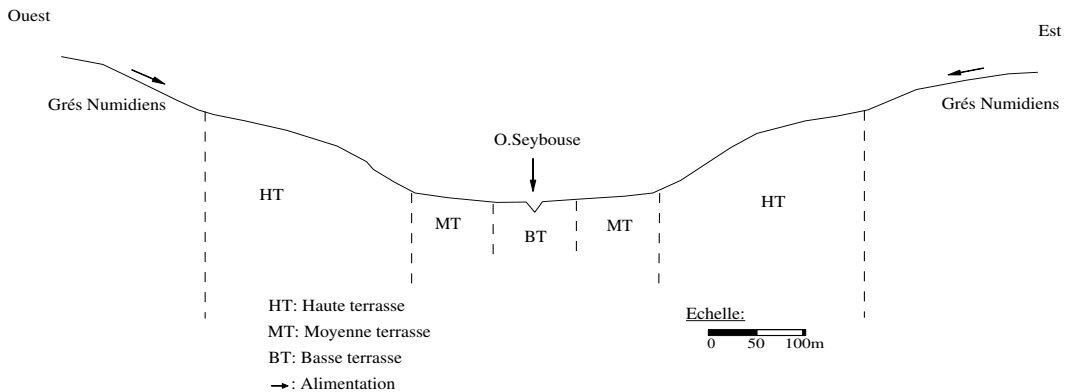


Figure. 6 : Coupe schématique des différents types de terrasses dans la plaine de Bouchegouf. (Chaoui, 2007)

VI. RECONSTITUTION PALEOGEOGRAPHIQUE :

Le paysage de la région d'étude a du être édifié suite à la manifestation de phases tectoniques, donnant la disposition actuelle des différentes unités allochtones.

La genèse du relief actuel a débuté pendant le Miocène inférieur suite à la compression de l'édifice et une transgression de la mer miocène. Le résultat a donné la mise en place des unités telliennes dans le sillon de Sellaoua et sur le domaine néritique. Les formations numidiennes viennent ensuite pour couronner tout l'ensemble. A partir du Miocène supérieur, la mer miocène a connu une régression synchrone avec des mouvements de réajustement de l'édifice. Ces derniers ont conduit à la naissance du bassin actuel de Guelma.

Ce phénomène d'éventrement vers le début du Quaternaire est facilité par l'existence de grands reliefs endossant le bassin au Nord par Djebel Houara et au Sud par la Mahouna.

L'érosion continue à laquelle était exposé cet édifice a mis à jour les alluvions couvrant toute la vallée et a formé les terrasses :

- Mio-Pliocène : naissance et remplissage du bassin.
- Quaternaire : ancien et récent - éventrement du bassin
- écoulement
- naissance de la vallée de la Seybouse
- dépôts des alluvions. (K. Benmarce, 2007)

VII. TECTONIQUE

La région de Guelma, située entre le littoral et les abords des Hauts plateaux se caractérise par un dispositif structural assez complexe. C'est précisément dans cette zone que se sont manifestés successivement à toutes les époques avec le plus d'intensité les mouvements orogéniques qui ont affecté cette partie de l'Algérie.

La région qui correspond à la chaîne de l'Atlas tellien et au Tell dont fait partie la chaîne numidique, se trouve extrêmement tourmentée et on y trouve représentés des exemples d'accidents tectoniques de tous genres.

Selon J.M.VILA (1980), du Tortonien à l'actuel, la région a connu le jeu de plusieurs déformations plicatives et cassantes qui se sont succédées et/ou sont combinées. Ces accidents ont dessiné un réseau spectaculaire de failles de direction atlasique ou d'Est en Ouest.

L'accident qui borde au Nord du bassin mio-pliocène de Guelma est bien défini. Cette grande faille est interceptée par de petites failles qui lui sont perpendiculaires.

Le bassin de Guelma a connu la succession de compressions et de distensions modérées. La tectonique de cette région est en fait très compliquée dans le détail. On peut remarquer que les sources thermo minérales se situent au croisement des plis de direction (NE-SW). Dans la première direction il s'agit de la tectonique de mise en place des nappes, dans la deuxième orientation (E-W), c'est la tectonique de réajustement de l'édifice et la naissance du relief actuel. (Laraba. A et Hadj ZOBIR. S., 2009).

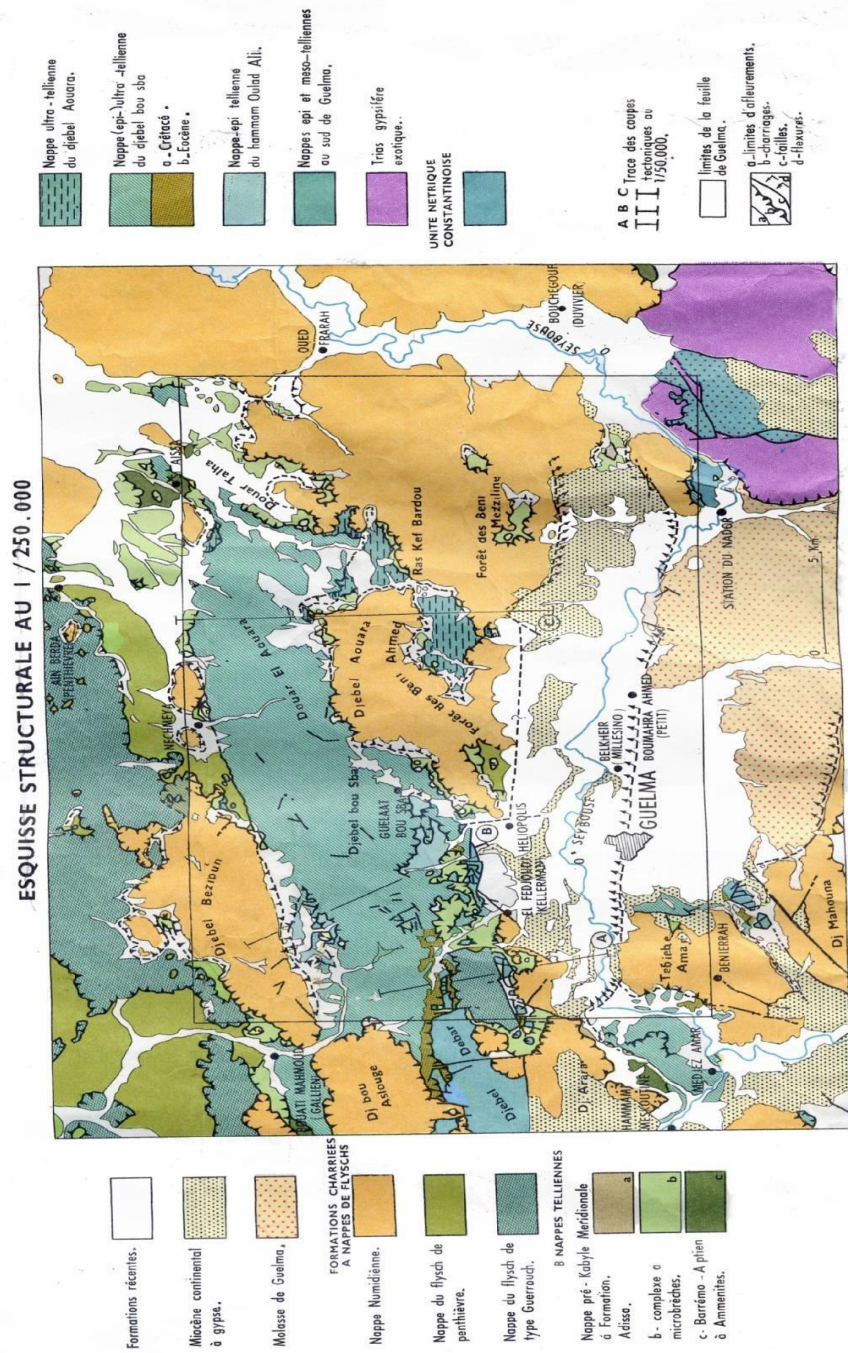


Figure. 7 : Carte structurale de la région de Guelma, Extraite de la carte géologique (JM.Vila, 1988)

VIII. CONCLUSION

La zone d'étude fait partie du domaine externe de la chaîne Alpine de l'Algérie orientale. La région est un pays de nappes de charriages. Les terrains qui constituent le sol et le sous sol sont variés et leurs âges oscillent entre le Trias et le Quaternaire. Du point de vue géomorphologique, la région d'étude correspond à une dépression à valeur de bassin allongé d'Est en Ouest dans laquelle se sont accumulés des dépôts du Néogène. Ce bassin est adossé au Nord comme au Sud à des reliefs appartenant pour l'essentiel au domaine tellien constitué de marnes et de carbonates d'âge méso-cénozoïque et dont la sédimentation de mer ouverte, s'est effectuée en domaine pélagique (unités telliennes). Les formations néritiques constantinoises qui représentent la terminaison orientale du domaine, apparaissent à la faveur de fenêtres, à Djebel Débar, à l'Est de Hammam Ouled Ali, à Héliopolis et à Nador. D'Ouest en Est ces formations carbonatées constituent le substratum des nappes telliennes de Guelma (Benmarce .K 2015).

En se basant sur la description géologique des terrains ainsi que les caractéristiques hydrogéologiques de chaque formation, on a pu établir le tableau suivant, qui synthétise et combine les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de chaque étage (tab. 2). Le couplage des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des formations de la région d'étude, a permis de distinguer un ensemble du remplissage mio plio-quaternaire, capable de constituer deux réservoirs d'eau :

- le réservoir de la nappe superficielle, représenté par des alluvions, constituées essentiellement par des sables, cailloutis, galets, limons et conglomérats ;
- le réservoir de la nappe des hautes terrasses, représenté par des galets, conglomérats, limons et sable.

Tableau 1 : Description géologique et hydrogéologique des formations de la région d'étude (D'après S. Mouassa, 2007).

Ere	Système	Lithologie	Epaisseur (m)	Intérêt hydrogéologique	
				perméabilité	type de nappe
Quaternaire	récent	-Alluvions actuelles : galets, calcaires, limons, travertins -Alluvions anciennes : 1. Basse terrasse : sables, cailloutis, limons. 2. Moyenne terrasse : sables, <cailloutis, galets, limons, conglomérats. 3. Haute terrasse : galets, conglomérats, limons. Sables.	15 30 - 50 100	Perméables	-Nappe de la basse terrasse -Nappe de la moyenne terrasse -Nappe de la haute terrasse
	ancien	tufs calcaires	-		/
Tertiaire	Mio-Pliocène	argile à gypse	-	impermeable	substratum
	Pliocène	Travertins	-	perméable	nappe des travertins

I. 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.

L'étude est basée sur le traitement et l'analyse des paramètres climatiques, principalement la température et les précipitations, ainsi que leur évolution dans le temps et dans l'espace durant une période d'observation comprise entre 1985 et 2013 au niveau de la station météorologique de Belkheir, afin d'établir un bilan hydrologique qui conditionne le fonctionnement du système hydrogéologique.

II. Caractérisation du climat de la région de Guelma

Les données pluviométriques et de température ont été collectées dans la station météorologique de Guelma, située à Belkheir, distante de 4 km de la ville de Guelma. Les caractéristiques de cette station sont illustrées dans le tableau (tab. 2).

Les séries d'observation s'étendent de 1984-85 à 2012-13 pour les données pluviométriques et les températures (période de 28 ans).

Tableau. 2: Coordonnées et période d'observation de la station pluviométrique de Guelma.

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d'observation
Guelma	07°28'44,91" E	36° 27'23,75" N	215	1985 à 2013

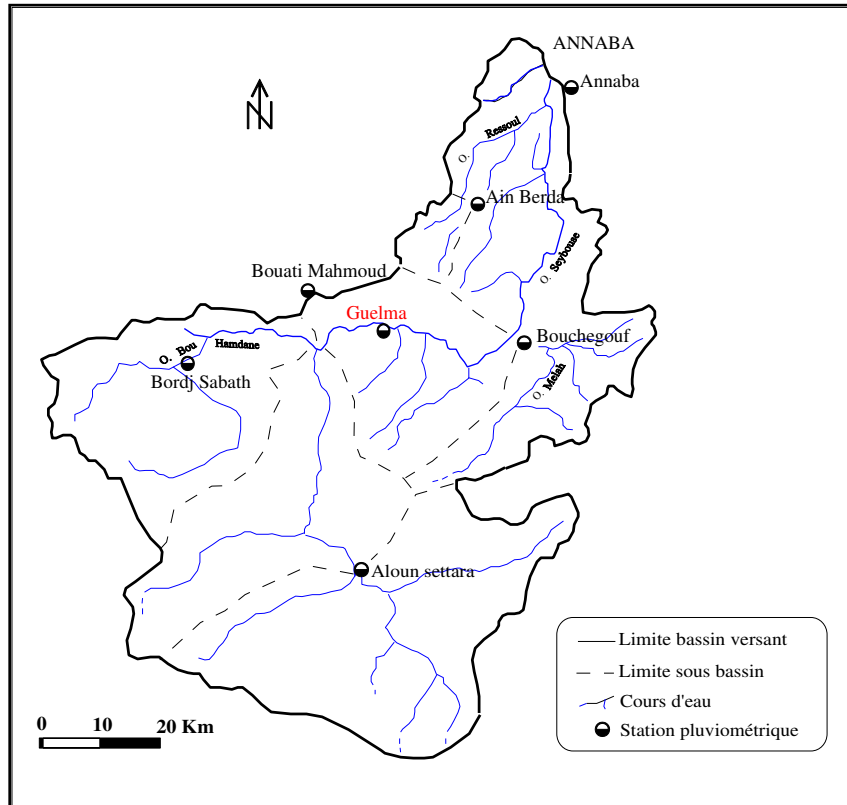


Figure. 8 : Localisation des postes pluviométriques de référence (LOUAMRI, A, 2013)

II.1. Calcul de l'indice d'aridité de De Martonne :

Pour la détermination du type de climat De Martonne (1925) a proposé une formule climatologique appelée indice d'aridité qui est fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations moyennes annuelles : (fig. 9a).

Cet indice est calculé d'après la formule suivante :

$$I_M = P / (T + 10)$$

I_M : Indice d'aridité annuelle.

P : précipitations moyennes annuelles en mm.

T : température moyenne annuelle en °C.

Le type de climat selon la valeur de l'indice de De Martonne :

- $I_M < 5$: climat hyperaride.
- $5 < I_M < 7,5$: climat désertique.
- $7,5 < I_M < 10$: climat steppique.
- $10 < I_M < 20$: climat semi-aride.
- $20 < I_M < 30$: climat tempéré
- $30 < I_M < 55$: Humide.

Les calculs des paramètres de bilan hydrologique de la zone de Guelma, font ressortir les valeurs suivantes :

- La température annuelle moyenne est de 17.79 °C
- Les précipitations moyennes annuelles de 601.89 mm.

L'indice d'aridité de De Martonne est de:

$$I_M = 21.66 \quad \text{où } 20 < I_M < 30$$

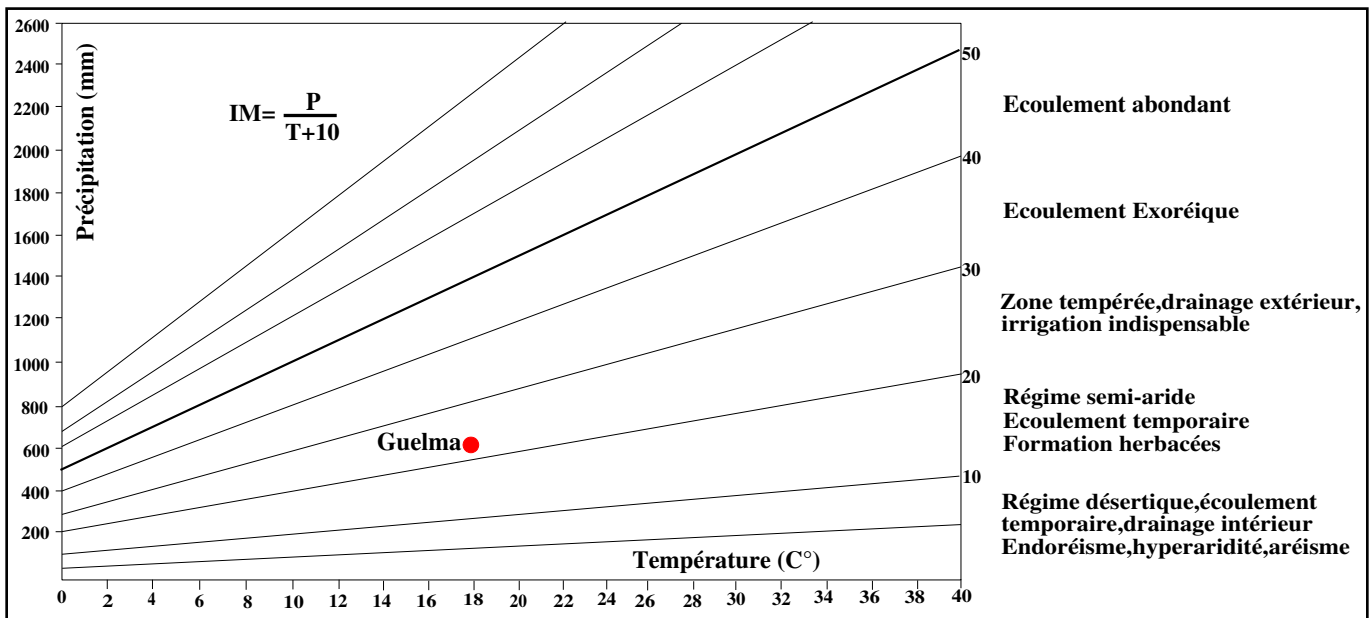


Figure. 9a : Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne.

II.2. Calcul de l'indice d'aridité mensuel De MARTONNE (1923) (fig. 9b)

L'indice mensuel (i) est donné par la formule suivante:

$$IDM = 12P / (T + 10)$$

Où :

IDM : Indice d'aridité mensuel.

P : Précipitations moyennes mensuelles en mm.

T° : Température moyenne mensuelle en °C.

Cette équation définit l'évolution des conditions climatiques au cours de l'année, les valeurs calculées sont reportées au tableau 3 suivant ;

Tableau. 3 : Indices d'aridité mensuels (IDM) à la station de Guelma.

Mois	P (mm)	T °C	IDM	Étage bioclimatique
Septembre	41.82	23.90	14.80	semi-aride
Octobre	47.11	19.94	18.88	semi-aride
Novembre	68.91	14.73	33.43	humide
Décembre	80.94	10.99	46.27	humide
Janvier	86.18	9.71	52.47	humide
Février	67.04	10.15	39.92	humide
Mars	60.74	12.41	32.52	humide
Avril	64.53	14.88	33.12	humide
Mai	48.52	18.80	02.21	climat tempéré
Juin	17.58	23.30	6.24	climat désertique
Juillet	3.60	27.14	1.16	climat hyperaride
Aout	14.90	27.51	3.76	climat hyperaride

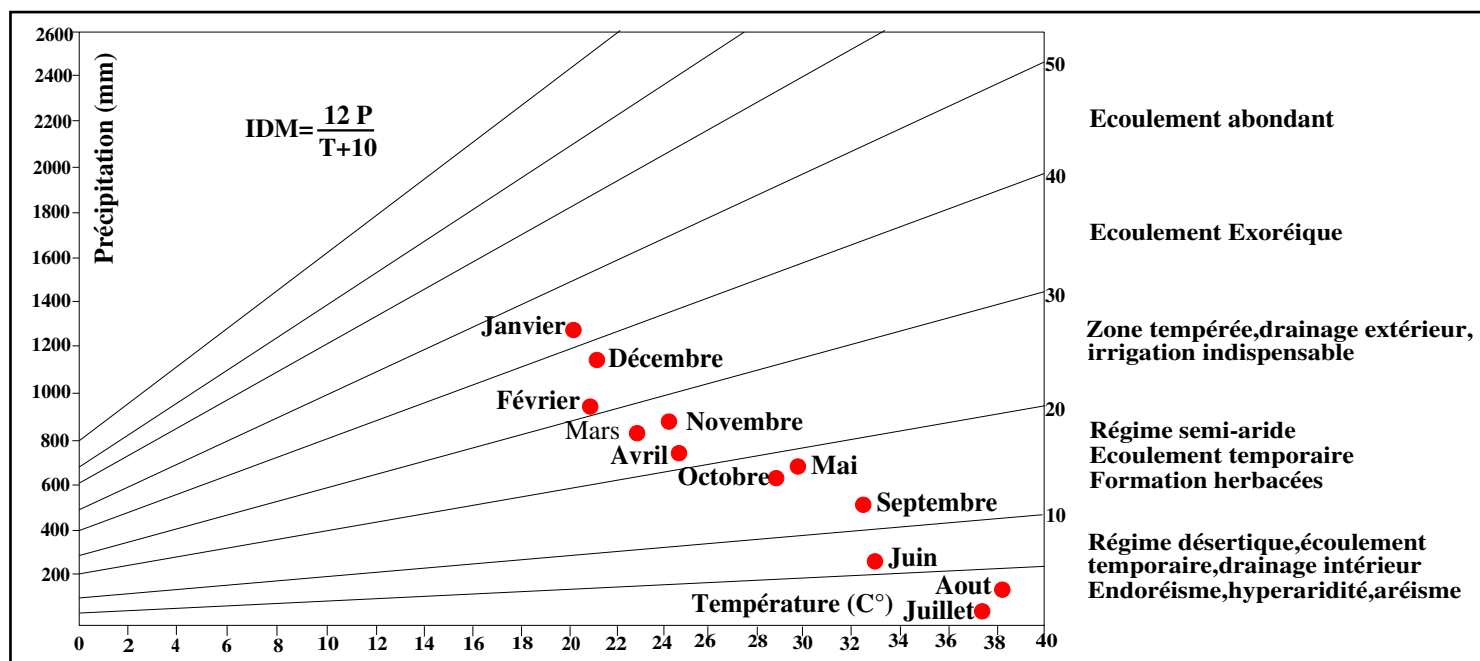


Figure. 9b : Abaque de l'Indice d'aridité mensuel de De Martonne

II.3. Indice de l'UNESCO (1977)

Aujourd'hui, la classification la plus universelle des régions arides est celle proposée par l'UNESCO en 1977.

Cette classification est réalisée sur la base des valeurs du rapport P/ETP (Smith & Koala, 1999), avec P total des précipitations moyennes annuelles et ETP l'évapotranspiration potentielle, calculée avec la formule de Penman. Ceci a permis de classer les régions arides en zones, ainsi ont été définies les zones suivantes : hyperarides, arides, semi-arides et sub-humides (Tab. 4).

Tableau. 4 : Classification des différentes formes d'aridité (Science et changement planétaires, 2005).

Zone	Ih
Hyperaride	< 0.03
Aride	0.03 - 0.2
Semi-aride	0.2 - 0.5
Subhumide	0.5 - 0.75

Pour la station de Guelma (P = 601.89 mm et ETP = 907.76 mm) l'indice obtenu est de 0.66 ce qui traduit un climat subhumide.

II.4. Indice d'aridité d'Emberger

Cette méthode, permet la classification de la région en fonction de son étage bioclimatique. Elle donne un aperçu exact sur le climat de la région ciblée.

Le Climagramme d'Emberger permet de classer les stations de la méditerranée au sein de cinq (5) étages bioclimatiques : humide, sub-humide, semi-aride, aride et saharien. Le Climagramme considère qu'une région est d'autant plus sèche lorsque le quotient est plus petit.

Vu le manque de données des températures moyennes minimales et maximales des années 1985 à 2001, nous avons utilisé seulement celles de l'année 2002 à 2013 pour le calcul de ce quotient pluviométrique (Tab. 5).

Ce quotient est défini par la formule suivante:

$$Q_2 = \frac{2000 P}{(M^2 - m^2)}$$

Avec

- Q₂ : quotient pluviométrique d'Emberger;
- M : la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (degrés/Kelvin) ;
- m : la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (degrés/Kelvin) ;
- P : pluviométrie annuelle en mm.

(T°k = T°C + 273,2).

Tableau. 5 : Estimation de la valeur de Q_2 .

Station	P (mm)	M		m		Q_2
		° C	° k	° C	° k	
Guelma	665.69	36.50	309.70	4.52	277.72	70.87

L'emplacement de cet indice sur le climagramme d'EMBERGER nous a permis de situer la zone de Guelma dans l'étage bioclimatique *Sub-humide* aux hivers tempérés (fig. 10).

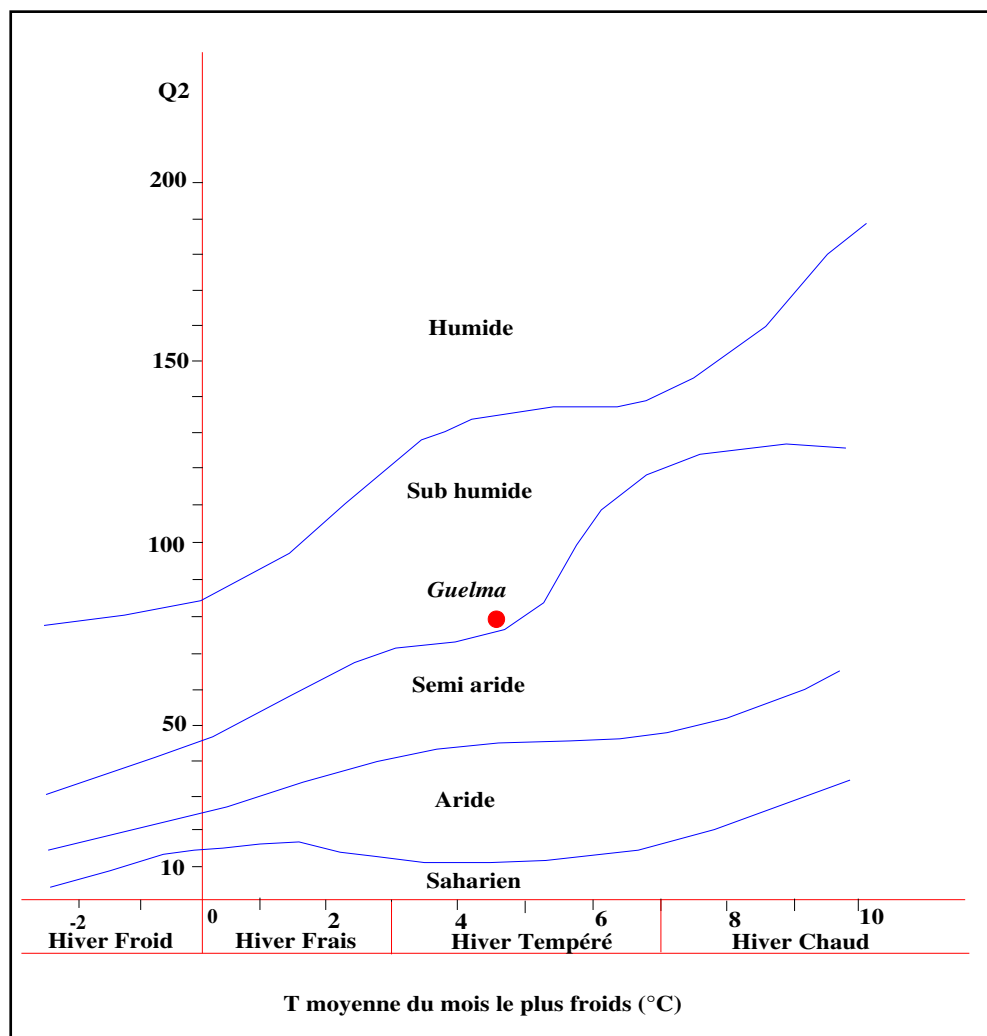


Figure. 10 : Climagramme de L. Emberger de la station de Guelma.

II.5. Récapitulation

En se basant sur les résultats des trois méthodes indiquées dans le tableau 6, on peut qualifier le climat de la région de Guelma comme étant sub-humide.

Tableau. 6 : Comparaison des indices d'aridité pour la zone d'étude.

Zone d'étude	Indice	Valeur de l'indice	Type de climat
Guelma	d'aridité de DE Martonne	$I_M = 21.66$ $20 < I_M < 30$	Tempéré ou Sub-humide
	d'humidité climatique l'UNESCO (1977)	$I_h = 0.66$ $0.5 < I_h < 0.75$	Sub-humide
	pluviothermique de L.Emberger	$Q_2 = 70.87$ $60 < Q_2 < 100$	Sub-humide

II.6. Diagramme pluviométrique de Gaussen ($P = 2T$)

Un diagramme pluviométrique est un type particulier de diagramme climatique représentant les variations mensuelles sur une année des températures et des précipitations selon des gradations standardisées : une gradation de l'échelle des précipitations correspond à deux gradations de l'échelle des températures ($P = 2T$).

Le diagramme pluviométrique de Gaussen permet de calculer la durée de la saison sèche. Il tient compte de la pluviosité moyenne mensuelle et la température moyenne mensuelle qui sont portées sur des axes où l'échelle de la pluviosité est double de la température ($1^\circ\text{C} = 2 \text{ mm}$).

Si $P < 2T$: mois sec

Si $P > 2T$: mois humide

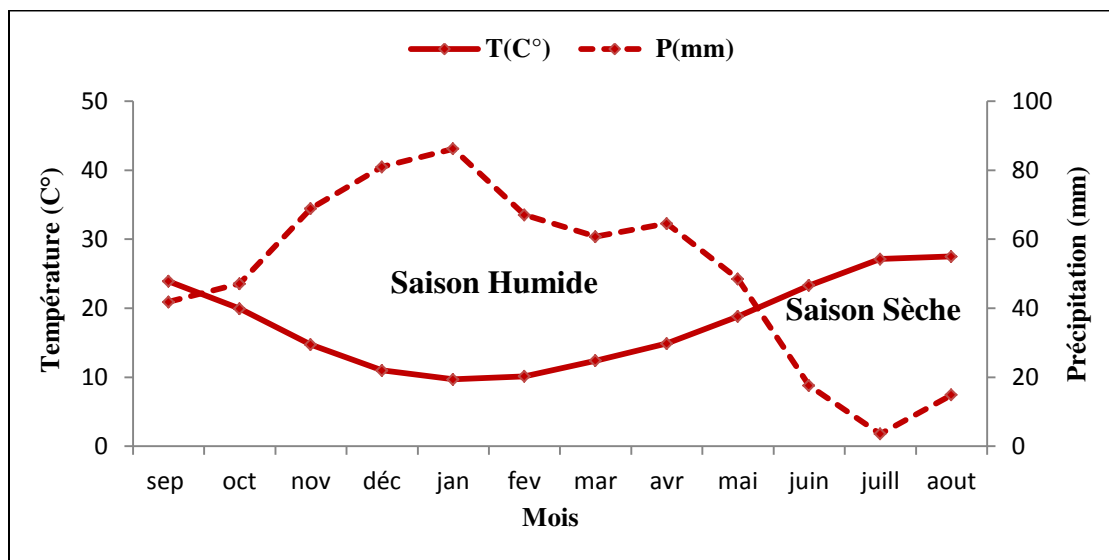


Figure. 11 : Diagramme pluviométrique de la station de Guelma.

Le diagramme pluviométrique établi (fig. 11) montre l'existence de deux saisons bien distinctes:

- Une saison estivale sèche et chaude qui s'étale du mois de Juin (23.30°C), jusqu'à Septembre (23.90°C). Cette saison n'excède pas quatre mois.
- Une saison hivernale humide plus longue qui dure environ sept mois qui s'étale de mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai.

III. Etude des paramètres climatiques

La connaissance des facteurs climatiques (précipitations, températures,..) est indispensable pour quantifier les ressources en eaux, de surface et de déterminer la part de l'eau qui s'infiltré dans les nappes, constituant ainsi les eaux nécessaires utilisables.

III.1. Les précipitations :

Constituants un facteur essentiel qui caractérise le climat d'une région, elles jouent un rôle prépondérant dans le comportement hydraulique des cours d'eau et dans l'alimentation éventuelle des nappes souterraines.

III.1.1. Variation moyennes mensuelles interannuelles des précipitations

La courbe de variation des précipitations mensuelles sur une période de 28 ans allant de 1985 à 2013 (fig. 12) montre que :

- Le mois le plus pluvieux est le mois de janvier avec une précipitation moyenne mensuelle de 86.18 mm ;

- Le mois moins arrosé est le mois de juillet avec une précipitation moyenne mensuelle de 3.60 mm ;
- La hauteur moyenne mensuelle est de 50.16 mm.

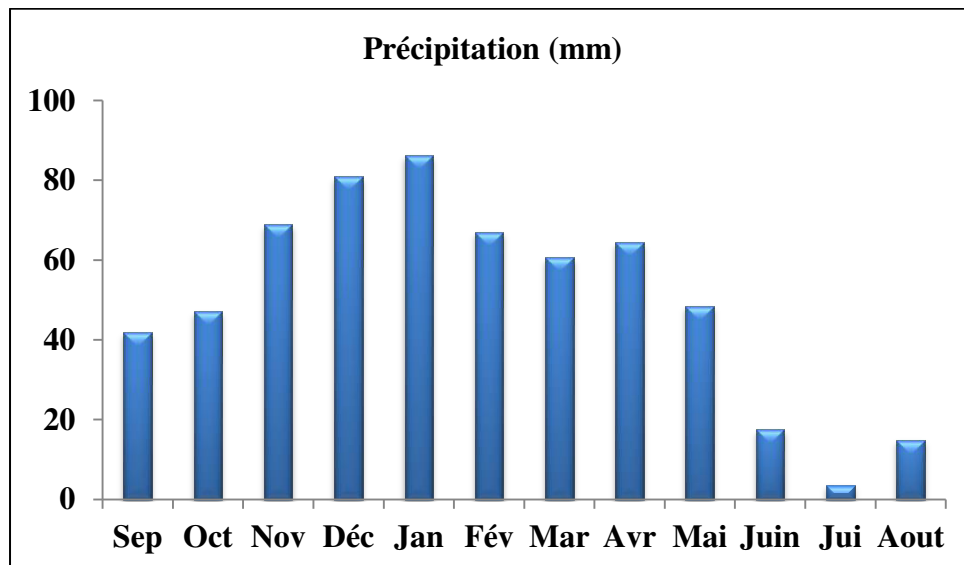


Figure. 12 : Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station de Guelma (1985-2013).

III.1.2. Variations interannuelles des précipitations

L'analyse de la courbe des variations interannuelles des précipitations sur une période de 28 ans (1985-2013) montre une grande différence entre l'année la plus arrosée (2002/2003) avec des précipitations de 879 mm et l'année la plus sèche (1996-1997) avec des précipitations de 291 mm (fig.13). Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 601.89 mm.

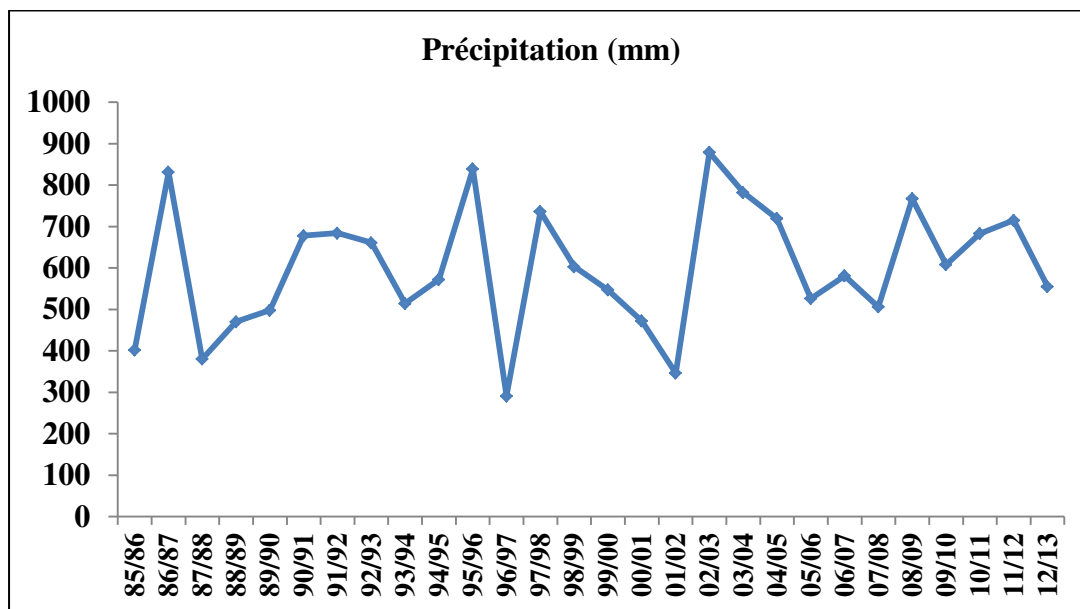


Figure. 13 : Variation interannuelle des précipitations à la station de Guelma (1985-2013).

III.1.3. La variabilité des précipitations annuelles :

La variabilité interannuelle des précipitations est exprimée par le coefficient pluviométrique (CP), ce paramètre climatique est très important dans la détermination des années excédentaires et les années déficitaires (Zaoui .L 2016).

Le coefficient pluviométrique est en relation proportionnelle avec la pluviométrie. Il est calculé par le rapport de la pluviométrie de l'année considérée sur la pluviométrie moyenne de la série

observée à une station donnée

$$CP = \frac{P}{\bar{P}}$$

Avec :

CP : Coefficient pluviométrique.

P : Pluviométrie de l'année considérée (mm).

\bar{P} : Pluviométrie moyenne pour la période d'étude (mm).

Si:

- $CP > 1 \Rightarrow$ on a une année excédentaire.
- $CP < 1 \Rightarrow$ on a une année déficitaire.

Par conséquent le calcul du coefficient de variation durant la période d'observation (fig. 14) met en évidence 14 années déficitaires et 14 autres excédentaires.

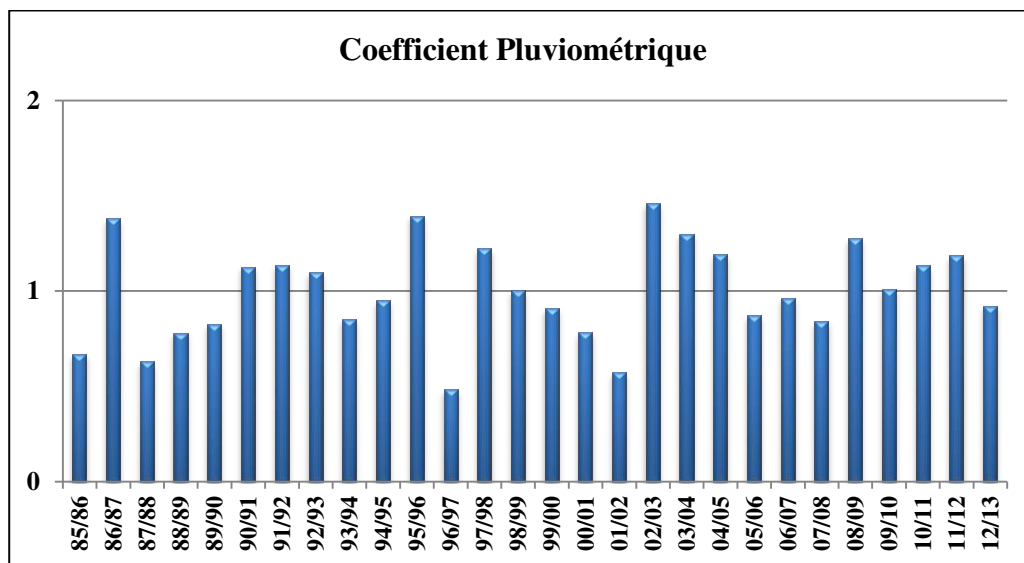


Figure. 14 : Variations du coefficient pluviométrique à la station de Guelma (1985-2013).

III.2. Température

La température est le deuxième facteur dans l'étude climatique, car elle agit directement sur le phénomène d'évapotranspiration et par conséquent le déficit d'écoulement annuel et saisonnier.

III.2.1. Variation des températures moyennes mensuelles :

La courbe représentative des variations de températures moyennes mensuelles (fig. 15), nous montre deux saisons thermiques.

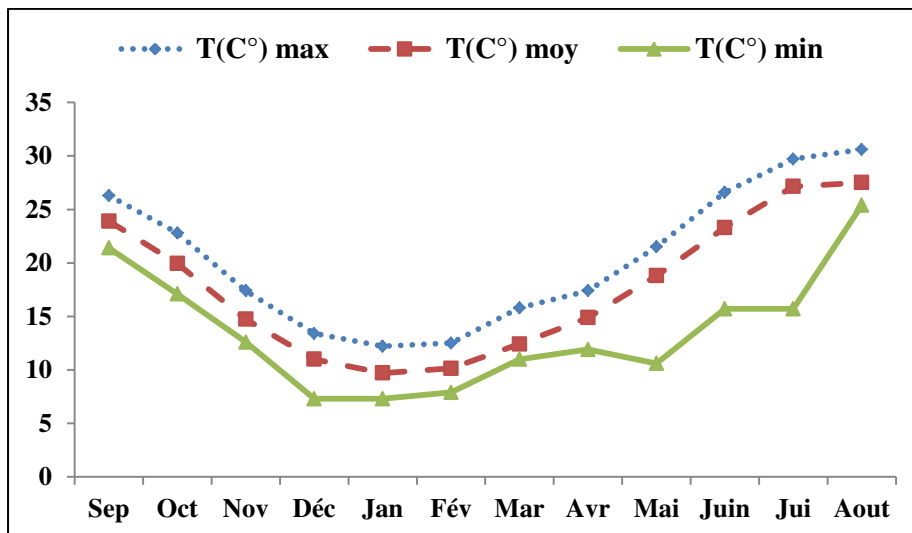


Figure. 15 : Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Guelma (1985-2013).

- Une saison chaude, caractérisée par des moyennes mensuelles maximales enregistrées aux mois de juillet et d'août, avec respectivement une température de l'ordre de 29.7°C et 30.6°C.
- L'autre froide, caractérisée par des moyennes mensuelles minimales enregistrées aux mois de décembre, janvier et février, avec une température de l'ordre de 7.3°C et 7.9°C.
- La moyenne mensuelle est de 17.79°C.

III.2.2. Variation des températures moyennes annuelles

La courbe des Variations interannuelles des températures observées pour la station de Guelma nous montre :

- une année plus chaude (1993-1994) avec une moyenne de 18.84°C
- une année plus froide (1991-1992) avec une moyenne de 16.43°C.
- la température moyenne interannuelle est de l'ordre de 17.79°C (fig. 16).

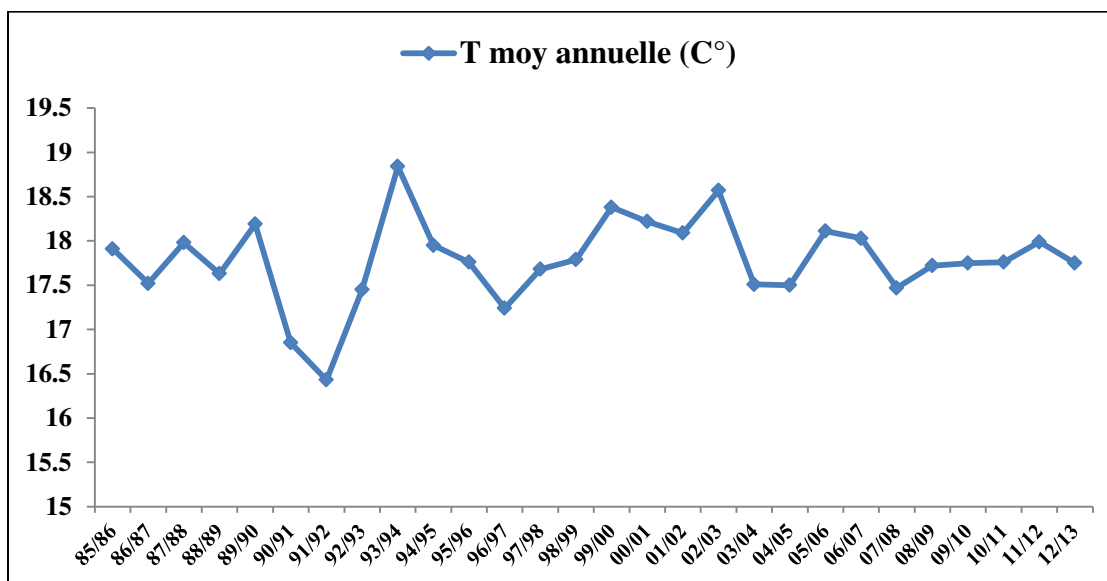


Figure. 16. Evolution des températures moyennes annuelles à la station de Guelma (1985-2013).

III.3. Humidité :

L'humidité relative de l'air correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de vapeur saturante à la même température.

D'après la figure (fig. 17), on peut constater que l'humidité le plus élevée remarquée pendant les mois les plus froids ; en novembre et janvier (82%) et plus faible pendant le mois le plus chaud ; en aout (42%).

D'après la figure on remarque une moyenne mensuelle de l'humidité relative de 68.98%, avec une moyenne maximale de 75.65%, et une moyenne minimale de 59.95%.

Donc la zone de Guelma caractérisée par la présence d'un important taux d'humidité relative.

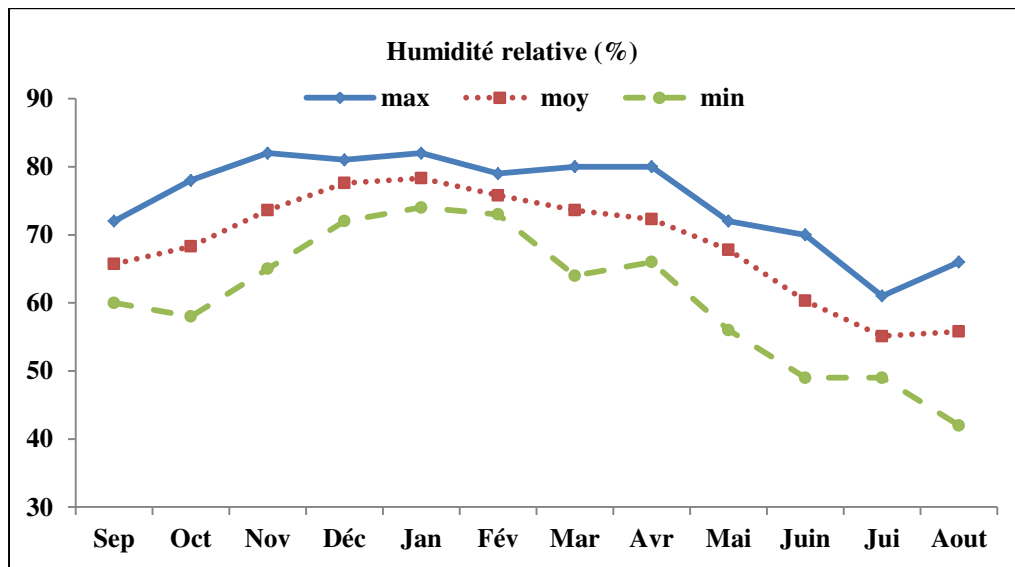


Figure. 17 : Variations moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air à la station de Guelma (1985/2013)

IV. Estimation des paramètres du bilan hydrique:

Le bilan de l'eau est fonction d'un certain nombre de facteur, dont les précipitations, l'infiltration et surtout l'évapotranspiration. Il nous permet d'évaluer les effets du climat sur l'écoulement dans le bassin versant et tient compte uniquement des entrées et des sorties, qui s'effectuent par voie atmosphérique.

Le bilan hydrologique d'un bassin peut se traduire par l'équation suivante :

$$P = ETR + I+R + \Delta RFU$$

Avec :

P : Lame moyenne précipitée sur le bassin versant en mm

ETR : Evapotranspiration réelle en mm. L'évapotranspiration réelle correspond à la quantité d'eau effectivement évapo-transpirée au dessus de la surface étudiée. L'ETR dépend de la lame d'eau stockée dans le sol et la pluviosité.

I : Infiltration moyenne en mm,

R : Ruissellement en mm,

ARFU : Variation de la réserve facilement utilisable, c'est-à-dire de la lame d'eau stockée dans le sol, utilisable par les plantes. La RFU commence à alimenter l'ETR quand les précipitations deviennent inférieures à l'ETP.

L'excédent (**EXC**), différence positive, par définition, entre la précipitation et l'évapotranspiration réelle, correspond au surplus des précipitations qui peut ruisseler ou s'infiltrer : l'excédent est assimilé à la pluie efficace, cette notion diffère d'un auteur à l'autre. En hydrogéologie la pluie efficace (P_e) est parfois confondue avec l'infiltration. En hydrologie par contre, la pluie efficace (P_e) correspond à la partie qui alimente les cours d'eau. L'excédent (**EXC**) correspond à la somme des précipitations ruisselées et infiltrées

Le non-équipement des stations météorologiques utilisées pour la détermination de certains paramètres, nous oblige à utiliser la méthode de Thornthwaite basée sur les données fournies par la station de Guelma. Nous avons retenu une période d'observation comprise entre (1985-2013), période d'observation relativement longue.

IV.1. Evapotranspiration

Au cours de travaux sur la croissance des végétaux, Thornthwaite, botaniste et climatologue Américain, avait noté que les échanges d'eau entre la plante et l'atmosphère conditionnaient pour une grande part la croissance du tissu végétal. L'évapotranspiration potentielle correspond à une alimentation hydrique optimale des végétaux. Pour le calcul de l'évapotranspiration, nous pouvons utiliser l'une des méthodes suivantes :

- a) la méthode Thornthwaite (1948), Thornthwaite & Mather (1955) ont relié l'évapotranspiration potentielle (ETP) à des paramètres facilement accessibles : la température moyenne de l'air et la durée théorique de l'insolation.
- b) la méthode de Penman (1950) prend en compte quatre facteurs principaux qui agissent sur l'ETP : la température de l'air, la radiation solaire, l'humidité et le vent.

c) la méthode de Turc (1954, 1961) utilise uniquement deux variables : la température et la durée d'insolation.

IV.1.1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon la méthode Thornthwaite :

Selon Penman (1956), l'évapotranspiration potentielle est définie comme: l'évaporation à partir d'une surface de gazon court, poussant activement, recouvrant totalement le sol de hauteur uniforme et bien pourvue en eau. C'est-à-dire que l'ETP est l'évapotranspiration maximale d'un couvert végétal.

A partir des expériences réalisées sur des lysimètres, Thornthwaite (1954) considère que pour des étendues de surface assez vastes et des pas de temps assez longs, le facteur le plus prépondérant pour l'ETP est la température. La formule qu'il propose s'écrit:

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

Avec

ETP : évapotranspiration potentielle du mois considéré en mm.

T : Température moyenne mensuelle en °C ;

i: Indice thermique mensuel: $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$

I: Indice thermique annuel : $I = \sum i$;

K : coefficient d'ajustement ;

a = l'exposant climatique donné par la formule : $a = \left(\frac{1.6}{100} \right) I + 0.5$;

Tableau. 7: Valeurs de l'évapotranspiration potentielle à la station de Guelma par la méthode de Thornthwaite

Année	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
T°C	23.90	19.94	14.73	10.99	9.71	10.15	12.41	14.88	18.80	23.30	27.14	27.51
i	10.68	8.11	5.13	3.29	2.73	2.92	3.96	5.21	7.42	10.27	12.94	13.21
I	85.87											
a	1,87											
K	1,03	0,97	0,86	0,81	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16
ETP (mm)	111.75	75.00	37.74	20.55	17.1	18.85	32.81	49.14	83.81	126.22	170.65	163.73

IV.1.2. Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

IV.1.2.1. Calcul de l'ETR selon la formule de Thornthwaite :

Pour le calcul de l'ETR Thornthwaite a considéré deux cas :

1- Pour un mois $P \geq ETP$, on pose $ETP = ETR$, la quantité d'eau qui reste ($P-ETR$) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur, il y'aura un excédent (EX) qui va partir sous forme d'infiltration efficace vers la nappe soit sous forme de ruissellement.

2- Pour un mois $P < ETP$ la valeur de $ETP = P + RFU$ jusqu'à l'égalisation avec ETP.

Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole $DA = ETP - ETR$, ce dernier paramètre représente alors le besoin de culture à l'irrigation.

IV.1.2.2. Calcul de l'ETR selon la formule de Turc :

La formule de Turc se base sur les données des températures moyennes annuelles et des précipitations moyennes annuelles pour le calcul de l'ETR. Avec : $ETR = P / (0,9 + P^2/L^2)^{0,5}$

L : pouvoir évaporant = $300 + 25t + 0,05t^3 = 1026,26$.

avec ETR : Evapotranspiration réelle en mm ;

P : Précipitation moyenne annuelle en (601.89 mm);

T : Température moyenne annuelle (17.79 °C).

$L = 300+25T+0.05T^3=1026.26$ **ETR= 626.96 mm**

IV.1.2.3. Interprétation des résultats (ETR) :

Les résultats donnés par la méthode de Turc sont obtenus en appliquant des formules empiriques, tandis que l'ETR selon Thornthwaite est déduite selon le calcul des différents paramètres du bilan de l'eau (ETR, RFU....., etc.), ce qui donne des résultats plus proche de la réalité.

Tableau. 8: Résultats de l'ETR selon Thornthwaite et Turc.

Station	ETR (mm) d'après Thornthwaite	ETR (mm) d'après Turc
Guelma	449.2	626.96

IV.1.3. Estimation du ruissellement (R) :

Le ruissellement de surface représente la quantité d'eau des pluies qui coule à la surface du sol et rejoint les cours d'eau.

Le ruissellement est estimé par la formule de Tixeront-Berkaloff et modifiée par Romantchouk en 1974. Elle s'écrit :

Pour $P < 600\text{mm}$ $R = \frac{P^3}{3ETP^2}$

Pour $P > 600\text{mm}$ $R = \frac{P^3}{3}$

Le défaut de la méthode est qu'elle ne tient pas compte de la nature du sol ou des formations traversées. On prend la valeur de l'ETP de Thornthwaite. (Tab.9).

Tableau. 9 : Résultats du calcul du ruissellement

P (m)	ETP (m)	R (m)	R (mm)	%
0.601	0.907	0.072	72.36	12

IV.1.4 Estimation des réserves facilement utilisables (RFU)

Les réserves facilement utilisables (RFU), représentent la quantité d'eau maximale que le sol peut retenir et qui est susceptible de retourner à l'atmosphère. Le calcul des RFU des sols est nécessaire pour le calcul des infiltrations. Le degré de saturation du sol dépend de plusieurs facteurs :

- la nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche superficielle ;
- la profondeur du niveau piézométrique de la nappe aquifère ;
- le climat de la région ;
- le type de la couverture végétale.

En tenant compte de tous ces facteurs l'estimation des RFU pour la région d'étude est de 100 mm.

IV.1.5. Estimation de l'infiltration (I) :

Représente la quantité d'eau absorbée par le sol et le sous-sol, pour constituer l'eau de rétention, des eaux souterraines et des écoulements souterrains, et reconstitution des réserves souterraines à partir de la formule du bilan hydrologique : $I=P-(ETR+R)$

P : Précipitation moyenne annuelle en mm ;

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm ;

R : Ruissellement ;

I : Infiltration efficace moyenne annuelle en mm

L'application numérique donne : **I= 80.33 (mm/an)** ce qui représente 13 % des précipitations.

IV.2.Bilan hydrique :

Le bilan hydrique établi pour la zone d'étude sur une période de 28 ans (1985-2013) (Tab. 10), repose sur la détermination et la comparaison entre les apports et les pertes en eau selon la méthode de Thornthwaite où les résultats sont beaucoup plus proches de la réalité.

Les valeurs obtenues de l'évapotranspiration potentielle et réelle, le déficit agricole et l'excédent sont représentés par les graphiques des figures 18 et 19 qui révèlent les points suivants :

- Une période déficitaire qui s'étend de juin à octobre et se caractérise par :
 - Un déficit agricole de DA= 461.3 mm
 - Une absence d'alimentation du stock (RFU = 0)
 - Une forte évapotranspiration potentielle mensuelle qui atteint 171.4 mm
 - Une température élevée de l'ordre de 27.51 °C.
- Une autre période excédentaire caractérisée par :
 - Une pluviométrie importante qui atteint 86.18 mm au mois de janvier,
 - Faibles température et évapotranspiration;
 - Une recharge du stock, où la RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois de novembre pour atteindre son maximum (100 mm) de janvier à avril, période pendant laquelle il y a un excédent d'eau qui va contribuer à l'alimentation de la nappe aquifère.

Tableau. 10: Bilan hydrique à la station de Guelma (1985-2013) selon la méthode de Thornthwaite

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Totaux
P(mm)	41,82	47,11	68,91	80,94	86,18	67,04	60,74	64,53	48,52	17,58	3,60	14,90	-
T(C°)	23,90	19,94	14,73	10,99	9,71	10,15	12,41	14,88	18,80	23,30	27,14	27,51	-
i	10,68	8,12	5,13	3,29	2,73	2,92	3,96	5,21	7,42	10,27	12,94	13,21	85,87
k	1,03	0,97	0,86	0,81	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16	-
ETP	111,75	75,00	37,74	20,55	17,51	18,58	32,81	49,14	83,81	126,22	170,65	163,73	907,49
ETR	41,82	47,11	37,74	20,55	17,51	18,58	32,81	49,14	83,81	82,1	3,60	14,90	449,2
RFU	0	0	31,21	91,62	100,00	100,00	100,00	100,00	64,5	0	0	0	-
EXD	0	0	0	0	60,2	48,5	27,9	15,3	0	0	0	0	151,8
DA	70.4	28.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	44.6	167.8	150.5	461.3

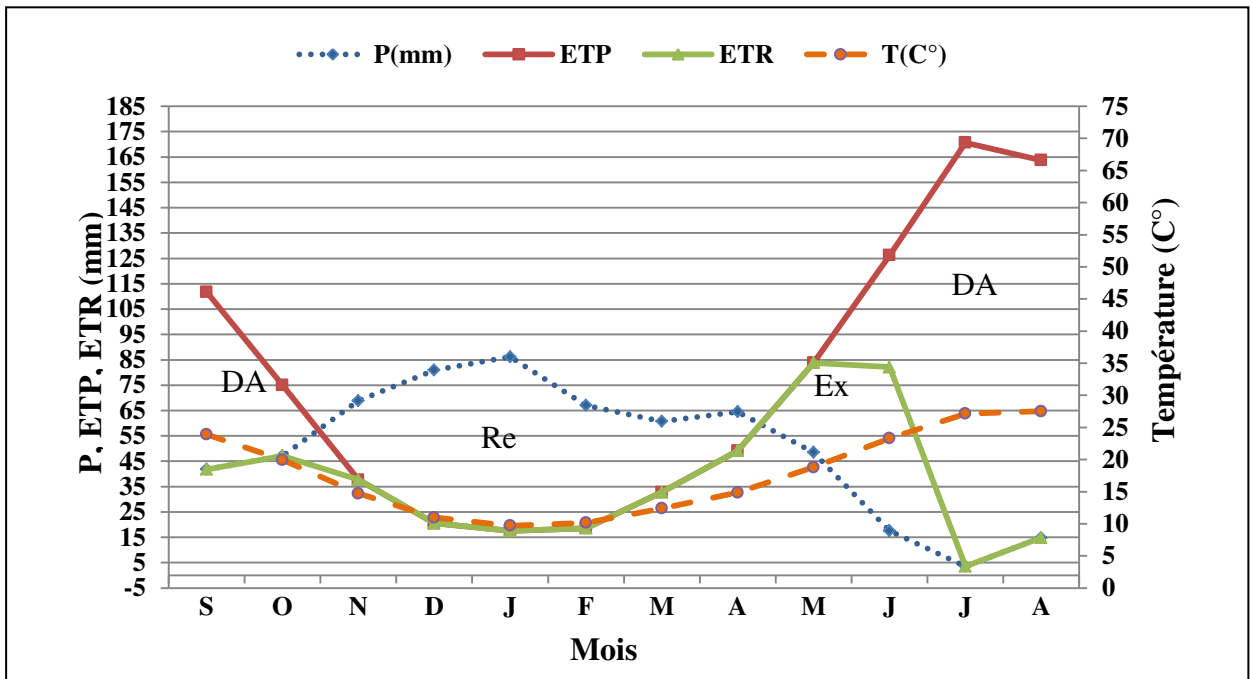


Figure. 18 : Représentation graphique des paramètres du bilan hydrologique

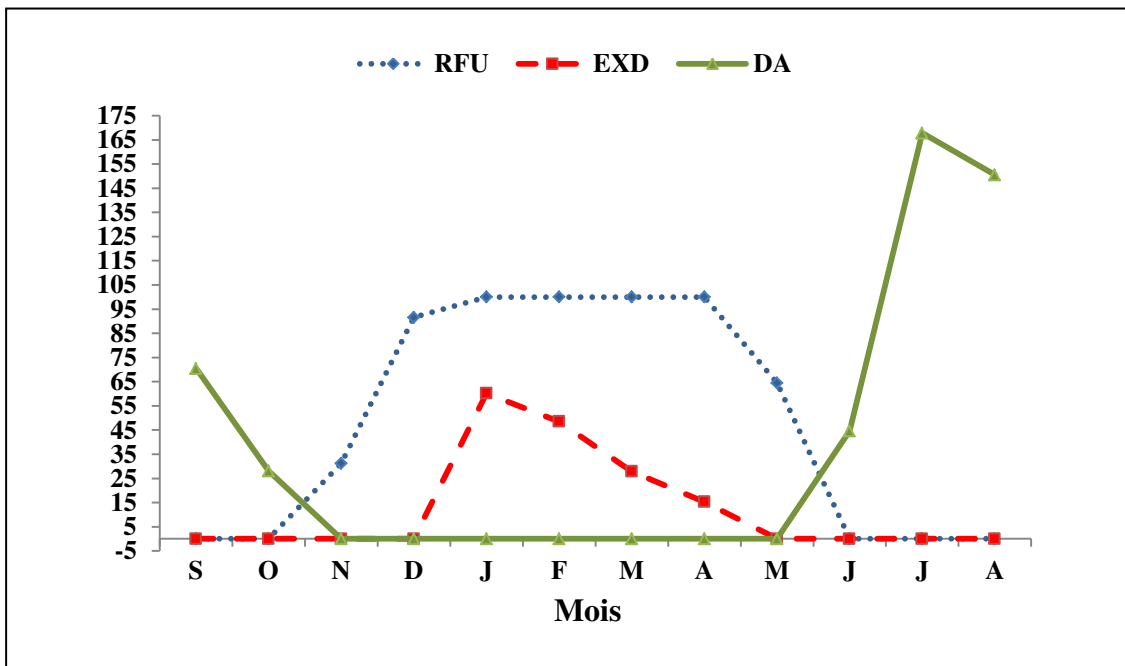


Figure. 19 : Représentation graphique du bilan hydrologique à la station de Guelma.

Formule de vérification :

$$P = \sum ETR + \sum EX ; ETP = \sum ETR + \sum DA.$$

$$P = 449.2 + 151.8 = 601 \text{ mm.}$$

$$ETP = 449.2 + 461.3 = 910.5 \text{ mm.}$$

V. Conclusion

L'analyse climatique a montré que la région de Guelma se caractérise par un climat subhumide, caractérisé par deux saisons distinctes :

- L'une sèche avec des précipitations de 19.47 mm et une température moyenne mensuelle de 25.46 °C;
- L'autre humide avec des précipitations de 65.49 mm et une température moyenne mensuelle de 13.95 °C;

Les précipitations et la température moyennes annuelles sont de l'ordre de 601.89 mm et 17.79 °C respectivement.

L'estimation des paramètres du bilan hydrologique selon la formule de Thornthwaite fait ressortir les résultats suivants:

- Le bilan est dans son ensemble déficitaire, mais il reste excédentaire du mois de janvier à avril ;
- L'évapotranspiration réelle est l'ordre de 449.2 mm/an, ce qui présente 74% des précipitations ;
- Un ruissellement de 72.36 mm soit 12% ;
- L'infiltration est de l'ordre de 80.33 mm/an soit 13% des précipitations, ce qui lui permet de jouer un rôle important dans la recharge des nappes d'eau souterraine.

Cette étude nous montre que les pluies n'assurent pas le renouvellement permanent de la réserve d'eau facilement utilisable (RFU), ce qui entraîne un besoin en eau d'irrigation des sols agricoles surtout pendant la période d'été.

I. INTRODUCTION

Dans la région de Guelma les ressources en eau disponibles deviennent de plus en plus insuffisantes à cause de l'accroissement de la demande, pour les besoins humains, industrielles et agricoles, devient de plus en plus importante. L'effet des périodes de sécheresse de plus en plus longue a aggravé cette situation qui risque de poser un problème de disponibilité de la ressource à l'avenir.

Les études hydrogéologiques réalisées ont permis l'identification de plusieurs aquifères dans la zone d'étude. Ces dernières se succèdent de manière discontinue et hétérogène.

II. LES GRANDS ENSEMBLES HYDROGEOLOGIQUE

La région de Guelma est constituée par des terrains d'âge crétacé, oligocène, mio-pliocène, éocène, paléocène et quaternaire (Louamri. A., 2013). 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 et peuvent être aquifères et constituer d'importantes ressources en eau.

Le bassin de Guelma présente plusieurs ensembles lithologiques qui impliquent des zones hydrogéologiques différentes. Au Sud, un matériel permettant une importante accumulation en eau souterraine mais fracturée (calcaire travertin) ce qui favorise l'infiltration. Sur la rive gauche de la Seybouse, on rencontre des formations pour lesquelles l'infiltration se fait très difficilement. Enfin, au centre, les alluvions quaternaires (poudingues, graviers, galets, limons,...) à forte perméabilité renferment une nappe très importante (fig. 20).

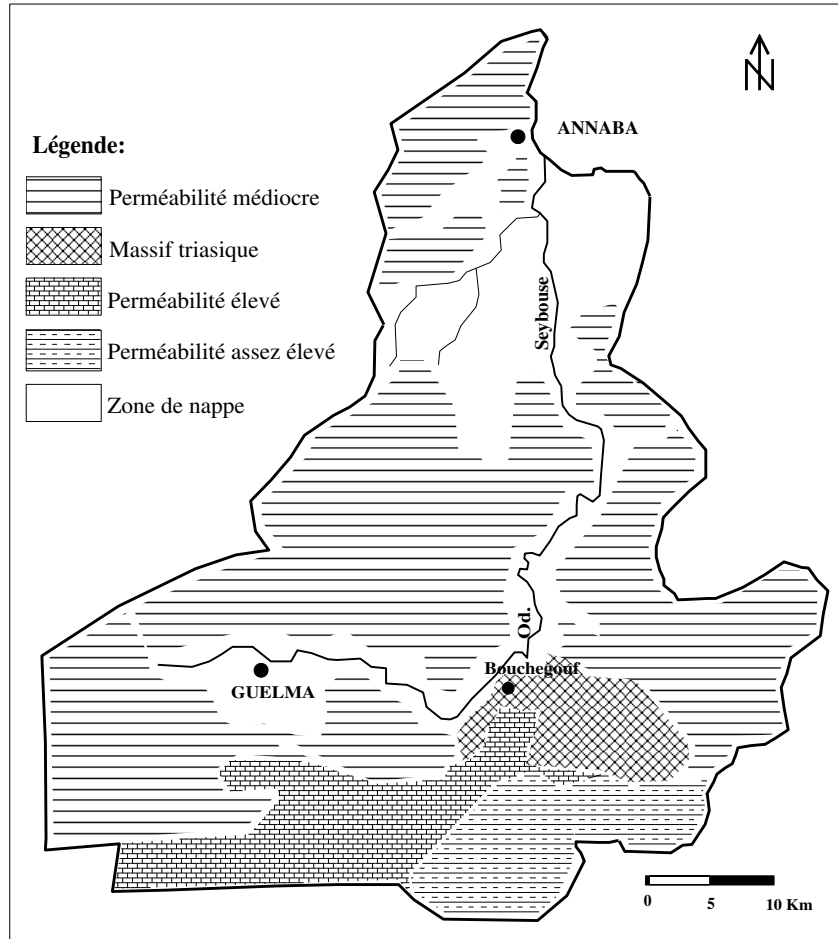


Figure. 20 : Les zones hydrogéologiques du bassin versant de la Seybouse à partir de Guelma (D'après Ghachi, 1982).

III. Géométrie de l'aquifère

Les méthodes électriques sont des méthodes classiques très utilisées en hydrogéologie. Elles se basent sur la mesure de la résistivité des formations géologiques. Les formations géologiques possèdent très souvent des résistivités spécifiques restant approximativement constantes, en tous les cas localement, alors qu'elles varient considérablement d'une formation à l'autre. Le travail du prospecteur-géophysicien consiste d'abord à diviser l'espace constitué par le sous-sol soumis à son investigation, en un certain nombre de domaines séparés par des surfaces de discontinuité. Il s'agit ensuite de préciser l'allure de ces surfaces, tout en indiquant la valeur moyenne des paramètres des milieux qu'elles limitent et finalement, le géologue remplit de matière ce cadre physique.

La plaine de Guelma a fait l'objet de deux campagnes géo-électrique :

- ✚ Etude géophysique par prospection électrique a été réalisée par la C.G.G (compagnie générale de géophysique) En 1971 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 (fig. 21).
- ✚ une deuxième campagne géophysique : Entreprise Nationale de la Géophysique (ENAGEO) pour le compte de la direction de l'hydraulique de Guelma (DHW-Guelma) « prospection électrique par SEV dans la région de Guelma », avec un total de 80 sondages suivant des profils d'orientation presque NE-SW sur la zone des terrasses anciennes de la vallée de la Seybouse.

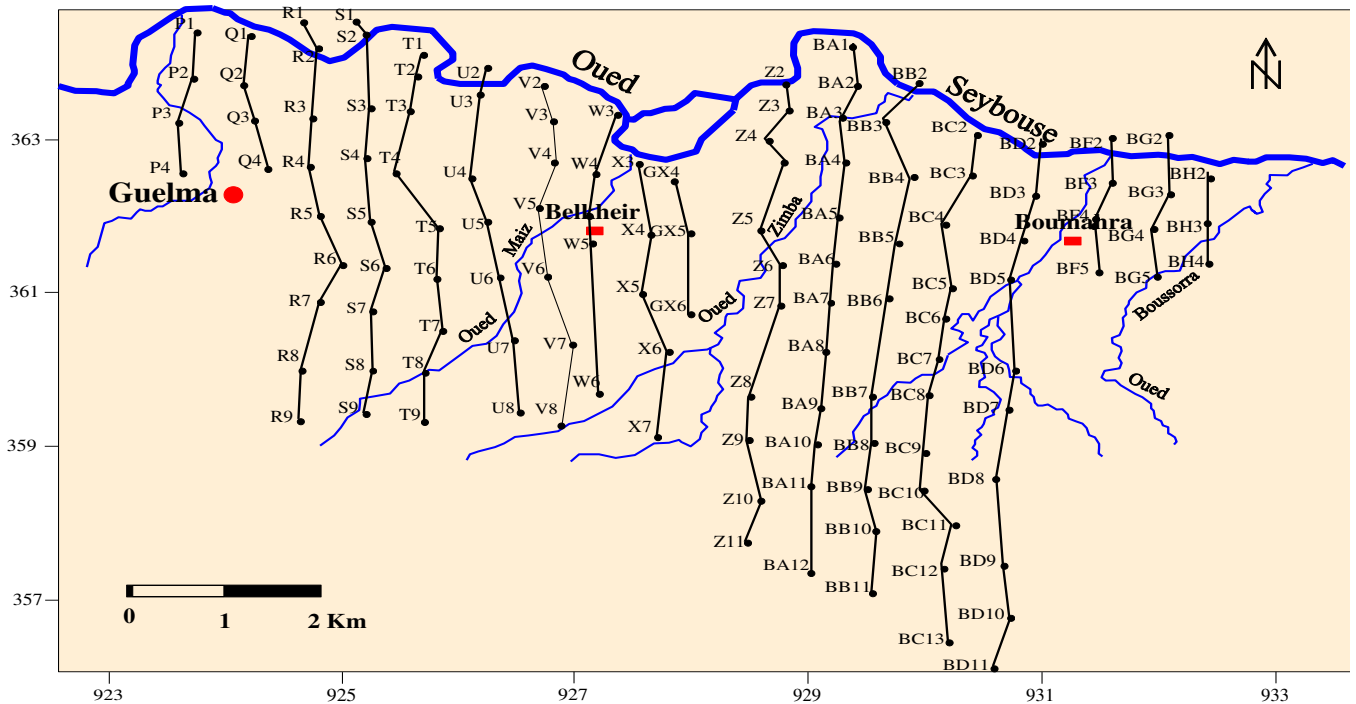


Figure. 21: Carte de position des sondages électriques de la plaine de Guelma (CGG.1971, in Kachi. N 2015)

III.1. Synthèse des correspondances résistivité-lithologie

Une corrélation entre l'échelle de résistivité et la lithologie des couches géologiques traversées par les sondages électriques, nous a permis d'identifier les formations perméables qui s'avèrent les plus intéressantes du point de vue hydrogéologique (Tab.11).

Tableau. 11 :L'échelle des résistivités est fixée selon la CGG (1971) (Nouar.T 2007)

Age	Lithologie- Résistivité
Plio-quadernaires	<ul style="list-style-type: none"> • 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 10 à 80 ohm-m
Substratum miocène	<ul style="list-style-type: none"> • Marno-calcaire de 15 à 30 ohm-m • Marno-sulfo- gypseuse de 1 à 8 ohm-m
Substratum numidien	<ul style="list-style-type: none"> • Argile de 10 à 48 ohm-m • Argile gypseuse de 15 à 30 ohm-m • Grès de 40 à 70 ohm-m

III.2. Interprétation des coupes géoélectriques

L'interprétation des résultats des coupes de sondages électriques dans la zone d'étude, nous a permis de faire une description lithologique des formations géologiques susceptibles de présenter un intérêt aquifère.

III.2.1 Basse terrasse alluvionnaire de l'Oued Seybouse (Profil GV)

D'après Le forage G3 (fig. 22).on distingue de haut vers le bas :

- Terre végétale : 0 à 1m ; $\rho = 20$ ohm-m
- Gros galets et graviers : 1 à 8m ; $\rho = 100$ ohm-m
- Marnes grises : 8 à 30m ; $\rho = 8$ ohm-m

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.

Les valeurs des résistivités indiquent des alluvions grossières aquifères $\rho = 80-100$ ohm-m; elles deviennent en général beaucoup plus argileuses en s'éloignant d'un axe passant par les S.E (S2, T2, U3, V3, et W3), ces résistivités avoisinent alors 40 à 60 ohm-m. (ABDI et al in Kachi.N 2015).

III.2.2 La moyenne terrasse (Profil GT)

Le forage E12 (fig. 22) est constitué de haut vers le bas :

- Argile et sable : 0 à 2m ; $\rho = 40$ ohm-m
- Argiles calcaire travertin : 2 à 10m ; $\rho = 8$ ohm-m
- Galets enrobés d'argile : 10 à 12m ; $\rho = 40$ ohm-m
- Argile et graviers calcaire : 12 à 20m ; $\rho = 40$ ohm-m
- Argile et marne gypseuse et graviers : 20 à 40m ; $\rho = 30$ ohm-m

La moyenne terrasse est constituée d'un matériel détritique relativement fin en alternance avec des passées argileuses d'une épaisseur de l'ordre de 40 m.

On remarque un entaillement du substratum miocène. Ce dernier affleure en plusieurs endroits séparant la haute terrasse de la basse terrasse dans la région de Belkheir (Nouar.T 2007)

III.2.3 Haute terrasse entre Guelma et Boumahra (Profil GZ)

Le forage F9 (fig. 23) présente de haut vers le bas :

- Galets : 0 à 28m ; $\rho = 100$ ohm-m
- Gravillons et argiles : 28 à 30m ; $\rho = 20$ ohm-m
- Galets avec argile : 30 à 40m ; $\rho = 80$ ohm-m
- Argiles sableux à passées calcaires : 40 à 80m ; $\rho = 110$ ohm-m

L'examen du profil révèle l'existence au niveau du plio-quadernaire d'une dépression orientée Est-Ouest limitée au Nord par un seuil miocène.

Cette dépression creusée dans le miocène a été comblée au plio-quadernaire par des dépôts localement argileux et grossiers (galets et conglomérats).

Sur le versant Nord de la dépression, prédomine un matériel essentiellement argileux et peu graveleux d'une quarantaine de mètres.

Le plio-quadernaire comporte aussi des bancs de travertins et de calcaires vacuolaires tendres, le centre de la dépression est occupé par des formations grossières peu argileuses (galets, conglomérats et calcaires) dont la résistivité est supérieur à 100 ohm-m (Forage 9).

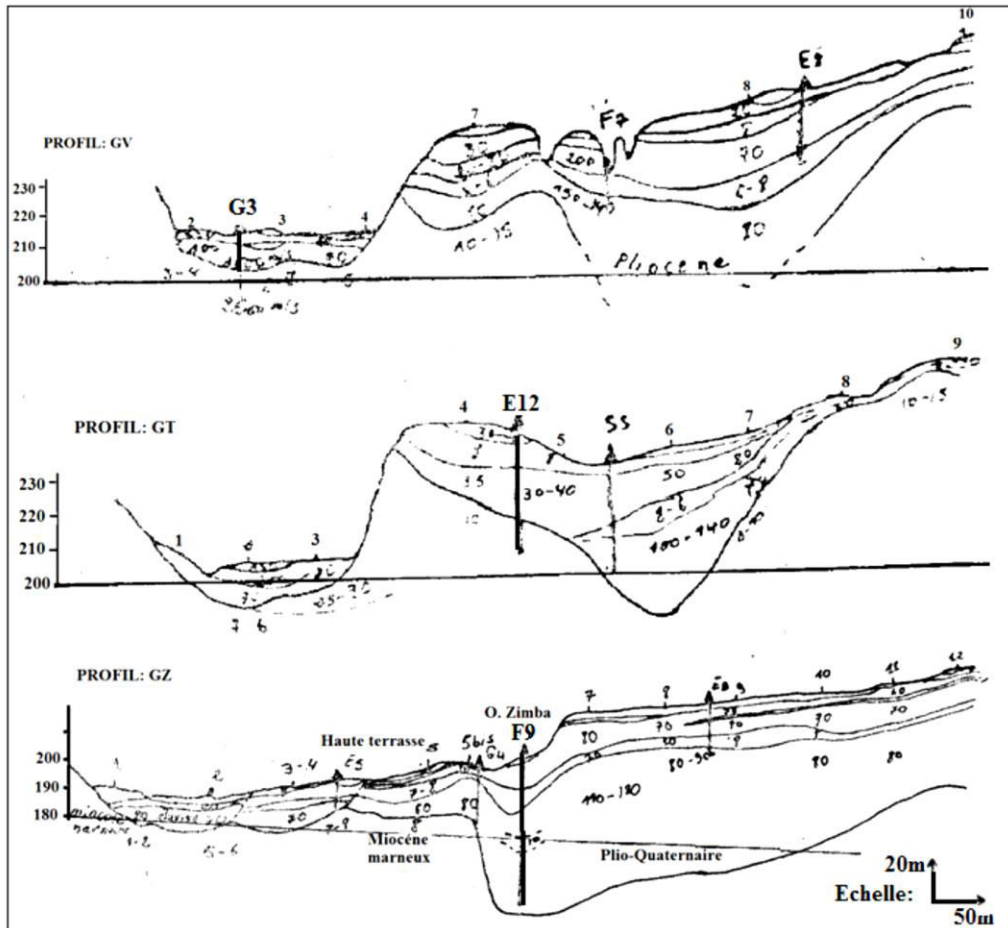


Figure. 22 : Coupes géoélectriques transversales Nord-Sud dans la plaine de Guelma (CGG.1971 in KACHIN 2015)

IV. IDENTIFICATION DES DIFFERENTS ASSEMBLAGES HYDROGEOLOGIQUES

La plaine de Guelma est constituée par deux plaines alluviales bien distinctes au niveau du bassin de la Seybouse: la plaine de la vallée actuelle et la plaine de la vallée ancienne (Débieche. 2002).

- La première appelée aussi les basses terrasses, qui présente une largeur moyenne de 1 Km et une pente de 0.25%, d'une altitude de 220 m et 120 m (Ouest, Est).
- La plaine de la vallée ancienne ou encore les hautes terrasses domine la vallée actuelle de

60 m à 100 m et qui s'étend assez largement au Sud de Belkheir et de Boumahra, d'une altitude variant entre 230 m à 280 m.

IV.1. La nappe alluvionnaire

Elle est située dans la vallée de l'Oued Seybouse en grande partie sur sa rive droite. Elle est traversée par l'oued Seybouse d'Ouest en Est, depuis Medjez Ammar jusqu'à Nador. C'est une zone d'effondrement comblée par des dépôts miocènes (argiles et marnes à gypse) et quaternaires (alluvions hétérogènes sous forme de terrasses). Ces alluvions sont perméables et sont alimentés par les eaux d'infiltration des pluies et les apports latéraux du bassin versant de l'oued Seybouse. Elle est constituée de trois terrasses distinctes (basses, moyennes, et hautes).

Trois coupes hydrogéologiques ont été dressées à partir de la combinaison des données des forages mécaniques et les résultats des interprétations des sondages électriques pour faire une description lithologique des différentes formations constituant ces aquifères (fig.23a, b et c)

IV.1.1. La vallée actuelle « basse terrasse »

Elle est formée par des graviers, des sables et de galets. Son substratum est constitué de l'extrémité Ouest jusqu'à Boumahra par des argiles et des marnes à gypse. De Boumahra jusqu'à Sidi Smir, le substratum est constitué par des argiles et des limons pliocènes, de cet endroit jusqu'à l'extrémité Est, on trouve des argiles et des grès numidiens.

A Boumahra, on trouve des poudingues pliocènes qui se rattachent aux affleurements du Djebel Zemzouma, également qu'entre Mechtet Djorf El Ahmar et Mechtet Regrid, des poudingues pliocènes se rattachent aux affleurements de Khala El Arbi.

L'épaisseur de cette nappe croît vers l'Est, elle est de 8 m au Nord de la ville de Guelma et atteint 16 m au Nord-Est de Boumahra. (Mouassa.S 2006)

La nappe de la basse terrasse est constituée de matériaux déposés dans le lit majeur du cours d'eau. Ce sont essentiellement des alluvions grossières d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 10 m reposant sur un substratum marneux à gypse (fig. 23a et 23b).

IV.1.2. La moyenne terrasse

Un aquifère dans la moyenne terrasse, constitué d'un matériel détritique relativement fin en alternance avec des passées argileuses. Le substratum est toujours marneux à gypse. On remarque que l'épaisseur est plus importante (40 m environ). (fig. 23a).

IV.1.3. La vallée ancienne « haute terrasse »

Elle est formée par un remplissage plio-quadernaire. Le matériel pliocène est constitué par des galets, de grès, quartzites, gravier et des sables (fig. 23a, 23b). La couche superficielle montre une affinité argileuse nette, tandis que les alluvions du Quaternaires sont plus grossières et moins colmatées que celles du Pliocène. Le substratum se compose essentiellement de formations miocènes à l'exception de la bordure Est, qui est constituée par des argiles numidiennes.

Toutes les formations du miocène sont imperméables, sauf pour les grès et les molasses qui sont légèrement perméables. L'épaisseur moyenne de cette nappe est de l'ordre de 100 m.

IV.2. Aquifere à milieu fissuré

Formé de roches sédimentaires dans lesquelles l'eau souterraine circule à travers des fissures, des joints ou des fractures dans une roche par ailleurs solide.

IV.2.1. Aquifère des calcaires travertineux

Au Sud ces calcaires travertineux du Pliocène sont en contact direct avec les alluvions des hautes terrasses qui les alimentent en partie, avec une altitude de 250 m. C'est un faciès variable: tufs vacuolaires ou spongieux, calcaires blancs crayeux fissurés avec de nombreuses recristallisations de calcite. Cette aquifère donne lieu à un certain nombre de sources liées à des zones fracturées des calcaires, dont un bon nombre émergent à la surface et qui sont drainées par les petits Oueds. La coupe transversale W-E (fig. 23c), met en évidence le contact direct entre les calcaires travertins à l'Ouest de la ville de Guelma et les alluvions de l'ancienne terrasse.

Les formations du Pliocène en profondeur, lentilles d'argile et les alluvions Quaternaires fins, en couverture se poursuit d'Est en Ouest, jusqu'à l'arrivée aux travertins, ce qui confirme la continuité du faciès dans toute la plaine. (Zeddouri A., 2003).

****Interpretation des coupes hydrogéologiques :***

La coupe n° 1: (fig. 23a), cette coupe est localisée à l'Ouest de la ville de Belkheir d'orientation Nord – Sud. On y distingue du Nord au Sud la présence de quatre nappes aquifères différentes ;

- 1) – Au Nord, c'est la nappe des basses terrasses ;
- 2) – La moyenne terrasse ;
- 3) – La haute terrasse ;
- 4) – La partie Sud est occupée par les calcaires travertineux

La coupe n° 2 (fig. 23b), localisée à l'Est de la ville de Belkheir, d'orientation Nord-Sud montre la liaison entre la basse terrasse et la nappe de la haute terrasse qui se fait par la moyenne terrasse. On y observe presque les mêmes ensembles aquifères qui se prolongent vers le Sud.

Cependant on peut faire les remarques suivantes:

- 1) - Les alluvions grossières (cailloutis, sable) qui forment les basses terrasses sont plus épaisses (15 m environ).
- 2) - Les moyennes terrasses sont formées de sables fins d'une épaisseur de 25 à 35 m, mais cette fois-ci on remarque la présence d'un horizon argileux d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 8 m qui s'intercale dans les alluvions.
- 3) - Les hautes terrasses sont plus importantes 100 m d'épaisseur en moyenne (elles atteignent 110 m au piézomètre. Cette couche est formée de dépôts plio-quatérnaires grossiers. Il s'agit de cailloutis et de graviers avec des petites lentilles d'argile de faible épaisseur.
- 4) - Le substratum est toujours Miocène marneux et présente un sous-bassement au centre de la plaine (c'est l'ancien lit probable de la Seybouse).
- 5) - Les calcaires travertineux sont absents et reculent au Sud de la plaine vers les monts de Mahouna. (Mouchara.N 2009)

La coupe n° 3 (fig. 23C),

D'orientation W - E, cette coupe transversale, met en évidence le contact direct entre les travertins à l'Ouest de la ville de Guelma et les alluvions de l'ancienne terrasse.

La succession des matériaux Pliocène en profondeur, lentilles d'argile et les alluvions Quaternaires fins, en couverture se poursuit d'Est en Ouest, jusqu'à l'arrivée aux travertins, ce qui confirme la continuité du faciès dans toute la plaine.

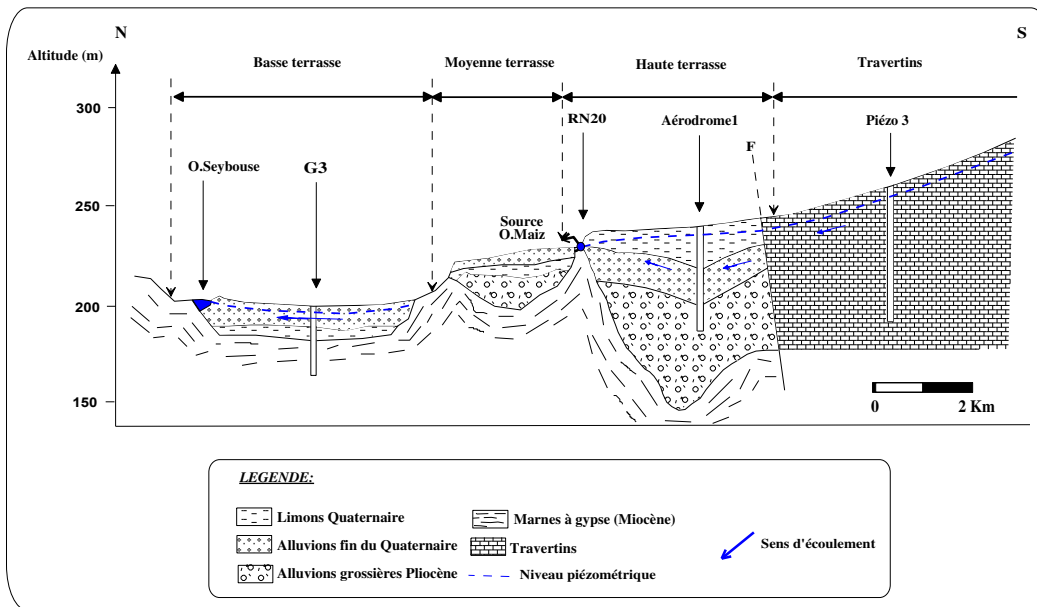


Figure. 23a : Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma, montrant la présence des aquifères (alluvionnaire et fissuré) et la relation alluvions-travertins (B.Gaud, 1974)

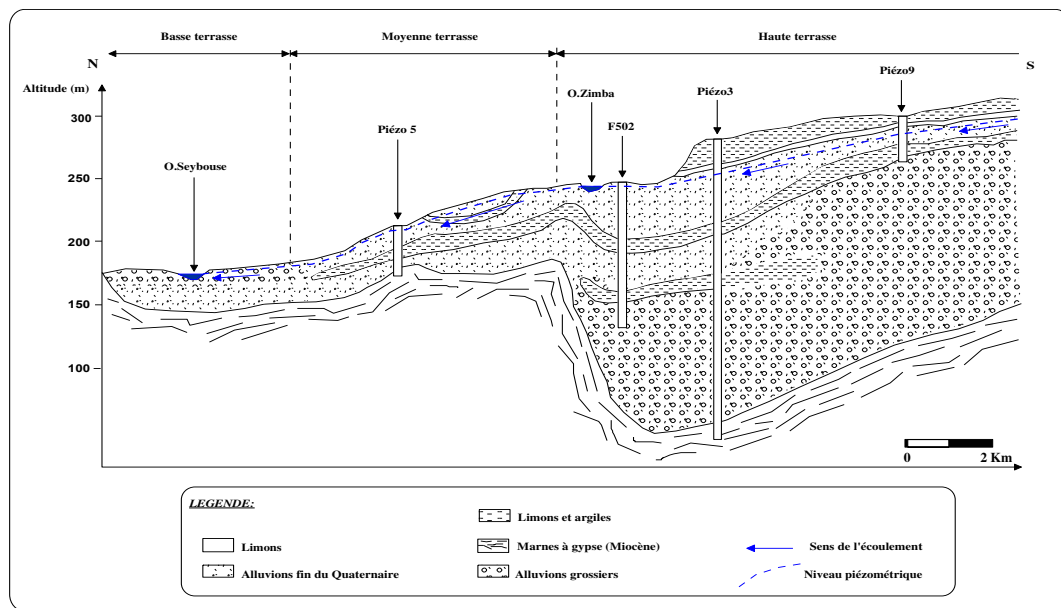


Figure. 23b : Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma, (B.Gaud, 1974).

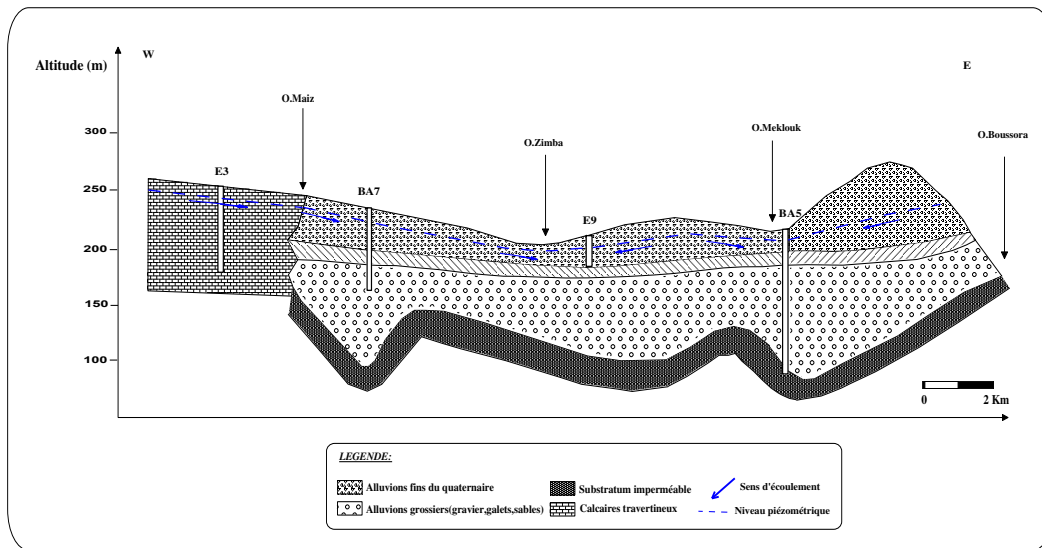


Figure. 23c. Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma, (B.Gaud, 1974).

IV.3. PIEZOMETRIE

Les eaux souterraines sont le moyen de transport de toute substance minérale ou organique. C'est d'après le sens d'écoulement qu'on peut situer les zones vulnérables à la pollution et celles susceptibles de contaminer. Dans le but de connaître la morphologie souterraine et de vérifier les conditions aux limites hydrodynamiques de la nappe alluviale de la région d'étude.

Nous avons établi une carte piézométrique relative à la période de haute eaux durant le mois de décembre 2013 (fig. 24) sur la rive droite de l'Oued Seybouse, nous a permis de faire quelques observations sur l'écoulement des eaux souterraines, l'alimentation de la nappe et l'évolution de la surface piézométrique dans l'espace :

- ✚ L'écoulement se fait généralement du Sud vers le Nord, c'est-à-dire de la nappe vers l'Oued Seybouse.
- ✚ L'aquifère des travertins présente le même sens d'écoulement que l'aquifère des hautes terrasses et alimente en partie ce dernier.
- ✚ L'allure des courbes piézométriques est parallèle à la bordure sud, traduisant une limite perméable, par contre les lignes piézométriques sont perpendiculaires à la limite sud-est, ce qui indique qu'elle est étanche.
- ✚ On remarque ainsi, l'existence de trois axes de drainage d'orientation générale Sud-Nord matérialisés le long des trois affluents de l'oued Seybouse: (O. Boussora et O.Meklouka à

l'Est, O. Zimba au centre et O. Maiz à l'Ouest). Cette disposition fait ressortir trois lignes principales de partage des eaux dans l'aquifère. La première, située entre oued Bossora et Chaabet Meklouka, la deuxième située entre oued Zimba et oued Maiz et la troisième située à l'Ouest de oued Skhoun.

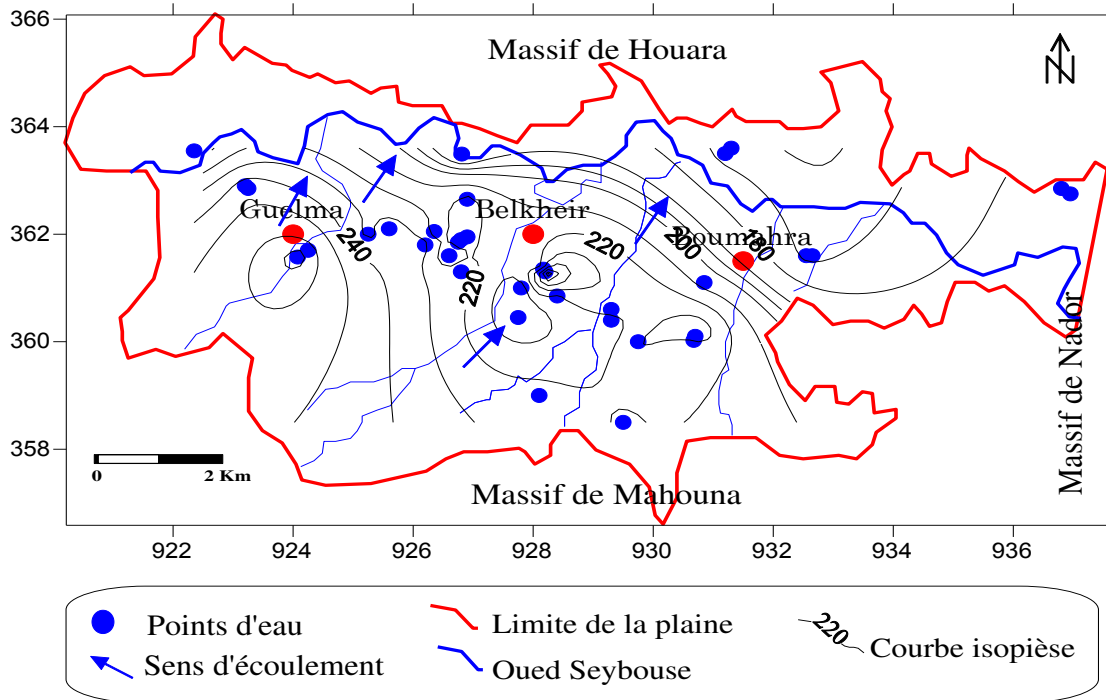


Figure. 24: Carte piézométrique de la zone d'étude (décembre, 2013)

IV.4. Conditions aux limites

IV.4.1.Limites externes

- Limites étanches à flux nul : les bordures Est et Sud-Est vers lesquelles se dirigent les écoulements souterrains ce sont les contacts entre les terrains aquifères et les marnes à gypse du Miocène avec les argiles numidiennes

- Limites de contact du côté Sud-Est avec la molasse et grès 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 : Ce sont les bordures Sud et Sud-Ouest de la plaine de Guelma, formées essentiellement par des calcaires travertins fracturés d'âge Pliocène. Les fortes variations de niveau dans les ouvrages situés à proximité des affleurements indiquent leur rôle de zone d'alimentation.

IV.4.2. Sous limites internes

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

-Déversement de la nappe de la 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.

IV.5. Caractéristiques hydrodynamique

IV.5.1. La carte de transmissivité

Les valeurs des transmissivités (fig. 25) sont assez homogènes. On note de fortes valeurs au Nord de l'axe Belkheir-Boumahra de l'ordre de $3.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; elles diminuent d'Ouest en Est et du Nord au Sud pour descendre jusqu'à $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette décroissance est liée sans doute à la granulométrie des alluvions et à la trame argileuse.

Dans la partie nord elles dépassent les $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, ce qui justifie la présence d'un nombre important de puits et forages dans cette zone qui captent les alluvions grossiers (galets et graviers) dépourvues de la matrice argileuse.

Les fortes valeurs sont enregistrées au Sud de Guelma dans la haute terrasse entre Oued Skhoun et Oued Maïz, de l'ordre de $3.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, mais entre Belkheir et Boumahra on note une décroissance des valeurs de transmissivité qui sont de l'ordre de $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, avec pas mal de forages qui sont implantés au niveau de cette zone. Cela est influencé par la trame argileuse et les épaisseurs mouillées importantes dans la partie sud.

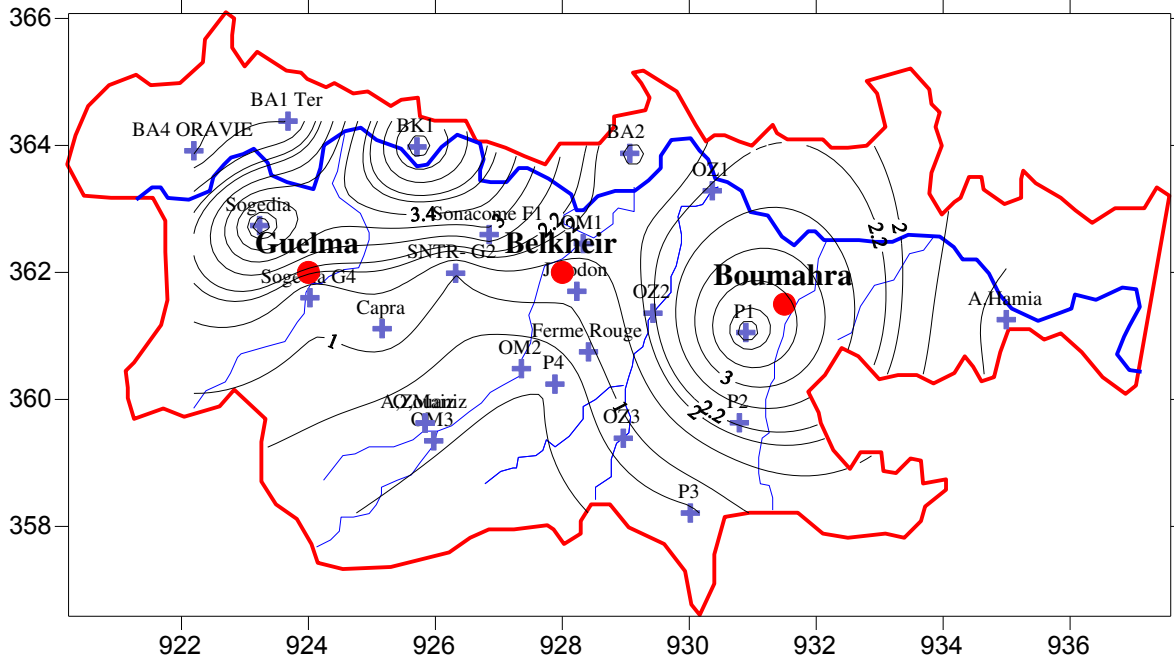


Figure. 25: Carte de transmissivité de la nappe alluviale de Guelma

V. Conclusion

La synthèse des données géophysiques, hydrogéologiques en corrélation avec la géologie et les logs stratigraphiques des forages de la plaine de Guelma a permis de conclure ce qui suit : L'aquifère alluvionnaire de Guelma d'âge mio-plio-quaternaire est un bassin d'effondrement constitué de terrasses ; haute, moyenne et basse, disposées en gradins essentiellement sur la rive droite de l'Oued Seybouse. Les terrasses sont constituées d'alluvions qui recèlent des potentialités hydriques importantes. Elles sont alimentées en partie par l'aquifère des travertins situé à l'amont. L'aquifère est drainé par l'Oued Seybouse, qui sillonne le bassin d'Ouest en Est D'après la carte piézométrique établie, l'oued Seybouse draine la nappe, où l'écoulement se fait généralement du sud vers le nord. A l'ouest, la nappe des hautes terrasses se fait alimentée latéralement par les travertins. La nappe des hautes terrasses, alimente la nappe des basses terrasses, suivant un axe de drainage d'orientation sud ouest-nord est. La transmissivité est importante, au niveau de la nappe des basses terrasses, où les plus fortes valeurs sont observées au voisinage du lit actuel de l'oued Seybouse, où les alluvions deviennent plus grossières dépourvues de la matrice argileuse.

Le fait que la nappe alluviale est en relation hydrodynamique avec l'Oued et est composée de formations alluvionnaires laissent à penser qu'il y a risque de pollution des eaux souterraines, c'est pour cette raison qu'une étude de la vulnérabilité de la nappe alluvionnaire de Guelma est nécessaire pour évaluer la menace d'une contamination éventuelle afin d'assurer une protection durable des eaux souterraine de la plaine de Guelma.

I. INTRODUCTION

Par définition, l'eau est un liquide naturel qui se forme par condensation en altitude, puis elle acquiert son chimisme au cours de son trajet, par dissolution des gaz et absorption des composés solubles et insolubles présents dans l'air. Au sol, elle traverse les formations géologiques perméables, ce qui augmente sa minéralisation par lessivages des roches.

L'objectif principal dans cette partie de l'étude est de caractériser le chimisme des eaux souterraines de la plaine de Guelma et l'évolution de leur qualité dans l'espace et dans le temps.

Dans le même contexte, nous essayerons de présenter les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines et de surfaces en se basant sur des données réalisées en période de basses et hautes eaux de l'année 2015 et de montrer l'impact des activités anthropiques au sein du périmètre irrigué de Guelma.

II. MATERIELS ET MOYENS D'ANALYSE

Les analyses sont portées essentiellement sur les éléments chimiques majeurs. Les méthodes employées sont le dosage colorimétrique (NO_3^- , NO_2^- , et NH_4^+) et nuphélométrique, après précipitation du chlorure de baryum pour (SO_4). La spectrophotométrie d'absorption atomique (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , SiO_2 , Cl^- , Sr^+ , Zn , Pb). Les caractéristiques physiques, tels que la température, le PH., la conductivité ont été mesurées à l'aide d'une sonde multi paramètres WTW.

III. POLLUTION DES EAUX

La pollution des eaux, provoquée par l'homme et ses activités, est une dégradation physique, chimique et biologique de leurs qualités naturelle. Elle modifie parfois considérablement la composition physico-chimique des eaux de surface (cours d'eau), ces dernières sont le vecteur principal de transport de ces substances dans les nappes souterraines. Elle change les conditions de vie de la flore et de la faune aquatiques, et crée un déséquilibre dans le milieu aquatique.

III.1. Les principaux types et origines de pollutions dans la zone d'étude

La pollution des eaux superficielles et souterraines peut avoir diverses origines. Selon les activités des différents secteurs, elle peut être d'origine domestique, industrielle ou agricole. Dans la zone d'étude le diagnostic a été établi après enquête et inspection des lieux.

III.1.1. Origine domestique

Cette dernière constitue une source de pollution importante, en effet toutes les agglomérations situées le long du cours d'eaux déversent leurs eaux usées dans l'Oued Seybouse

ou ses affluents sans traitement préalable sauf pour la ville de Guelma où on a une station d'épuration récemment mise en service.

Dans le cas d'assainissement, collectif ou individuel défectueux ou en contact hydraulique avec les nappes, les substances indésirables contenues dans les eaux de vannes et les eaux ménagères (matières organiques, solvants, détergents micro-organismes, anti-biotiques...), peuvent être transférées dans la nappe.

Dans la zone d'étude, les eaux usées des agglomérations déversent dans les affluents des principaux cours d'eau. En effet l'oued Skhoune, l'oued Maïz, l'oued Zimba, chaabat Maamoura, oued Boussora et oued Helia et d'autres affluents drainant des volumes importants des eaux usées des principales agglomérations tels que: Guelma, Héliopolis, Oued Zenati, Bouchegouf, Belkheir et Boumahra. Ces oueds traversent la nappe alluvionnaire avant d'atteindre l'oued Seybouse via ses affluents (Mouchara N. 2009).

Dans le tableau (tab.12), les valeurs des différents paramètres des rejets d'eau usée témoignent du degré de pollution qui pourra transiter dans la nappe.

Les trois décharges publiques existant sur les deux rives de l'oued Seybouse contribuent aussi à cette pollution par leur lessivat. La première au Nord de Guelaât Bou Sbâa, la deuxième à l'Est d'Héliopolis et qui revêt le caractère d'un C.E.T classe II (Centre d'Enfouissement Technique) compte tenu de la quantité et de la diversité des polluants reçus quotidiennement et la troisième à Djebel Hallouf au Sud de la ville de Guelma et à l'amont de l'ancienne terrasse de la nappe alluvionnaire sans citer un certain nombre de décharge sauvage dispersés à différents endroits de la zone d'étude.

Tableau. 12: Les caractéristiques des eaux usées domestique dans la wilaya de Guelma (Juillet 1997). (MOUCHARA Nabil, 2009)

Paramètres	Valeurs Moyennes	
	Oued Skhouné	Oued Maïz
Débit Q (l/s)	0,45	0,87
T° C	28,7	27,50
pH	7,30	7,30
Mat. organique (mg/l)	58,75	46,00
DBO ₅	114	150
MES (mg/l)	56,66	17,90
Fer (Fe) mg/l	0,15	0,21
Chrome (Cr) mg/l	0,15	0,05
Nickel (Ni) mg/l	Traces	0,05
Plomb (Pb) mg/l	0,80	-
Zinc (Zn) mg/l	Traces	0,10

III.1.2.Origine Industrielle

La deuxième source de pollution des eaux de surface provient des eaux résiduaires industrielles. Ces rejets sont spécifiques à l'industrie et donc très variables d'une activité industrielle à l'autre. Les installations classées dans la wilaya de Guelma, recensées par l'Inspection de l'Environnement pour l'année 2014, sont présentées dans le tableau (tab.13), après une enquête faite auprès des services de l'assainissement, l'endroit de déversement (affluent) pour chaque installation classée a été identifié, car cette information nous sera d'une grande utilité pour interpréter les teneurs des différents polluants dans les eaux d'irrigation, et dans les eaux des affluents de l'oued Seybouse, qui sont les milieux récepteurs des rejets liquides. (Mouchara N., 2009).

Les polluants d'origine industrielle sont très variés selon le type d'activité, ils peuvent correspondre à des substances organiques, sels minéraux, des métaux lourds et des produits organiques de synthèse.

Les zones industrielles, au nombre de trois, sont situées respectivement à l'amont de l'oued Zimba (Zone d'alimentation de la nappe alluvionnaire), sur la rive gauche de l'oued Maïz (cité des Frères Rahabi) et au sud d'El Fedjoudj sur la rive gauche de l'oued Seybouse.

Tableau. 13: Actualisation des installations classées de la ville de Guelma et les milieux récepteurs de leurs rejets (Direction de l'Environnement Guelma, 2014).

Nature d'activité	Nombre	Milieu récepteur	Caractéristiques du rejet
Production cycles et motocycles	01	Réseau d'assainissement	Ni, Cr, Fe
Production de porcelaine	01	Réseau d'assainissement	Teneur élevée en MES, Pb et Cd.
Production de limonade	10	Réseau d'assainissement	Alcalinité élevée, teneur en MES, détergents, DBO
Raffinage de l'huile d'olives	14	Chaabet Oued Sfa Oued Bouaati M Oued Seybouse Réseau d'assainissement	Huiles et graisses végétales
Production de carrelage- Sciage et polissage de marbre	06 01	Oued Maiz Oued Seybouse Caabet Maamora Oued Boussora	Teneur élevée en MES, ciments blancs
Raffinage du sucre	01	Réseau d'assainissement	Teneur élevée en matières organiques, teneur élevée en MES.
Minuteries	04	Réseau d'assainissement	
Production d'eau de javel	01	Réseau d'assainissement	Chlorure
Carburant et station de lavage et graissage	42	Réseau d'assainissement Milieu naturel Chaabet ain Ibrahim	Graisse, Pb
Briquetteriez	1	Milieu naturel	
Production de la tomate Conserve	03	Oued Bouaati M Oued Seybouse Chaabet	Teneur élevée en MES, matières organiques dissoutes, pH parfois alcalin.
Abattage de volaille Abattage d'animaux	04 01	Réseau d'assainissement Milieu naturel	
Oravie	05	Milieu naturel	Forte concentration en matières organiques, germes pathogènes
Laiterie	01	Oued Seybouse	Forte concentration en matières organiques dissoutes
Moulin	03	Oued Seybouse Oued Zimba	Teneur élevée en MES

Les stations de lavage et de carburants au nombre de quinze (15), concentrées sur l'axe de H. Debagh-Guelma-Belkheir-Boumahra.A-Bouchegouf, déversent dans les affluents de l'Oued Seybouse (O.Skhoune, O.Maiz, O.Zimba, O.Boussora) (tab. 14).

Au delà, nous pouvons constater que la nappe alluviale est largement exposée à des pollutions de diverses origines et natures.

La mise en service des deux stations de relevage situées sur les Oueds Skhoune et Maïz retranchera éventuellement une grande partie des pollutions acheminées par ces cours d'eau vers l'oued Seybouse et donc vers la nappe alluviale. Néanmoins, les rejets de la zone industrielle située à l'amont de l'oued Zimba et les lexiviats provenant de la décharge publique de Djebel Hallouf, située à l'amont de l'oued Maïz, et le centre d'enfouissement technique d'Ain Gueguour, situé près de Héliopolis sur la rive gauche de l'Oued Seybouse, continuent de polluer la haute terrasse de la nappe alluvionnaire.

Tableau. 14: La répartition des stations de lavage et de vidange des véhicules à travers la région.

Région	Hammam Debagh	EL Fedjoudj	Héliopolis	Guelma	Belkheir	Boumahra A	Boucheougouf
Station lavage et vidange	1	1	2	7	2	1	1

III.1.3. Origine agricole

Les pratiques actuelles des cultures et de l'élevage influencent fortement le régime et la qualité des eaux. L'utilisation massive des engrais et des produits chimiques de traitement des plantes détruit la vie dans les rivières et rend impropre à la consommation humaine et animale les eaux superficielles et souterraines. Le transfert des engrais et pesticides vers la nappe se fait soit par infiltration sur l'ensemble de la surface cultivée, soit par rejet dans les puits perdus et gouffres. Une enquête auprès des fermes pilotes, a permis d'identifier et quantifier les types d'engrais à base d'azote utilisés à raison de 1,5 q / ha.

Les élevages intensifs de bovins (étables, fermes pilotes) et volailles (poulaillers), produisent une grande quantité de déjections azotées, qui peuvent être aussi à l'origine de la pollution des eaux de surfaces et souterraines.

Par ailleurs, les analyses physico-chimiques des eaux souterraines dans la région de Guelma ont montré des teneurs en nitrate élevées et qui ne peuvent être que d'origine agricole, compte tenu de la nature et des quantités des fertilisants utilisés (tab. 15) au niveau du périmètre d'irrigation Guelma- Boucheougouf, qui couvre une superficie totale de 12000 ha, peuvent s'infiltrer dans la nappe superficielle ou être drainé vers l'oued Seybouse via ses affluents.

Tableau. 15 : Types et quantités de fertilisants utilisés au niveau de la nappe alluvionnaire de Guelma (2005 / 2006). (KACHIN, 2015)

Espèces	Objectifs	T.S.P 46%	Urée 46%	N.P.K 15.15.15
Blé dur	300 ha	450 qx	450 qx	-
Blé tendre	50 ha	75 qx	75 qx	-
Orge	100 ha	100 qx	100 qx	-
Avoine	20 ha	20 qx	20 qx	32 qx
Fève	16 ha	-	-	30 qx

Source : Service agricole de la commune

- **Les engrais les plus utilisés dans la zone région**

L'utilisation des engrais (en plus de la lutte contre les adventices) est sûrement la technique qui contribue le plus à l'augmentation des rendements des différentes cultures. Comme l'azote (N) est un élément essentiel à la croissance et au bon développement de la plupart des plantes, une enquête a été menée auprès des points de vente au niveau de la wilaya de Guelma afin de quantifier les types d'engrais à base d'azote les plus sollicités par les agriculteurs (Tab.16).

- **N.P.K. (15.15.15)**, est un engrais ternaire qui, contient 15% de N, 15% de P et 15% de K.

Polyvalent, il est utilisé comme engrais de fond au moment du semis, sur des sols non salins disposant d'une capacité de ressuyage.

- **L'urée (46% d'azote)**, engrais azoté de couverture, l'urée est l'engrais sec le plus riche en azote et il est complètement soluble dans l'eau. Il est sous forme organique nécessitant une transformation avant son assimilation par la plante. La minéralisation de l'urée s'effectue en présence d'humidité, chaleur et micro-organismes du sol. Son application est recommandée avant une pluie et il doit être enfoui afin d'éviter d'éventuelles pertes par volatilisation. Il est destiné pour toutes les cultures.

- **Nitrate d'Ammonium (UAN) 32%** d'azote, engrais polyvalent liquide, à diluer dans l'eau entre 5 et 10% selon le stade végétatif (Fertial, 2010).

- **Le Super Phosphate Triple (TSP, 46% de P₂O₅)**, engrais phosphaté de fond utilisé avant le semis des cultures. Contient également des oligo-éléments : Bore (61 ppm), fer (3638 ppm), manganèse (114 ppm), zinc (170 ppm) et le cuivre (05 ppm). Un engrais utilisé à grande échelle dans notre pays, alors qu'il est totalement déconseillé pour le sol alcalin.

D'une façon générale, l'engrais azoté reste le plus utilisé dans la zone d'étude, probablement de par son effet instantané et remarquable sur les cultures de céréales et son impact sur la culture est visible.

Tableau. 16 : Principaux engrais utilisés dans le périmètre Guelma-Boumahra

Type d'Engrais	Nom commercial	Composition	Caractéristiques	Type de cultures
L'Azoté phosphaté potassique	N.P.K :15.15.15	- 15% de N - 15% de P2O5 - 15% de K2O	Engrais d'entretien.	Pomme de terre et tomate industrielle
Urée	Urée 46%	CO (NH2)2 46% de N	Engrais d'entretien A enfouir. Pour la croissance végétative (tiges et feuilles). Très soluble.	Céréaliculture, cultures maraichères, l'arboriculture, viticulture, légumes secs.
Nitrate d'ammonium	U.A.N	NH4NO3 : -Azote total : 32% - Azote ammoniacal: 7% -Azote nitrique : 7,8% -Azote uréique : 16,4%	Engrais d'entretien. Action à la fois immédiate (NO3) et retardée (NH4). Très soluble dans l'eau.	Céréaliculture, pomme de terre, tomate industrielle, l'arboriculture.
Engrais phosphatés Triple Super Phosphate	T.S.P	Ca(H2PO4)2, H2O - 46% P2O5 - 0% de N - 0% de K2O - 15% de CaO	Engrais de fond. (favorise la croissance des racines). Assez soluble dans l'eau	Céréaliculture

IV. CARTOGRAPHIE HYDROCHIMIQUE

L'outil cartographique, même dans l'aspect qualitatif des eaux, reste un outil très appréciable, dans la vision de l'évolution spatiale d'un constituant chimique quelconque, ou d'un polluant.

Pour les périodes d'observation nous avons tracé les cartes des éléments qui paraissent les plus inquiétants du point de vue pollution.

Nous nous sommes basés sur les données disponibles de 18 échantillons (forages, puits et sources) et de 6 stations pour les eaux de surfaces des Oueds Zimba et Maiz pendant les deux périodes d'observation (Avril et Aout 2015).

IV.1. EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACES

IV.1.1. Variation des paramètres mesurés in situ

IV.1.1.1 La température

La température de l'eau dépend des échanges thermiques avec l'air ambiant et du rayonnement solaire. La température influence des paramètres comme (l'oxygénation, la conductivité, la solubilité de différentes substances, ...etc.). La température joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne et de l'évaporation des eaux. Elle varie en fonction de la température extérieure (l'air), des saisons, de la nature géologique et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol.

Concernent les températures de la période des hautes et basses eaux. Les valeurs de la température observées sont résumées dans le tableau ci-après (Tab.17).

Durant la période des hautes eaux, la température moyenne est égale à 17,42°C qui reste inférieure à la norme (< 25°C) et voisine de la température moyenne annuelle de la région (17,79°C). Par contre pendant la période des basses eaux, la température moyenne des eaux souterraines (forages, puits et sources) est de l'ordre de 19,02°C et varie entre un minimum de 15,69°C observé au forage CAPRA et un maximum de 24,07°C enregistré à la source Ain Zouaniz (fig.26a et b).

La température moyenne des eaux de surfaces en période hivernale est de l'ordre de 14,11 °C à Oued Zimba et de 13,35 °C à Oued Maiz. En période d'été, elle atteint la valeur de 18,38°C et 18,67 °C respectivement.

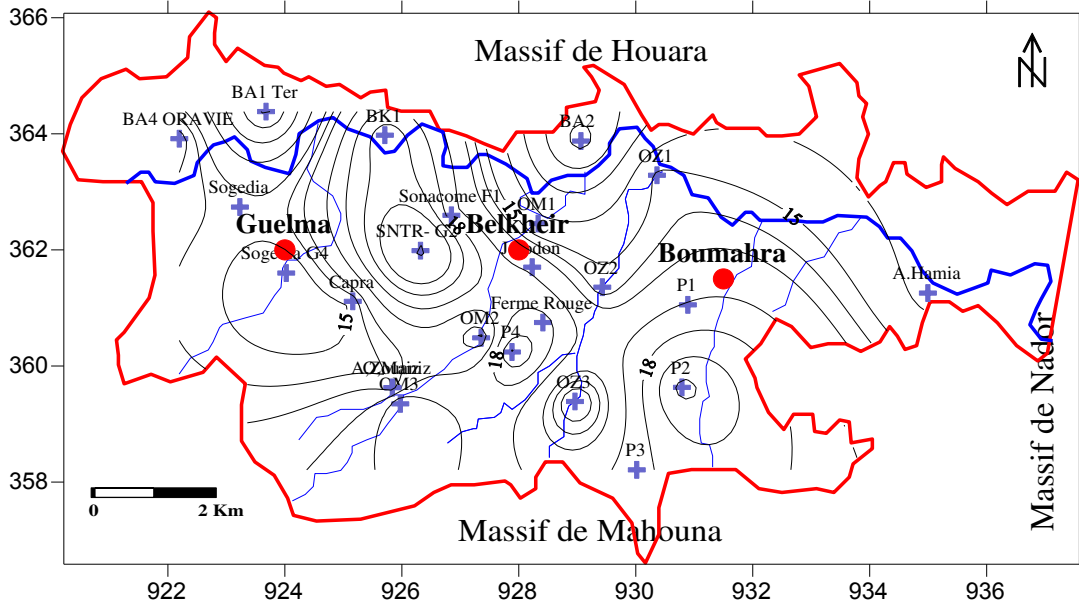


Figure 26 a : Température des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (Hautes eaux, Avril 2015)

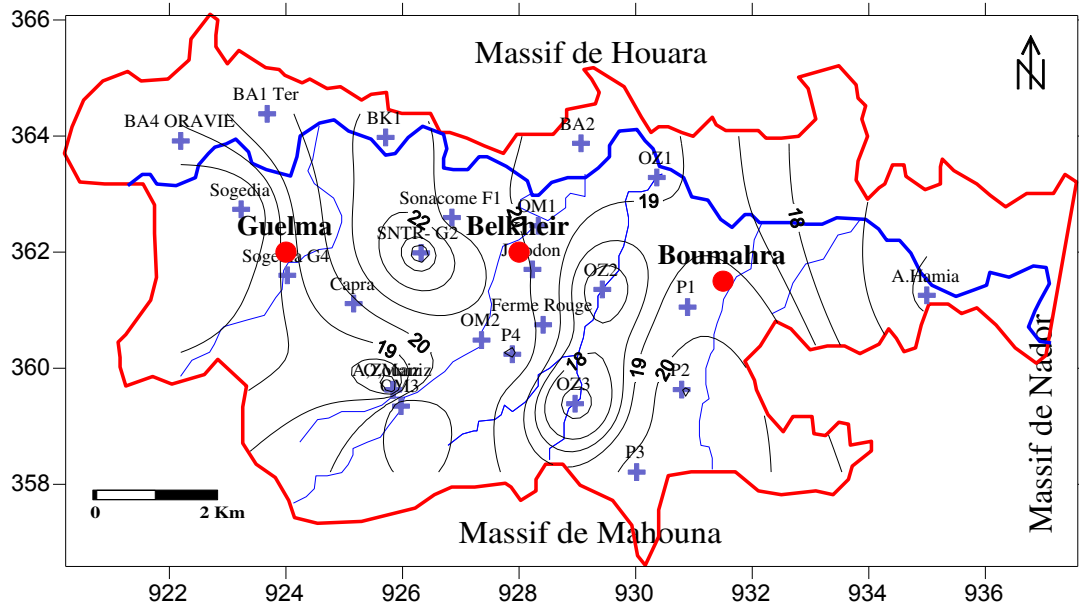


Figure 26 b : Température des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015)

Tableau 17: Variation de la température des eaux souterraines et de surfaces dans le bassin de Guelma

Points d'eau		Eaux souterraines						Eaux de surfaces			
		Forages		Puits		Sources		Oued Maiz		Oued Zimba	
Périodes d'échant. Paramètres statistiques	Min.	15,69	13,61	18,6	16,81	19,35	17,36	17,55	10,55	17,16	10,71
	Max.	22,13	20,38	21,2	20,22	24,07	23,61	19,82	15,12	19,65	16,38
	Moy.	18,07	16,33	19,63	18,26	21,65	20,27	18,67	13,35	18,38	14,11
	Normes	< 25 °C									

IV.1.1.2 Le pH

Le pH est un facteur dépendant des conditions naturelles du milieu, telles la couverture végétale et la nature des roches et du substrat pédologique et des activités humaines telles la pollution (A. Reggam.2015). C est un indicateur de l'alcalinité et de l'acidité des eaux. Le pH est le cologarithme de (H+) et correspond à la concentration $[H^+] = [OH^-]=10^{-7}$. Cependant, certains auteurs ont de bonnes raisons de penser que, H⁺ étant une particule subatomique, un proton ne peut exister à l'état libre. Il faudrait remplacer la notion d'ion H⁺ par celle d'ion H₃O⁺, l'hydroxynium ou hydronium (H. Schoeller 1962).

Les eaux souterraines montrent un pH moyen de 8,49 pendant la période des hautes eaux, et un pH tend vers l'alcalinité avec une valeur moyenne de 8,53 en période de basses eaux, dépassant légèrement les normes requises (6,5 à 8,5- tab.19). D'après la figure 28a les eaux sont neutres au centre de la plaine et deviennent alcalines aux bordures surtout en période sèche. Ceci est dû à la nature géologique des terrains traversés qui sont essentiellement constituées de roches sédimentaires à composante carbonatée importante (Kachi.N 2015).

Pendant la période de basses eaux, les eaux de surface présente un pH variant de 8,67 à 8,38 pour Oued Maiz et Oued Zimba et deviennent très alcalins en période humide avec des valeurs égales à 11,38 et 11,31 respectivement (fig.27b).

Tableau 18. Variation du pH des eaux souterraines et de surfaces dans le bassin de Guelma

Points d'eau		Eaux souterraines						Eaux de surfaces			
		Forages		Puits		Sources		Oued Maiz		Oued Zimba	
Périodes d'échant. Paramètres statistiques	Min.	7,25	7,14	7,5	7,08	8,04	7,25	7,65	10,82	7,16	10,67
	Max.	9,25	9,60	9,58	9,5	9,54	8,52	9,55	12,05	6,65	11,34
	Moy.	8,17	8,61	8,42	8,29	8,98	8,31	8,67	11,38	8,38	11,31
	Normes	6,5 à 8,5						6,5 à 8,5			

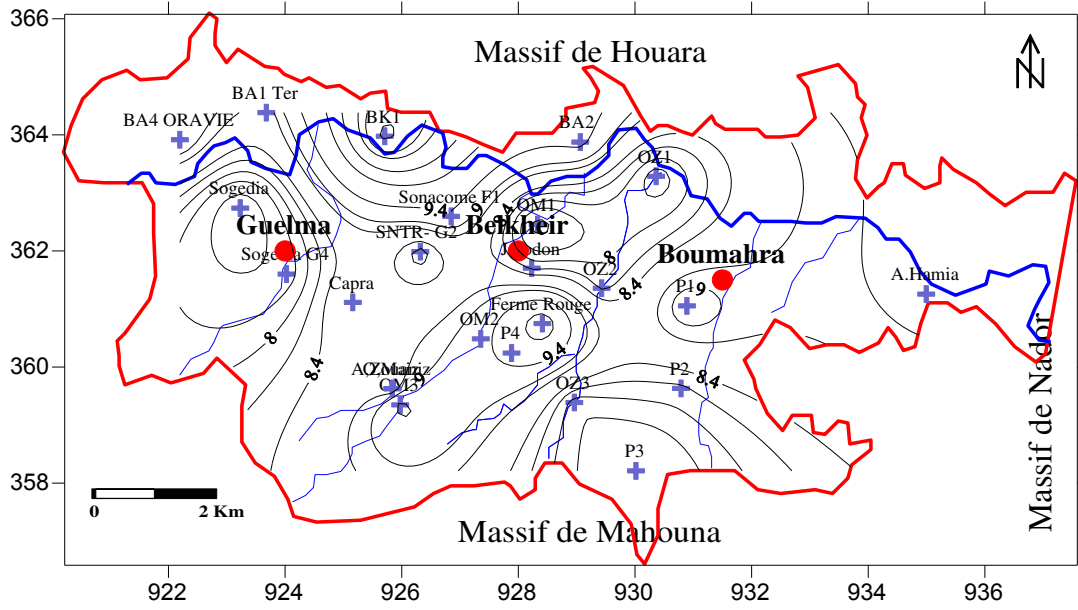


Figure 27 a. pH des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (Hautes eaux, Avril 2015)

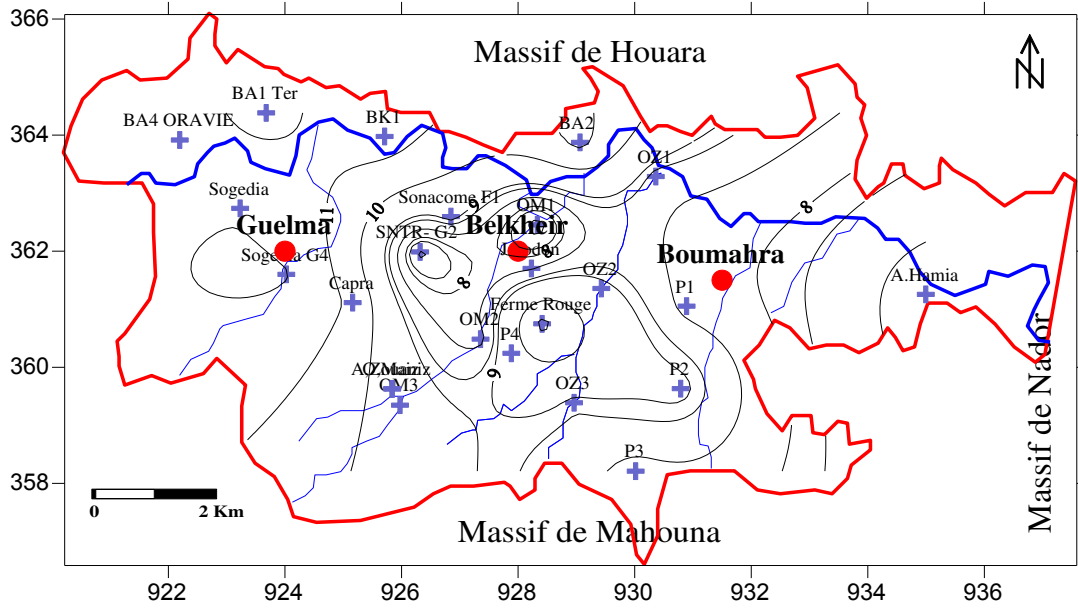


Figure 27 b. pH des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (Basses eaux, Aout 2015)

IV.1.1.3 La conductivité électrique

La conductivité électrique montre le degré de minéralisation d'une eau. Elle est conditionnée par la présence des espèces ioniques en solution. Une conductivité élevée traduit une salinité élevée. Les eaux prélevées sont minéralisées (fig.28a et b), avec des valeurs élevée (>1200 µs/cm) quelque soit la période d'échantillonnage. Ces valeurs importantes semblent résulter du lessivage de la roche réservoir au sein de laquelle les eaux séjournent.

Pour les eaux de surfaces, la conductivité moyenne est généralement modérée et varie entre 948,16 µs/cm et 979.16 µs/cm respectivement en période sèche et de crue, indiquant des eaux moyennement minéralisés. Les valeurs élevées de la conductivité traduisent un apport continu des sels minéraux le long de la rivière, par contre les faibles valeurs peuvent être expliquées par le fait que les eaux de surfaces sont fortement diluées par les eaux de pluies (Kachi N. 2015).

Tableau. 19. Variation de la conductivité électrique (µS/cm) des eaux souterraines et de surface dans le bassin de Guelma

Points d'eau		Eaux souterraines						Eaux de surfaces			
		Forages		Puits		Sources		Oued Maiz		Oued Zimba	
Périodes d'échant.		basses	hautes	basses	hautes	basses	hautes	sèche	crue	sèche	crue
Paramètres statistiques	Min.	947	932	1089	1034	781	893	971	989	764	862
	Max.	1462	1264	1207	1234	1126	1092	1124	1092	935	1001
	Moy.	1165,09	1085,18	1143,75	1122,5	924,33	983,33	1051,33	1034	845	924,33
	Normes	1000									

IV.1.1.4 L’oxygène dissous

La qualité des eaux dépend surtout des interactions géochimiques et biologiques qui les affectent dans le sol et dans la nappe. Le rôle du sol est généralement majeur dans l'acquisition des caractères chimiques des eaux souterraines, en particulier du fait de la présence des deux gaz O₂ et CO₂. Ces derniers agissent sur l'activité des bactéries et ainsi directement sur la chimie des eaux en transit.

La quantité d’oxygène en solution dans une eau régit les réactions d’oxydoréduction et présente une évolution identique à celle du Eh. Les concentrations obtenues des eaux souterraines et de surfaces sont présentées dans le tableau (tab. 20).

On remarque, que la concentration en oxygène dissous varient entre 2,86– 8,43mg /l pour les eaux souterraine. Les eaux ont tendance à être plus oxygénées en période sèche qu’en période humide (fig.29 a et b).

Pour les eaux de surfaces, la teneur moyenne en oxygène dissous au niveau de l’oued Maiz est généralement faible par rapport à celle de l’oued Zimba. Cette diminution peut être expliquée par la présence des rejets industriels.

Tableau 20. Variation de l’oxygène dissous des eaux souterraines et de surface dans le bassin de Guelma

Points d’eau		Eaux souterraines						Eaux de surfaces			
		Forages		Puits		Sources		Oued Maiz		Oued Zimba	
Périodes d’échant.		basses	hautes	basses	hautes	basses	hautes	sèche	crue	sèche	crue
Paramètres statistiques	Min.	2,42	1,58	2,58	2,21	5,63	3,98	5,12	3,28	8,24	7,21
	Max.	7,12	7,1	3,29	4,26	10,01	9,76	5,81	4,82	9,16	7,72
	Moy.	4,93	4, 68	3,06	2,86	8,43	7,34	5,37	4,14	8,60	7,45
	Normes	> 5mg/l						10mg/l			

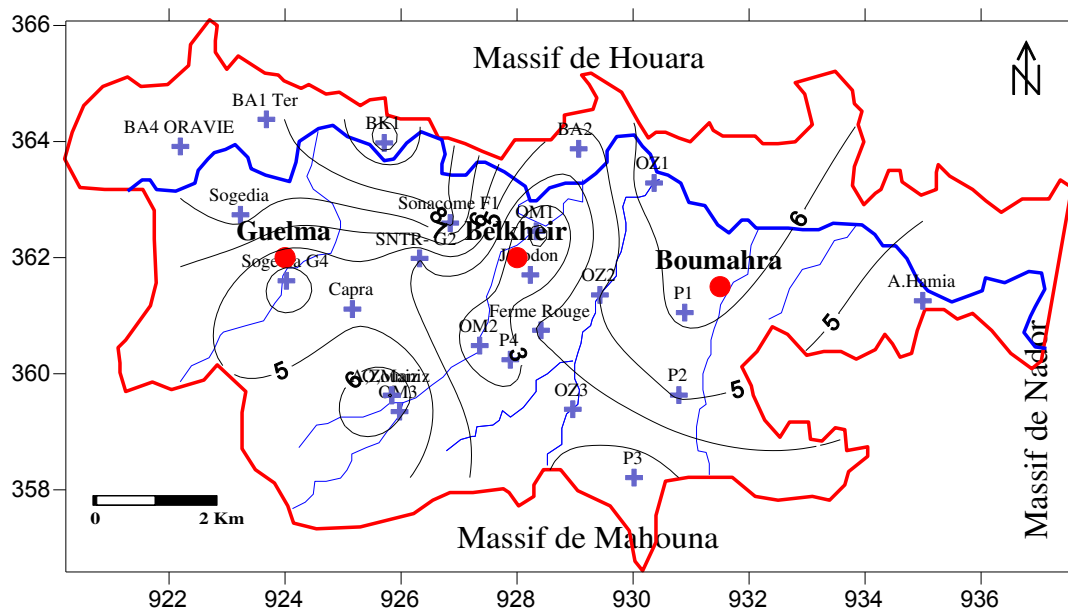


Figure. 29a : Oxygène dissous des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015)

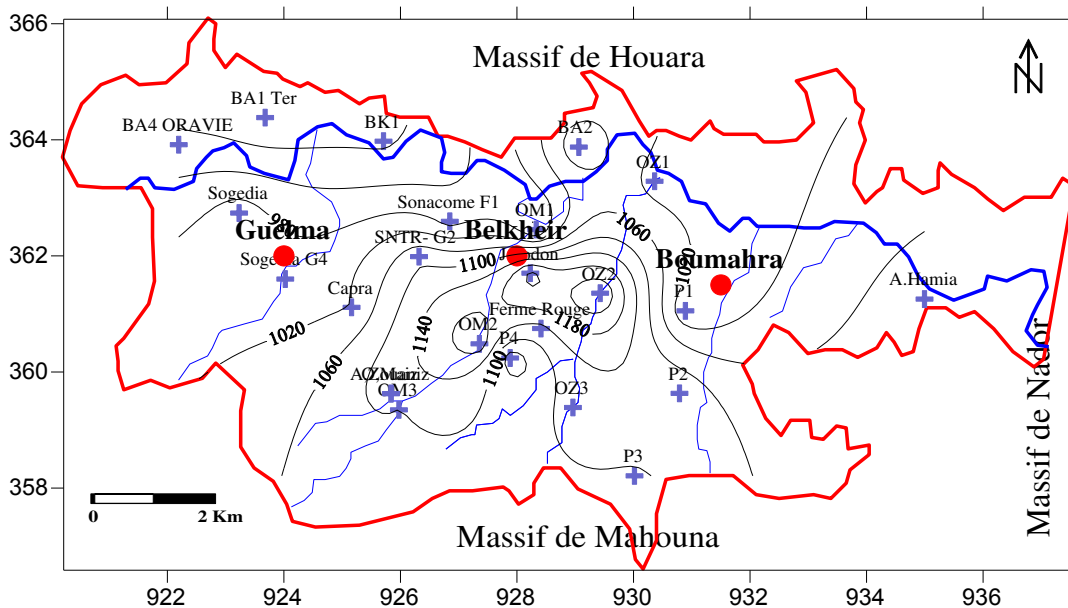


Figure. 29b : Oxygène dissous des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015)

IV.1.2 Les éléments chimiques majeurs

IV.1.2.1 Le Calcium

La présence des ions Ca^{++} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles: soit de la dissolution des formations carbonatées ($CaCO_3$), soit de la dissolution des formations gypseuses ($CaSO_4$) (KHADRI.S 2009). Les résultats obtenus indiquent des valeurs en calcium supérieure à la norme fixée par l'OMS (100 mg/l) durant les deux périodes d'échantillonnage (Tab.21). Les fortes teneurs en calcium sont dues à la présence des formations calcaires travertineux ($CaCO_3$) dans la partie sud-ouest de la plaine, aux niveaux des bordures et dans la zone de Boumahra (fig. 30a et b), et à la dissolution des formations gypsifères ($CaSO_4$) existants dans les formations alluvionnaires.

Tableau 21. Variation du calcium (mg/l) des eaux souterraines et de surface dans le bassin de Guelma

Points d'eau	Eaux souterraines						Eaux de surfaces				
	Forages		Puits		Sources		Oued Maiz		Oued Zimba		
Périodes d'échant. Paramètres statistiques	Min.	105,84	100,21	124,81	105,57	127,41	104,37	-	150,23	-	169,87
	Max.	185,10	165,98	154,70	134,27	180,68	179,37	-	261,02	-	190,15
	Moy.	142,34	128,87	136,75	119,21	149,13	133,70	-	199,49	-	181,48
	Norme	100 mg/l									

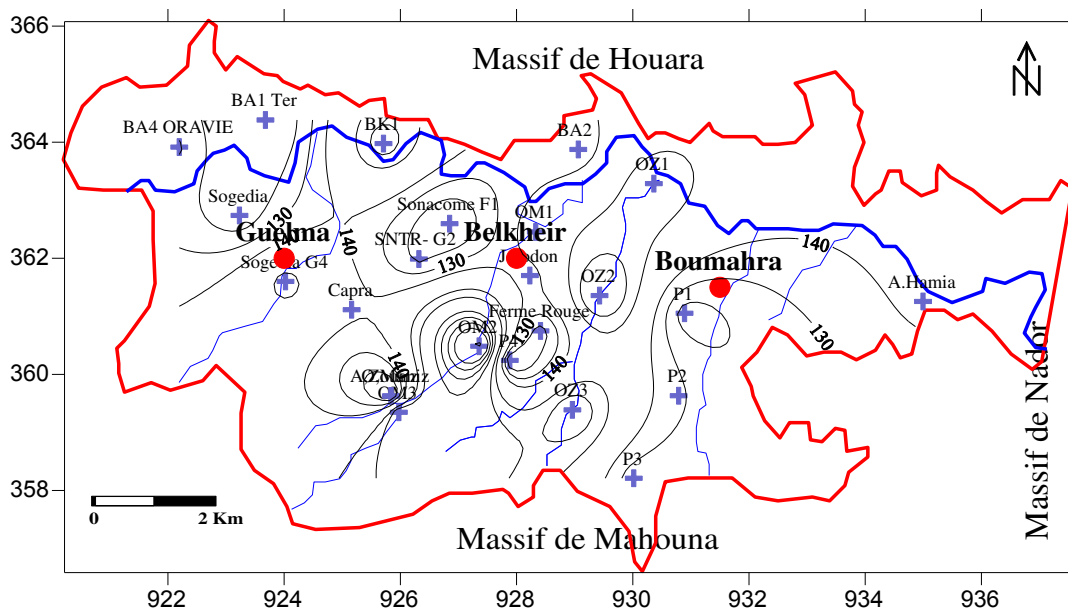


Figure. 30a : Teneur en calcium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015)

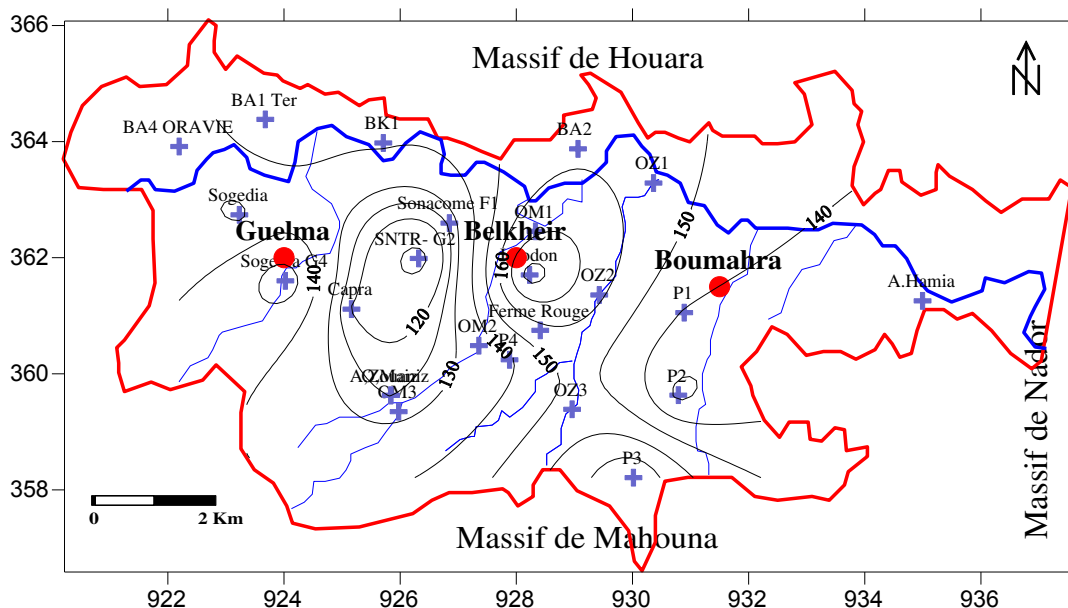


Figure. 30b : Teneur en calcium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (Basses eaux, Aout 2015)

IV.1.2.2 Le Magnésium

Second élément intervenant dans la dureté totale des eaux, Ces ions proviennent de la dissolution des roches magnésiennes du gypse et des minéraux ferromagnésiens et surtout de la mise en solution des dolomies et des calcaires dolomitiques (Brahmia.N 2016). Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées. En effet, la majorité des points situés dans la plaine de Guelma présentent des teneurs inférieures à la norme admissible de 50 mg/l, fixée par l’OMS (Fig. 31a et b).

Les eaux de surface, présentent des valeurs importantes allant jusqu’à 129,03 mg/l enregistrées dans l’oued Zimba pendant la période de crue (Tab. 22), où Les eaux de l’oued sont influencées par la dissolution des formations dolomitiques dans la région.

Tableau 22 : Teneurs en magnésium (mg/l) des eaux souterraines et de surfaces dans le bassin de Guelma

Points d’eau	Eaux souterraines						Eaux de surfaces			
	Forages		Puits		Sources		Oued Maiz		Oued Zimba	
Périodes d’échant.	basses	hautes	basses	hautes	basses	hautes	sèche	crue	sèche	crue
Min.	18,15	13,64	28,15	27,41	17,54	15,79	-	112,21	-	119,18
Max.	39,05	34,25	53,45	50,15	33,35	31,05	-	132,45	-	138,65
Moy.	25,59	22,04	40,36	38,33	24,99	23,24	-	123,22	-	129,03
Norme	50mg/l									

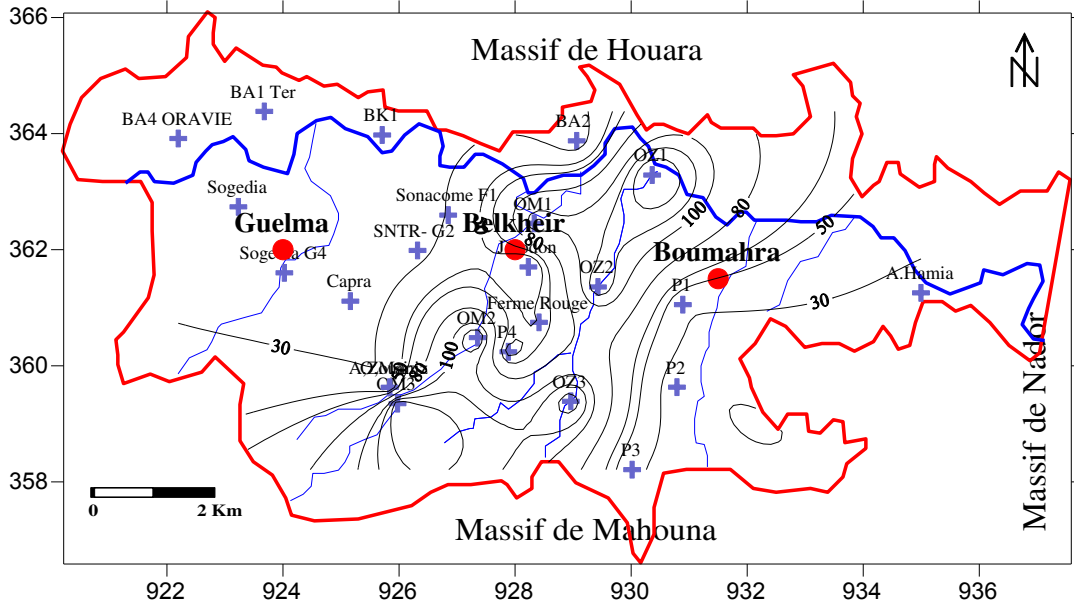


Figure. 31a : Teneur en magnésium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015)

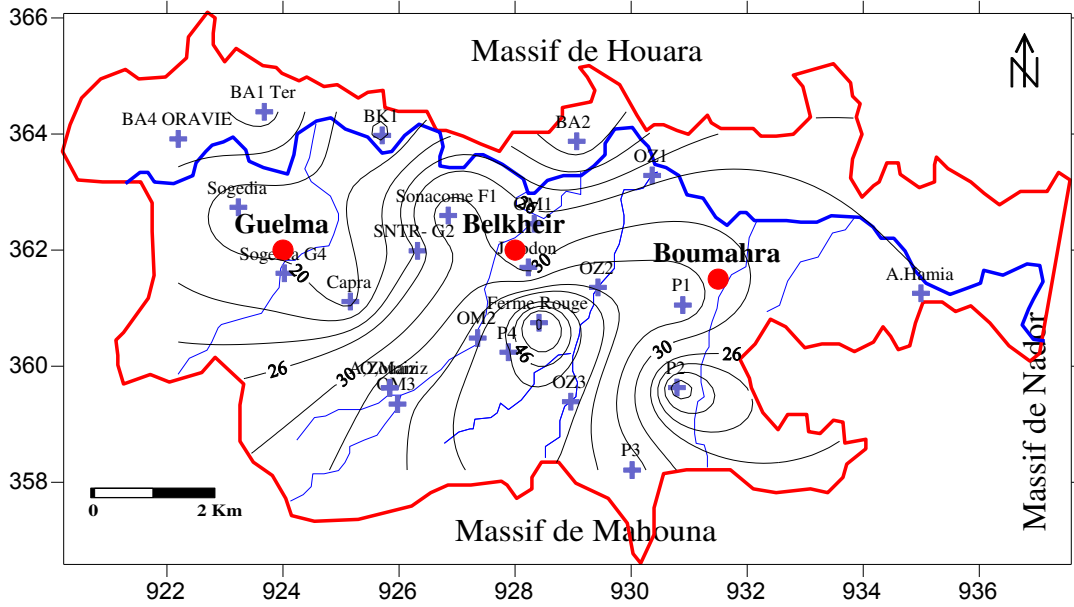


Figure. 31b : Teneur en magnésium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015)

IV.1.2.3 Sodium

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine (Bouselsal. 2007) La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante : $NaCl \leftrightarrow Na^+ + Cl^-$.

Les teneurs moyennes en sodium sont inférieures à la limite de potabilité (OMS, 2001), par contre les valeurs les plus élevées (>150mg/l) sont observées au niveau des forges et puits pour les deux périodes d'observations (Tab. 23). L'évolution des concentrations se fait selon le sens d'écoulement des eaux souterraines du Sud au Nord indiquant l'existence de forts apports salifères à partir de la surface et des formations gypsifères (fig.32 a et b).

Tableau 23. Teneur en sodium des eaux souterraines et de surface dans le bassin de Guelma

Points d'eau		Eaux souterraines						Eaux de surfaces			
		Forages		Puits		Sources		Oued Maiz		Oued Zimba	
Périodes d'échant. Paramètres statistiques	Min.	60,12	55,16	81,65	80,77	49,12	38,72	-	100,56	-	95,43
	Max.	164,16	144,02	200,12	195,05	100,65	170,75	-	201,43	-	213,56
	Moy.	103,74	92, 14	131,74	124,53	82,64	92,54	-	140,80	-	167,01
	Norme	150mg/l									

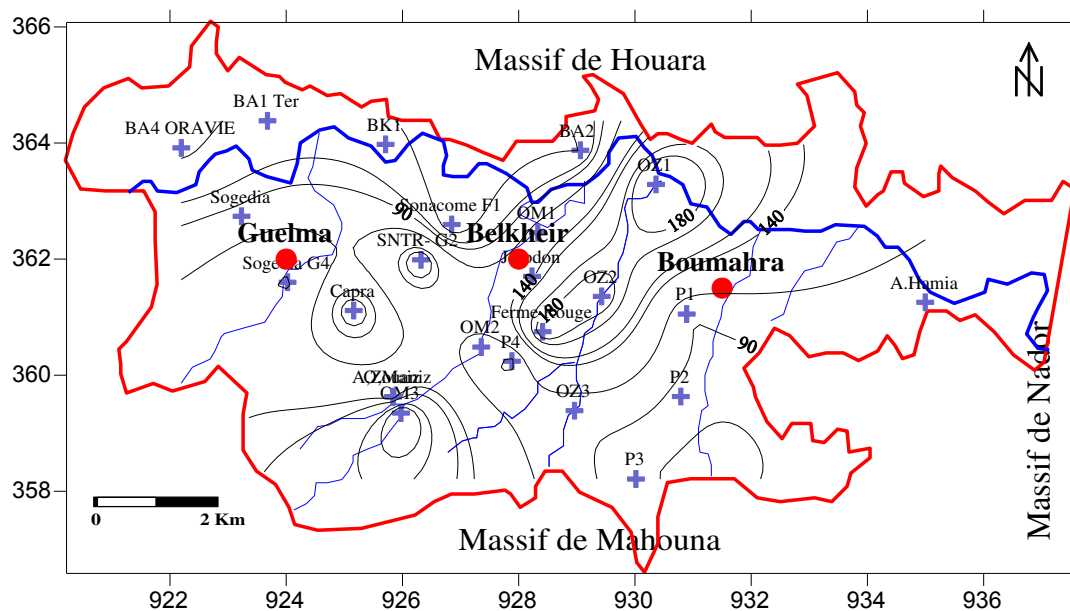


Figure. 32a : Teneur en sodium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (Hautes eaux, Avril 2015)

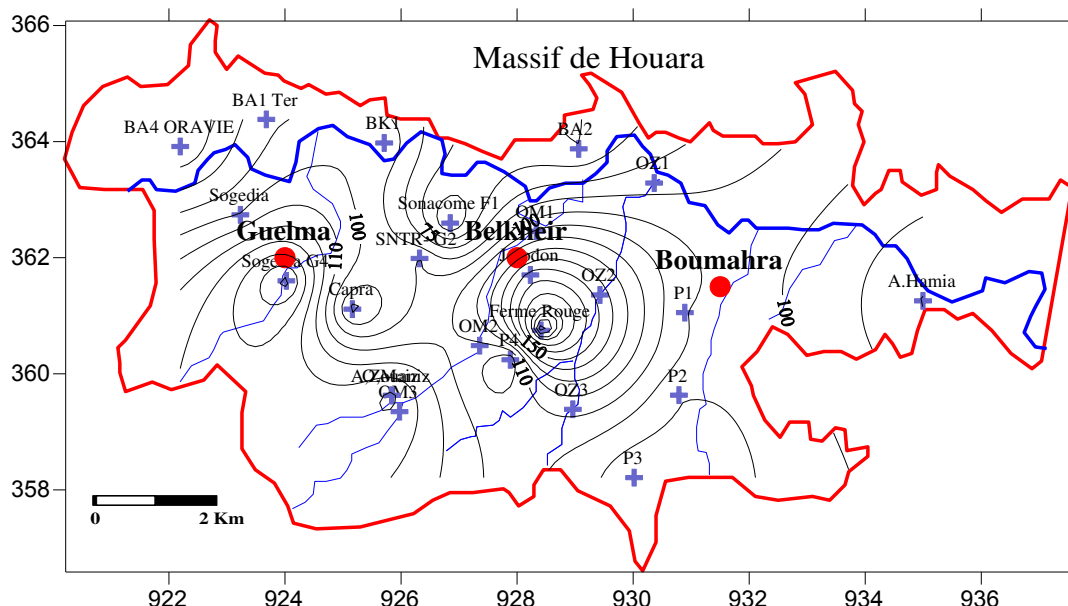


Figure. 32b : Teneur en sodium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015)

IV.1.2.4 Potassium

Le potassium (K^+) est assez abondant sur la terre, mais peu fréquent dans les eaux. En effet, il est facilement adsorbé et recombéné dans les sols, dans les argiles notamment. La source principale de potassium sont les roches cristallines, mais dans des minéraux moins altérables que ceux qui contiennent du sodium, les évaporites (sylvinite), les argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques.

Les valeurs les plus élevées sont observées au niveau des eaux de surface (oueds Maiz et Zimba) avec des valeurs 14,40 mg/l et de 12,07 mg/l respectivement pendant la période de crue (Tab. 24). Cela est dû au lessivage des sols agricoles et aux rejets industriels et domestiques.

Les valeurs observées dans la nappe alluviale montrent que tous les points ont des concentrations inférieures à la limite de potabilité (12 mg/l) (Fig.33a et b).

Tableau.24 : Teneur en potassium des eaux souterraines et de surfaces dans le bassin de Guelma

Points d'eau	Eaux souterraines						Eaux de surfaces				
	Forages		Puits		Sources		Oued Maiz		Oued Zimba		
Périodes d'échant.	basses	hautes	basses	hautes	basses	hautes	sèche	crue	sèche	crue	
Paramètres statistiques	Min.	1,32	0,32	1,35	0,76	1,87	0,74	-	14	-	12
	Max.	6,48	5,48	8,85	7,63	7,32	6,18	-	15,01	-	12,17
	Moy.	3,62	2,67	5,62	4,9	4,14	3	-	14,40	-	12,07
	Norme	12 mg/l									

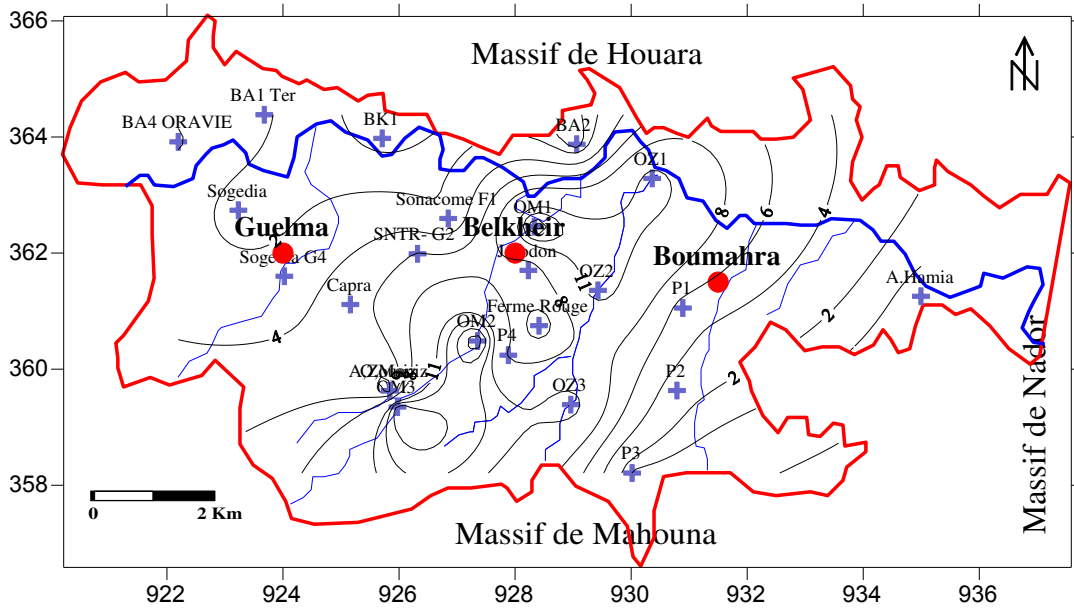


Figure. 33a : Teneur en potassium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015)

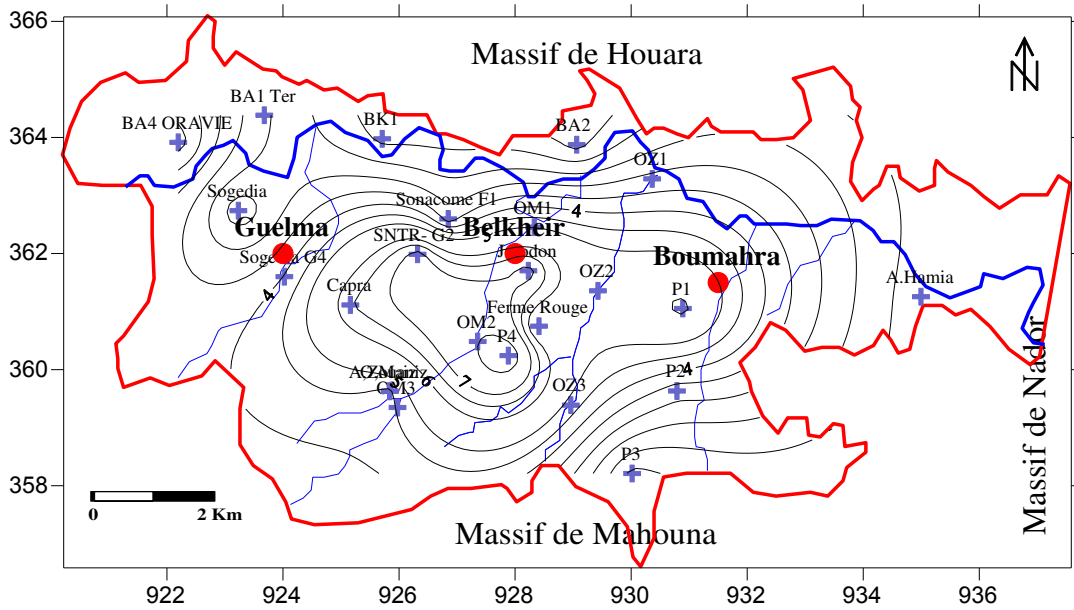


Figure. 33b : Teneur en potassium des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015)

IV.1.2.5 Les Chlorure

Les chlorures sont toujours présents dans les eaux naturelles en proportions très variables, leur présence dans l'eau résulte de la dissolution des sels naturels par le lessivage de terrains gypseux, marneux ou argileux et à cause de l'évapotranspiration intense dans les régions où le niveau piézométrique est proche de la surface du sol.

Les teneurs en chlorures présentent en général des valeurs variables, supérieures aux normes de potabilité. Avec une teneur moyenne maximale de 390,12 mg/l. Ces chiffres indiquent l'existence de forts apports salifères liés à la dissolution des formations évaporitiques présentes à l'Est de la région d'étude.

Les teneurs les plus élevées ont été observées au niveau des forages et dans les puits pour les deux périodes (sèches et humides), et qui sont dues à l'infiltration des eaux d'irrigation chargées en sels en période sèche et au lessivage des sols agricoles par les eaux de pluies pendant la période humide (fig.34a et b). .

Les valeurs les plus faibles sont observées au niveau des eaux de surface en période de crue, 136.85 mg/l et 130.94 mg/l pour Oued Maiz et Zimba respectivement (Tab.25), Ces faibles valeurs sont probablement liées à la dilution des eaux de surface par les eaux de précipitation.

Tableau. 25 : Teneur en chlorures des eaux souterraines et de surface dans le bassin de Guelma

Points d'eau		Eaux souterraines						Eaux de surfaces			
		Forages		Puits		Sources		Oued Maiz		Oued Zimba	
Périodes d'échant.		basses	hautes	basses	hautes	basses	hautes	sèche	crue	sèche	crue
Paramètres statistiques	Min.	220,12	209,21	289,35	276,23	173,23	281,24	-	147,95	-	128,09
	Max.	476,48	482,18	585,05	574,12	297,32	383,12	-	137,25	-	134,64
	Moy.	297,87	286, 12	390,12	377,71	250,80	319,56	-	136,85	-	130,94
	Norme	≤ 250 mg/l									

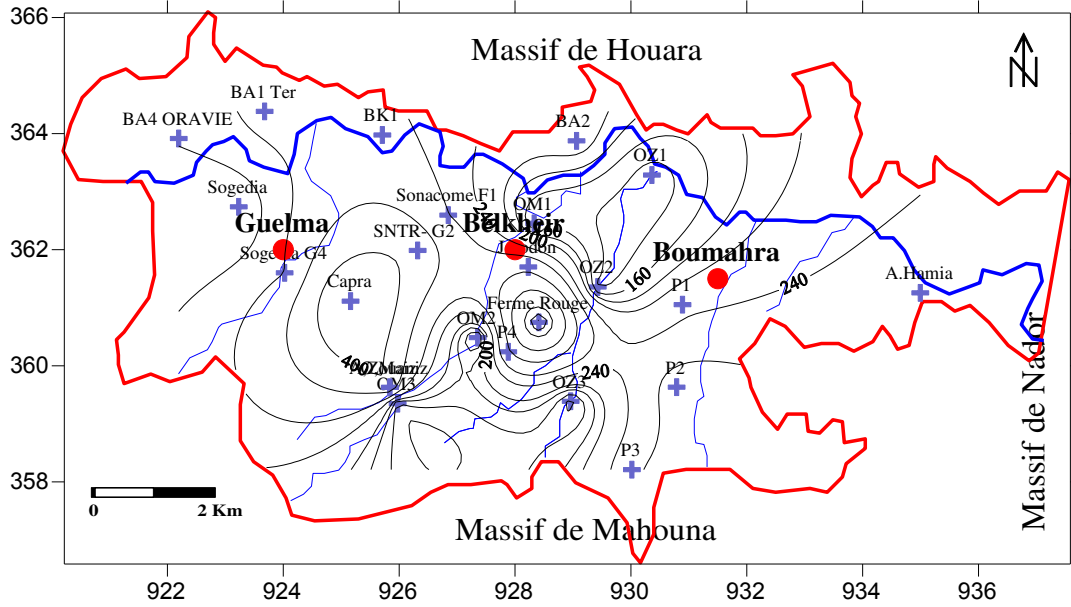


Figure. 34a : Teneur en chlorures des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015)

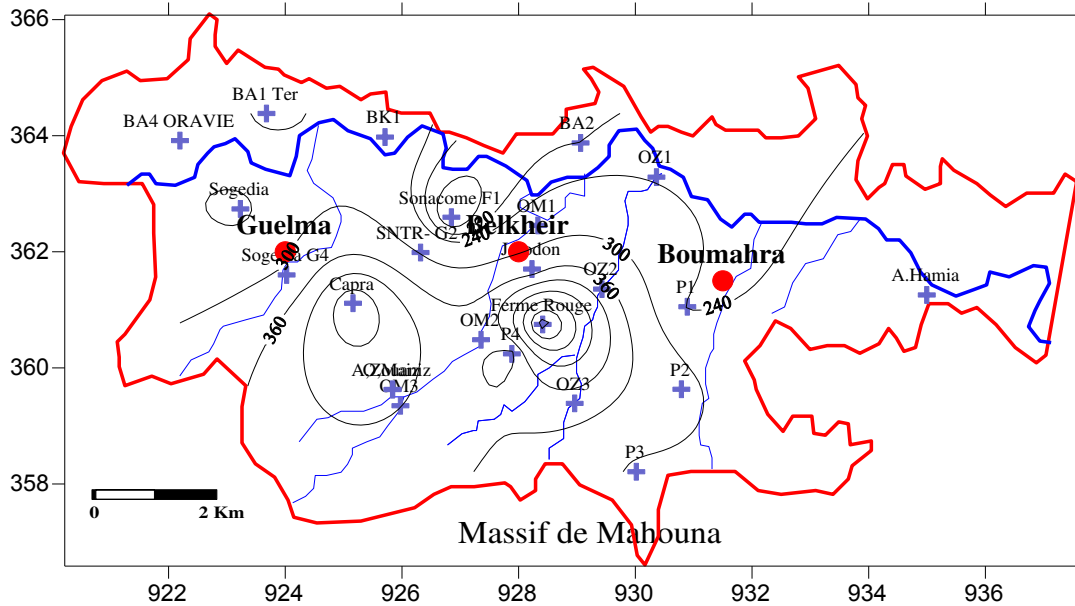


Figure . 34b : Teneur en chlorure des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015)

IV.1.2.6 Sulfates

Certains sols et certaines roches contiennent des minéraux de sulfate. Comme l'eau souterraine se déplace à travers ceux-ci, certains sulfates sont dissous dans l'eau. La présence des sulfates dans les eaux souterraines peut être d'origine naturelle ou anthropique.

En effet, la dissolution des formations gypsifère peut accroître la concentration des SO_4^{2-} dans les eaux souterraines, d'autre part les activités agricoles peuvent provoquer un enrichissement des eaux en sulfates.

Les sulfates présents à des faibles concentrations dans les eaux souterraines (forages, puits et source) (fig.35a et b), cet élément est en dessous des normes (250 mg/l).

Pour les eaux de surfaces, les moyennes restent supérieures aux normes en période de crue (tab.26), elle est due principalement aux rejets urbains et aux fertilisants.

Tableau 26 : teneur en sulfates des eaux souterraines et de surfaces dans le bassin de Guelma

Points d'eau		Eaux souterraines						Eaux de surfaces			
		Forages		Puits		Sources		Oued Maiz		Oued Zimba	
Périodes d'échantillonnage		basses	hautes	basses	hautes	basses	hautes	sèche	crue	sèche	crue
Paramètres statistiques	Min.	100,4	100,12	100,65	145,97	93,01	53,89	-	270,12	-	225,64
	Max.	240,12	236,17	263,09	280,36	270,12	165,09	-	453	-	253,04
	Moy.	154,10	176,66	176,65	214,19	158,25	103,53	-	348,25	-	239,91
	Norme	250 mg/l									

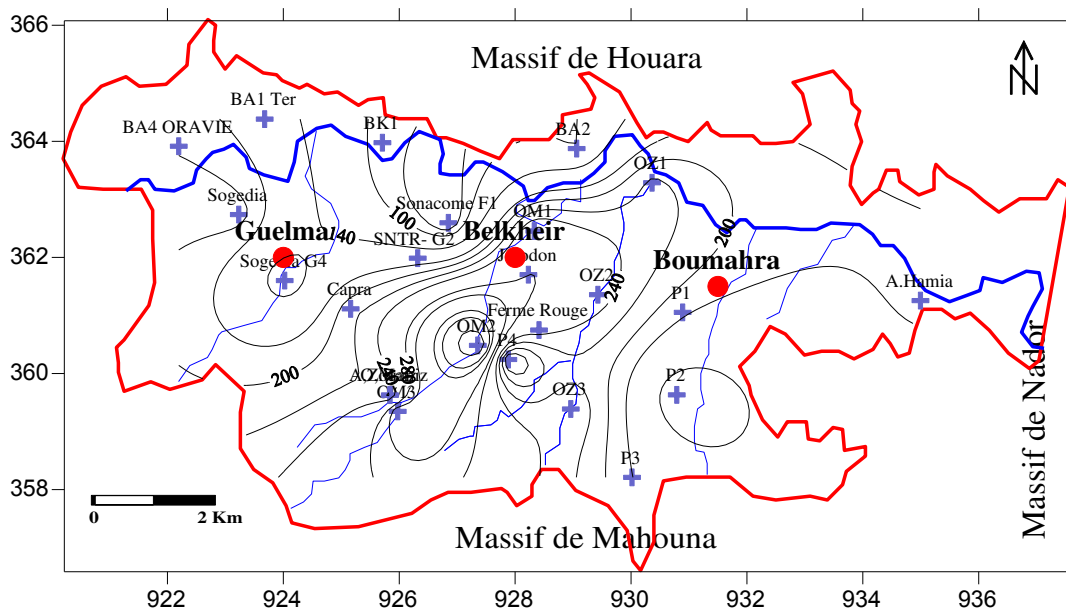


Figure. 35a : Teneur en sulfates des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015)

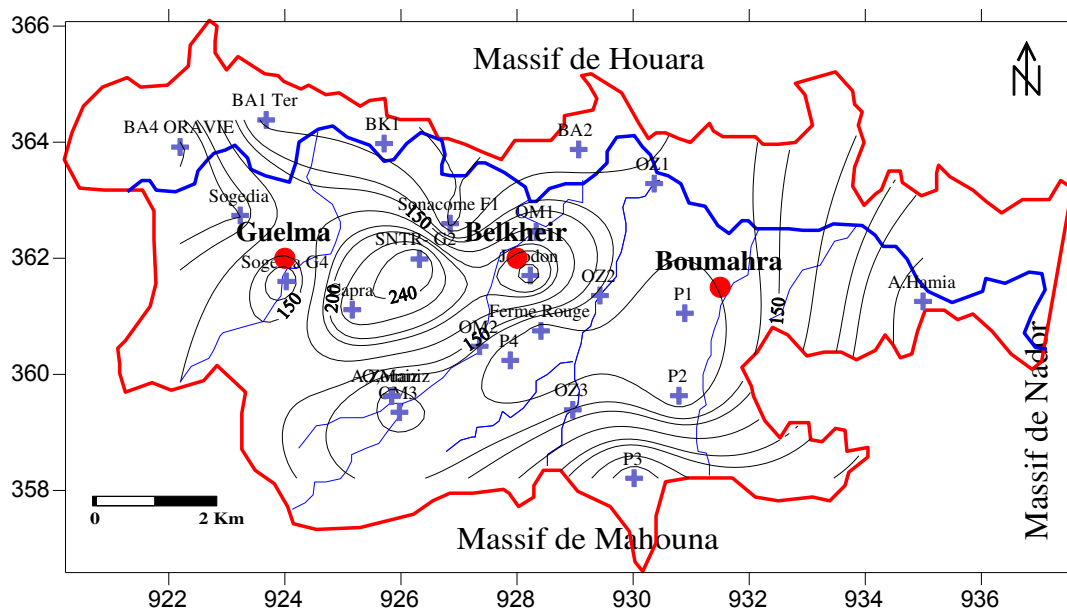


Figure. 35 b : Teneur en sulfates des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015)

IV.1.3. Faciès chimique des eaux

La représentation des données physico-chimiques sur le diagramme de Piper montre plusieurs faciès chimiques qui dépendent de la nature géologique de l'aquifère, des activités agricoles et industrielles.

IV.1.3. 1. Eaux de surface

Les résultats selon le diagramme de Piper (fig. 36) nous donnent un faciès Chloruré Calcique. Ce faciès est marqué dans les points prélevés dans les deux Oueds de Maiz (OM1, OM2, OM3) et Zimba (OZ1, OZ2, OZ3) en période de crue, il indique une dissolution des roches évaporitiques riches en sels et en gypses.

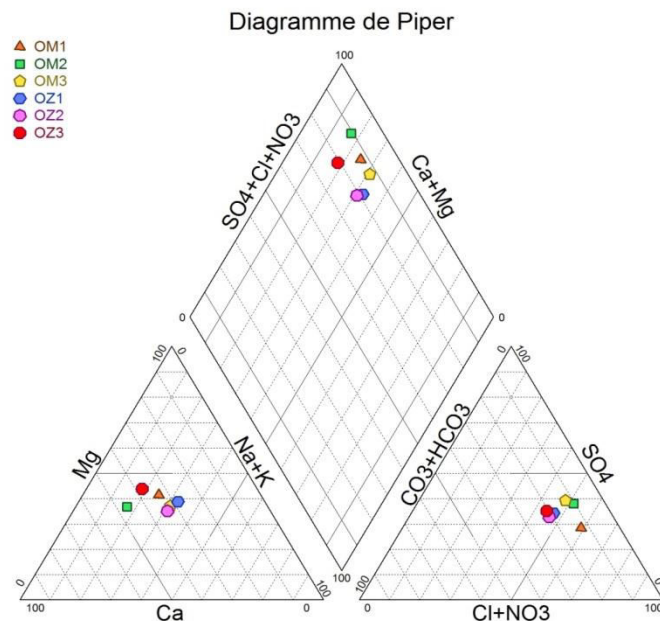


Figure. 36 : Le faciès chimique des eaux d'Oued Maiz et Zimba (Avril 2015)

IV.1.3. 2.Eaux souterraines

Le diagramme de piper (fig. 37a et b) montre, que pour les deux campagnes de prélèvements (Avril et Aout 2015). le faciès chimique dominant au niveau du complexe alluvionnaire est sulfatée calcique, ceci est lié à la dissolution des formations gypsifères (CaSO_4) , aux rejets urbains et aux fertilisants.

Le deuxième faciès est chloruré calcique se manifeste du coté Sud-Ouest de la plaine et dans le secteur de Boumahra . Ceci est lié à la présence de massive des formations du calcaire travertin (CaCO_3).

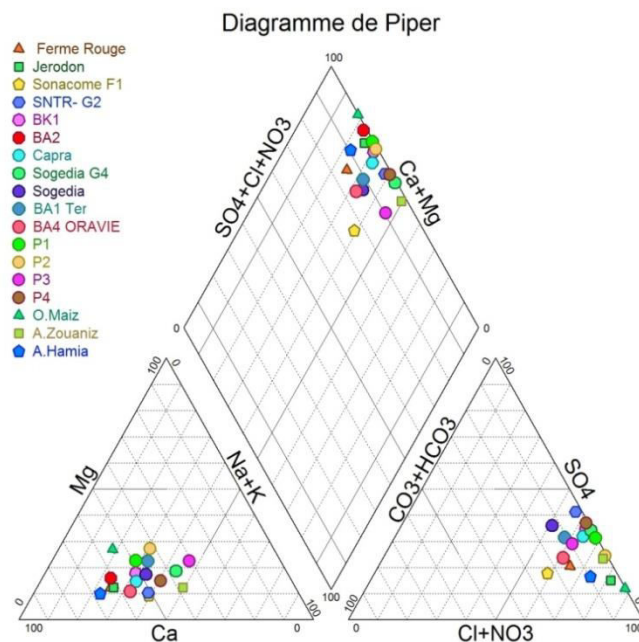


Figure. 37 a : Le faciès chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (période hautes eaux)

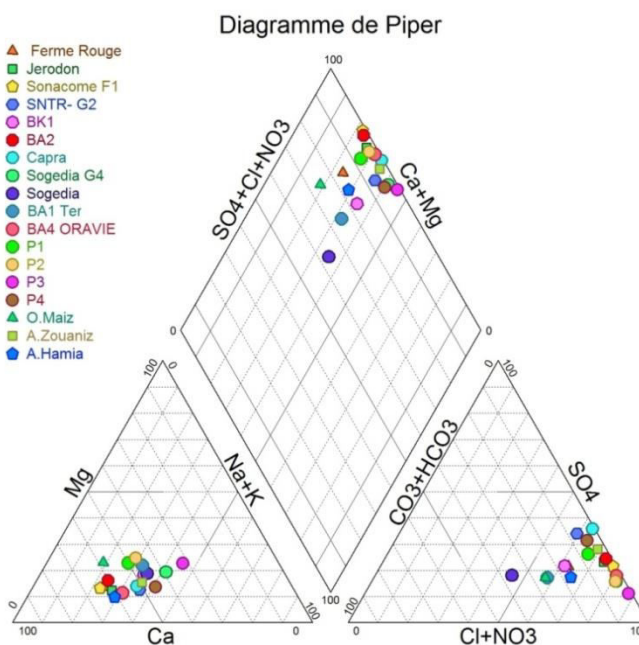


Figure. 37 b : Le faciès chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (période basses eaux)

IV.1.4.Eléments de pollution :**IV.1.4. 1. Les nutriments : (Cycle de l'Azote)**

C'est un élément essentiel de la matière vivante. La quantité et la forme chimique de cet élément dans le milieu aquatique y conditionnent le développement de la vie. Il peut se présenter sous deux formes :

- une forme organique non oxydée et peu soluble (protéines, acides aminés, urée...);
- une forme minérale soluble, résultant de la dégradation de la forme organique par hydrolyse.

L'azote minéral se présente en solution ionique dans l'eau sous 3 formes principales :

- ✓ L'azote ammoniacal (ammoniac NH_3^+ et ammonium NH_4^+);
- ✓ Les nitrites NO_2^- ;
- ✓ Les nitrates NO_3^- azote ammoniacal et nitrites sont oxydables. Les nitrates constituent la forme oxydée finale.

L'azote est présent tout le long du cours d'eau sous sa forme minérale et cela sous les trois formes chimiques (nitrates, nitrite et ammonium) :

a- les Nitrates (NO_3^-)

Les nitrates (NO_3^-) représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. Sa présence dans les eaux souterraines est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques. Les teneurs en nitrates mesurées pendant les deux périodes d'échantillonnage sont mentionnées dans le tableau 28.

Les concentrations moyennes en nitrates observées au niveau des eaux de sources dépassant la norme de potabilité (50 mg/l). Cet excès peut être dû à la lixiviation des nitrates dans les sols agricoles en période de hautes eaux vers les eaux souterraines et par les eaux d'irrigation en période de basses eaux (fig.38 a et b).

Les teneurs moyennes au niveau de l'Oued Maiz et Zimba en période sèche, sont inférieures à la norme, par contre en période humide on remarque des teneurs élevées atteignant 92,03 mg/l des eaux de l'Oued Maiz et 76,41 mg/l pour l'Oued Zimba, Ces fortes teneurs supérieures aux normes de potabilité (Tab.27), proviennent essentiellement du lessivage des sols agricoles, très riches en produits azotés.

En période sèche, les faibles teneurs en nitrates dans l'eau s'explique par le fait que les rejets sont récents par conséquent la dégradation de la matière organique est moins importante.

Tableau 27. Teneur en nitrates des eaux souterraines et de surface dans le bassin de Guelma.

Points d'eau		Eaux souterraines						Eaux de surfaces			
		Forages		Puits		Sources		Oued Maiz		Oued Zimba	
Paramètres statistiques	Périodes d'échant.	basses	hautes	basses	hautes	basses	hautes	sèche	crue	sèche	crue
	Min.	19,42	20,12	32,09	23,09	20,12	18,62	1,33	80,31	2,05	75,98
	Max.	90,12	94,04	55,65	46,65	93,01	84,12	3,12	114,25	3,21	77,01
	Moy.	40,48	40,73	42,65	32,77	54,58	40,58	2,10	92,03	2,6	76,41
Norme		50 mg/l									

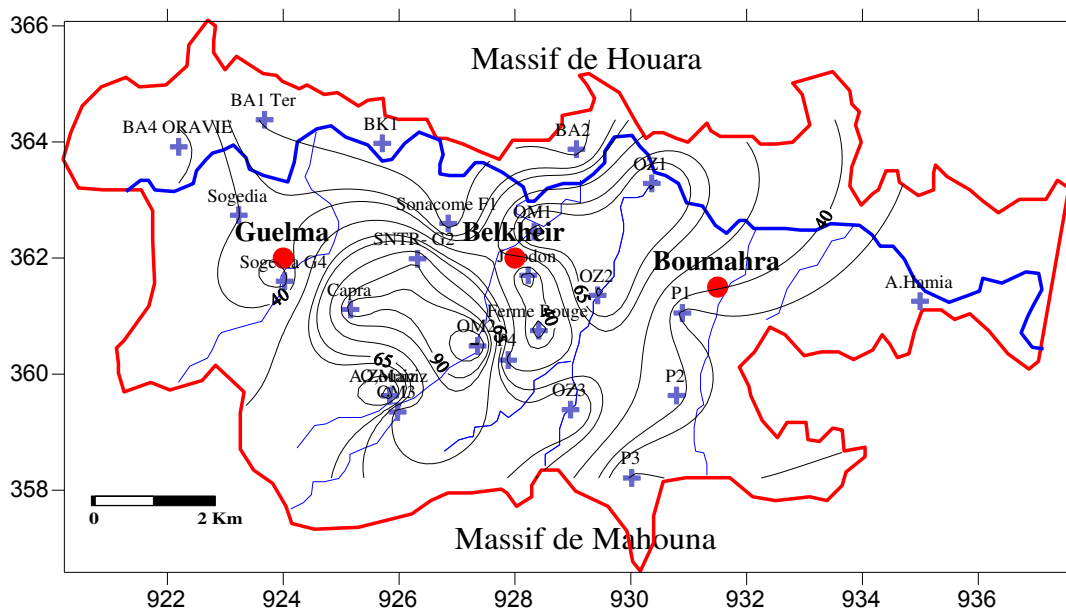


Figure. 38a : Teneur en nitrates des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (hautes eaux, Avril 2015)

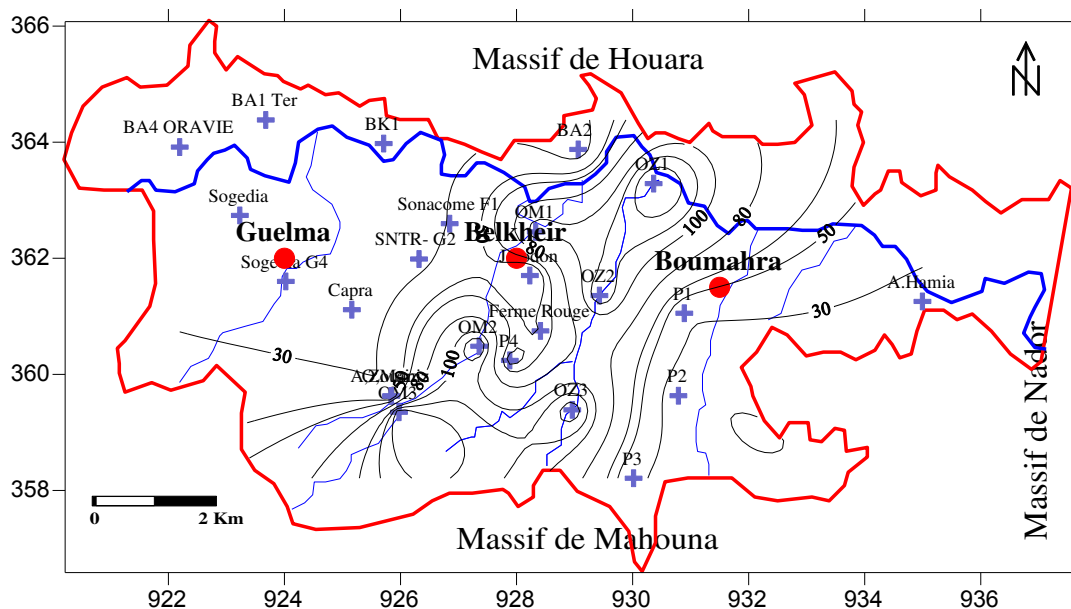


Figure. 38b : Teneur en nitrates des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, Aout 2015)

b- les Nitrites NO_2^- ou Azote Nitreux

C'est une forme moins oxygénée et moins stable représentant ainsi la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium. Une forme toxique, son origine est liée à l'agriculture ou aux rejets urbains et industriels.

En se basant sur la moyenne des deux périodes (Avril et Aout 2015). Les concentrations moyennes maximales de 0,85 mg/l et de 0,73 mg/l sont observées dans la partie aval des oueds Maiz et Zimba respectivement. Ces fortes teneurs sont probablement liées à l'accumulation progressive de polluants organiques contenus dans les rejets urbains. Elles sont dues aussi à l'effet de l'oxydation de la forme ammonium.

La majorité des eaux souterraines des puits présentent des valeurs supérieures à la norme avec un maximum de 0,25 mg/l enregistrée au niveau de P3.

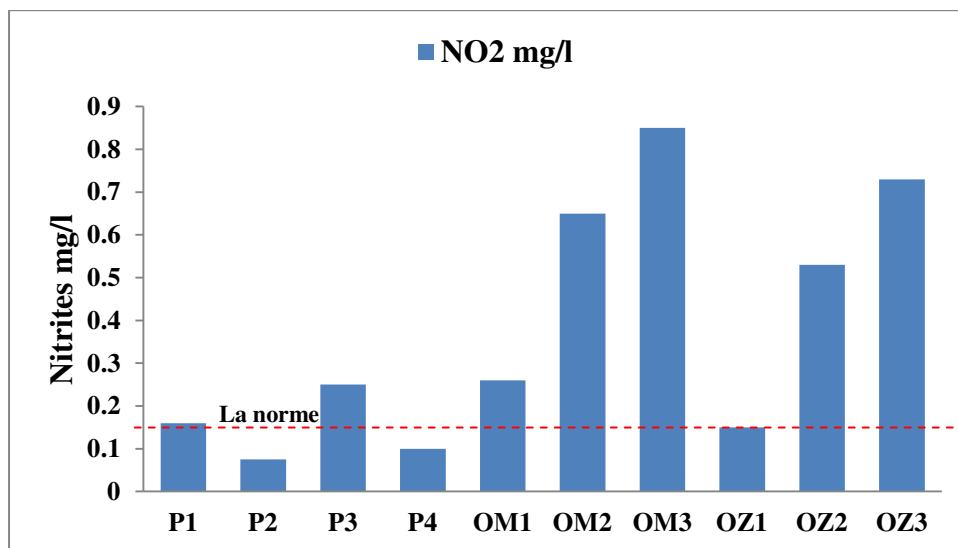


Figure. 39 : Variation des teneurs en nitrites dans les eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma

c- l'Ammonium (NH₄⁺)

Est la forme d'azote la plus toxique. Sa présence dans l'eau est liée soit aux rejets urbains et industriels dans les oueds qui donnent les concentrations les plus élevées au niveau des affluents et peuvent atteindre 1,4 mg/l pour l'oued Zimba avec un pic de 3.5 mg/l en aval de l'oued Maiz, soit par réduction des formes azotées (nitrates et nitrites) en conditions réduites.

Les concentrations observées sont dans l'ensemble inférieures à la norme de potabilité pour les eaux souterraines avec une teneur maximum de 0,5 mg/l observée au niveau de puits P4.

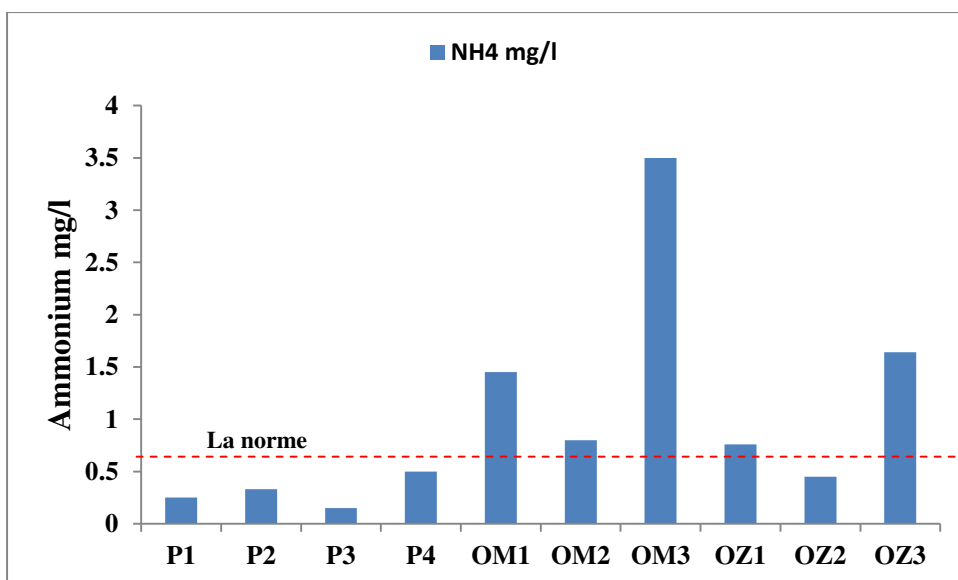


Figure 40 : teneurs en ammonium dans les eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma

IV.1.4. 2. Schéma de transformation des éléments nutritifs (NO_3^- ; NO_2^- et NH_4^+)

Le transfert naturel de l'azote dans les eaux se fait selon les conditions d'oxydoréduction et les réactions biologiques suivantes :

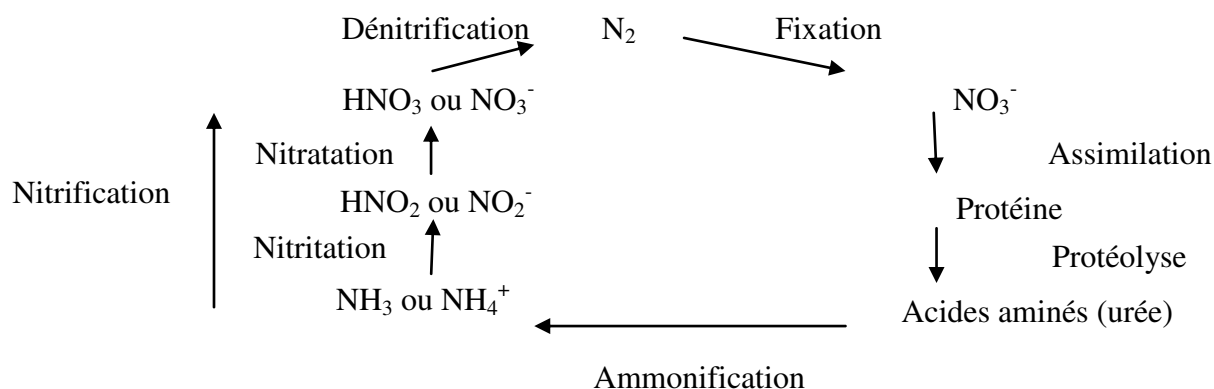


Figure. 41: Cycle de l'Azote (Debièche, 2002)

Le transfert de la forme ammonium vers les nitrites et les nitrates se fait par oxydation. Cette réaction est rapide en présence de l'oxygène. La forte teneur en CO_2 et la faible teneur en oxygène accroissent la concentration en ammonium dans l'eau. (fig. 41)

IV.1.5. Caractérisation bactériologique des eaux de surface

Deux campagnes ont été effectuées au niveau des Oueds Maiz et Zimba où les trois sites de prélèvement sont situés de l'amont à l'aval durant les périodes de crue en Mars 2016 et sèche en Aout 2016.

Les résultats des analyses bactériologiques montrent une concentration élevée en coliformes totaux avec une valeur maximale atteignant parfois 1350 CT/100 ml. Ce qui présage d'une contamination d'origine organique, dont l'origine provient des eaux usées domestiques pendant la période sèche et du lessivage des sols agricoles et des rejets urbains en période de crue (fig .42).

Concernant les concentrations en coliformes fécaux (fig .43) , les eaux de l'Oued Zimba sont plus contaminées que celles de l'Oued Maiz, cela résulte d'une pollution issue des rejets d'eaux usées de la zone urbaine chargées en matière fécale. Au regard de la grille d'appréciation (A.N.R.H, 2012), la qualité de l'eau est généralement bonne (< 200 CF/ml) pour les eaux de l'Oued Maiz et passable (>200 CF/m) pour celles de l'Oued Zimba. (Kachi N. 2015).

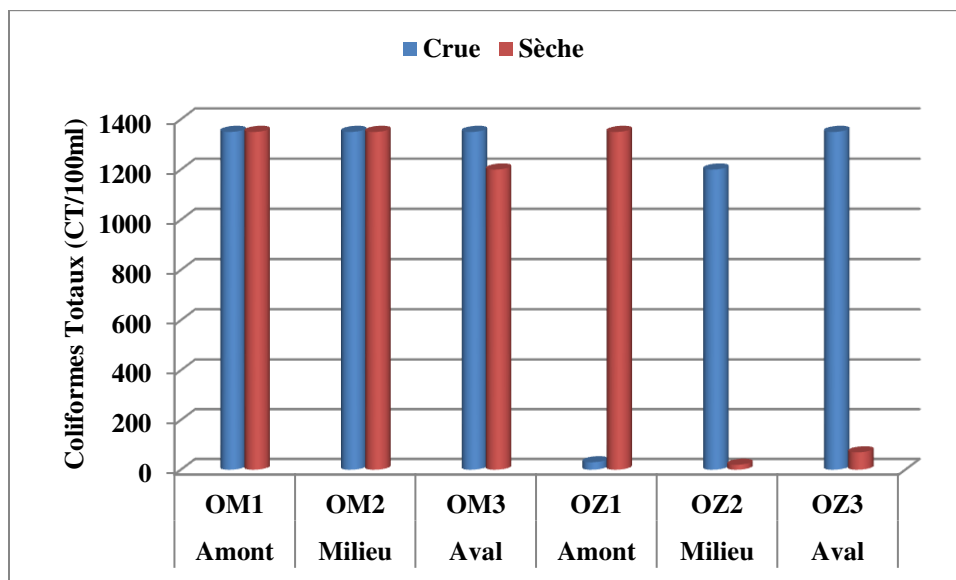


Figure 42. Variation de la teneur en coliformes totaux en périodes de crue et sèche

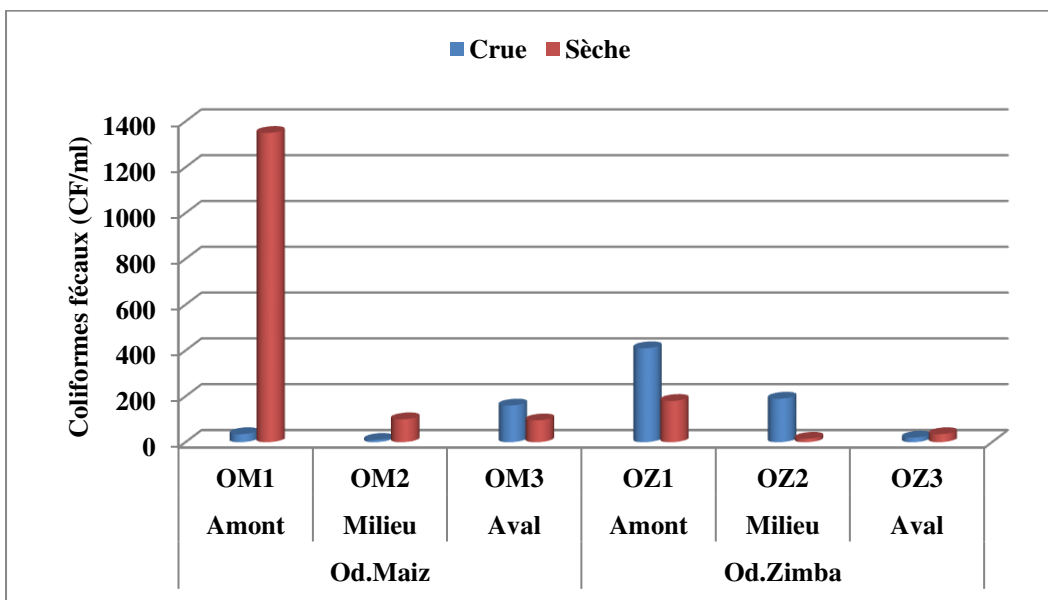


Figure 43 : teneur en coliformes fécaux en périodes de crue et sèche

La présence des streptocoques fécaux dans l'eau témoigne d'une contamination d'origine fécale ancienne car les streptocoques sont typiques de déjections animales et humaines (Recueil de normes françaises 1994, Qualité de l'eau. Paris : AFNOR, 1994). Le graphique agrémentée dans la figure 45 nous montre que les valeurs les plus élevées ont été enregistrées durant le mois d'Aout, avec des valeurs variant de 460 à 1350 germes/100 ml et sont donc supérieures aux

valeurs guides, fixées à 100 germes /100ml selon le décret exécutif n° 93-164 du 10/07/1993 JORA n° 46. (Kachi N. 2015)

En période de crue, des teneurs en streptocoques fécaux supérieures aux valeurs guides sont observées aux stations d’Oued Maiz (OM1et OM3) et d’Oued Zimba (OZ1) et sont la conséquence des rejets urbains et de lessivage des déjections animales.

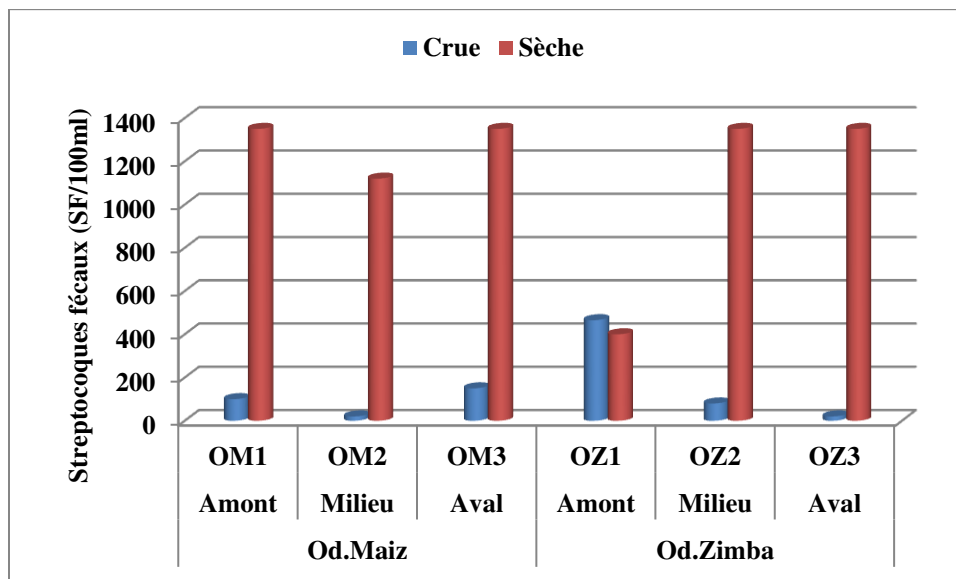


Figure. 44 : Variation de la teneur en streptocoque fécaux en périodes de crue et sèche

IV.2. LES EAUX D’IRRIGATION

IV.2.1. Aptitude des eaux de l’oued Seybouse à l’irrigation

Le déversement continu des effluents non épurés dans l’oued Seybouse, pourrait à long terme dégrader leur qualité. Ce qui nous pousse à nous interroger sur l’utilisation future de ces eaux de surface pour l’irrigation des terres agricoles et sur le risque de contamination pour les cultures, les sols, et surtout pour les eaux souterraines

Il y’a quatre critères majeurs à considérer lors de l’évaluation de la qualité des eaux d’irrigation:

1. La concentration en sels dissous (risque de salinité)
2. La quantité de sodium dans l’eau comparée à d’autres cations (risque de sodicité).
3. La concentration des éléments toxiques qui inhibe la croissance des plantes (danger environnemental).
4. Le bénéfice nutritionnel résultant de nutriments (nitrates, phosphates et sulfates (HACH Company, 1993).

IV.2.1.1.Le risque de salinité

A coté de la rareté et la répartition temporelle défavorable du facteur de production en eau, la salinité est devenue une problématique typique des régions arides et semi-arides.

L'accumulation des sels dans le sol occasionne des effets nocifs sur les végétaux et sur le sol. Il s'en suit une diminution des rendements et, à terme, une stérilisation du sol. En plus de la dite salinité primaire, due en particulier à des inondations périodiques par une eau de mauvaise qualité, et à la remontée d'une nappe phréatique. La salinité est dite secondaire lorsqu'elle est induite par l'activité humaine, liée souvent à des pratiques d'irrigation.

L'évapotranspiration réduit la RFU du sol et laisse une large part de sels apportés par l'eau d'arrosage, ce qui conduit à l'augmentation de la salinité de l'eau du sol (Faby et al, 2000).

IV.2.1.1.1.Evolution temporelle et spatiale de la salinité

Richards, en 1969 a établi une échelle de qualité des eaux d'irrigation en fonction de leur salinité, évaluée par leur conductivité électrique (tab. 28) (Faby et al, 2000).

Tableau 28 : Classe de salinité selon Richards (Faby et al, 2000).

	Conductivité de l'eau (mmhos/cm)	Sels correspondants estimés en Na Cl (mg/l)
I- Excellente	<0,25	<160
II- Faible salinité	0,25-0,75	160-500
III- Forte salinité	0,75-2,25	500-1500
IV- Très forte salinité	2,25-5	1500-3600

- Au mois de mai ; les eaux d'irrigation au niveau des seuils de pompage montrent globalement la même conductivité (2 mmhos/cm) (fig.45). D'après le tableau 29, les quatre seuils d'irrigation, Charef, El fedjoudj, Guelma et Boumahra Ahmed présentent une forte salinité, les sels solubles estimés en Na Cl correspondant sont compris entre 500 et 1500 mg/l

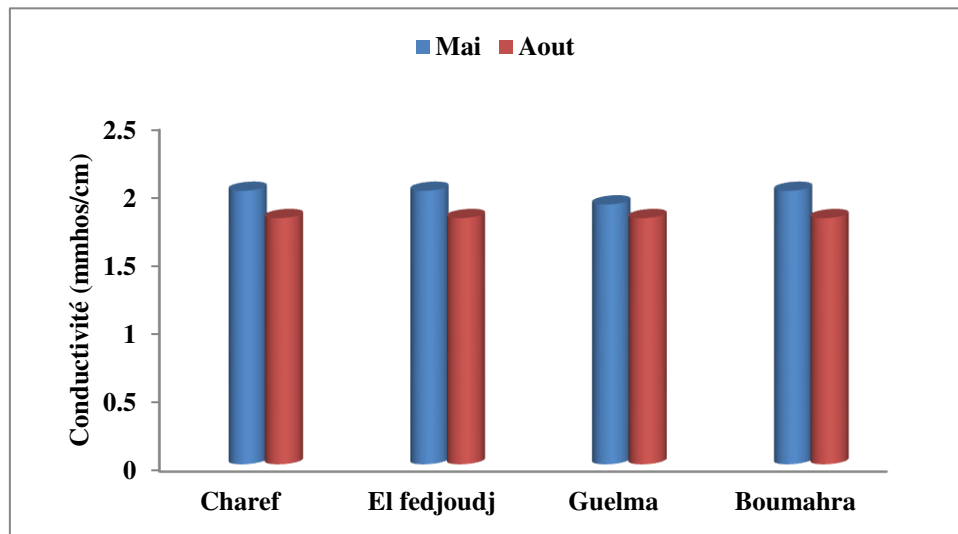


Figure. 45 : Evolution spatio-temporelle de la conductivité des eaux d'irrigation.

- Au mois d'Août, La conductivité est la même au niveau des seuils d'irrigation (1,8 mmhos/cm). Nous notons la diminution de la salinité par rapport au mois de Mai (fig.45). Cela est du aux eaux des lâchées du barrage, dont les volumes apportés jouent le rôle de diluant. D'après le tableau 29 les eaux des seuils de pompage présentent une forte salinité.

IV.2.1.2. Le risque de sodicité

L'accumulation du sodium sur le complexe adsorbant des sols peut dégrader les propriétés physiques des sols. Leur capacité de drainage, donc leur perméabilité, conditionne la productivité des terres irriguées. Un excès de sodium par rapport aux alcalino-terreux (Ca, Mg, ...) dans le complexe adsorbant provoque la défloculation des argiles, une destruction du sol qui se traduit par une réduction de la perméabilité et de la porosité des couches superficielles du sol. L'eau d'irrigation stagne alors à la surface du sol et ne parvient plus jusqu'aux racines. D'autre part, à proportion égale de sodium et d'alcalino-terreux dans la solution, la tendance à la sodisation du sol est d'autant plus forte que la concentration en cations totaux dans la solution est plus élevée. Ainsi, le risque de sodisation relatif à une eau d'irrigation est caractérisé par deux paramètres : le SAR (Sodium Adsorption Ratio) qui rend compte du rapport entre la concentration en sodium et en alcalino-terreux, et la conductivité de l'eau appliquée (Faby et al, 2000). Le SAR est défini par la relation

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

Les valeurs du SAR sont représentées en fonction de la conductivité électrique de l'eau sur le diagramme de Richards (Fig. n°46).

➤ **Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Richards :**

Richards (1954) a élaboré une classification, en se basant sur les deux paramètres à savoir (SAR et conductivité électrique). D'après le diagramme de Richards :

Tableau. 29 : Classification des eaux par degré d'aptitude à l'irrigation (Méthode du SAR).

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

- Au mois de mai et d'Août (après les lâchées du barrage), les eaux d'irrigation, au niveau des quatre seuils de pompage appartiennent à la même classe d'aptitude à l'irrigation classe C₃ S₁ (fig.46). Elles sont de qualité admissible et en général et peuvent convenir à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.

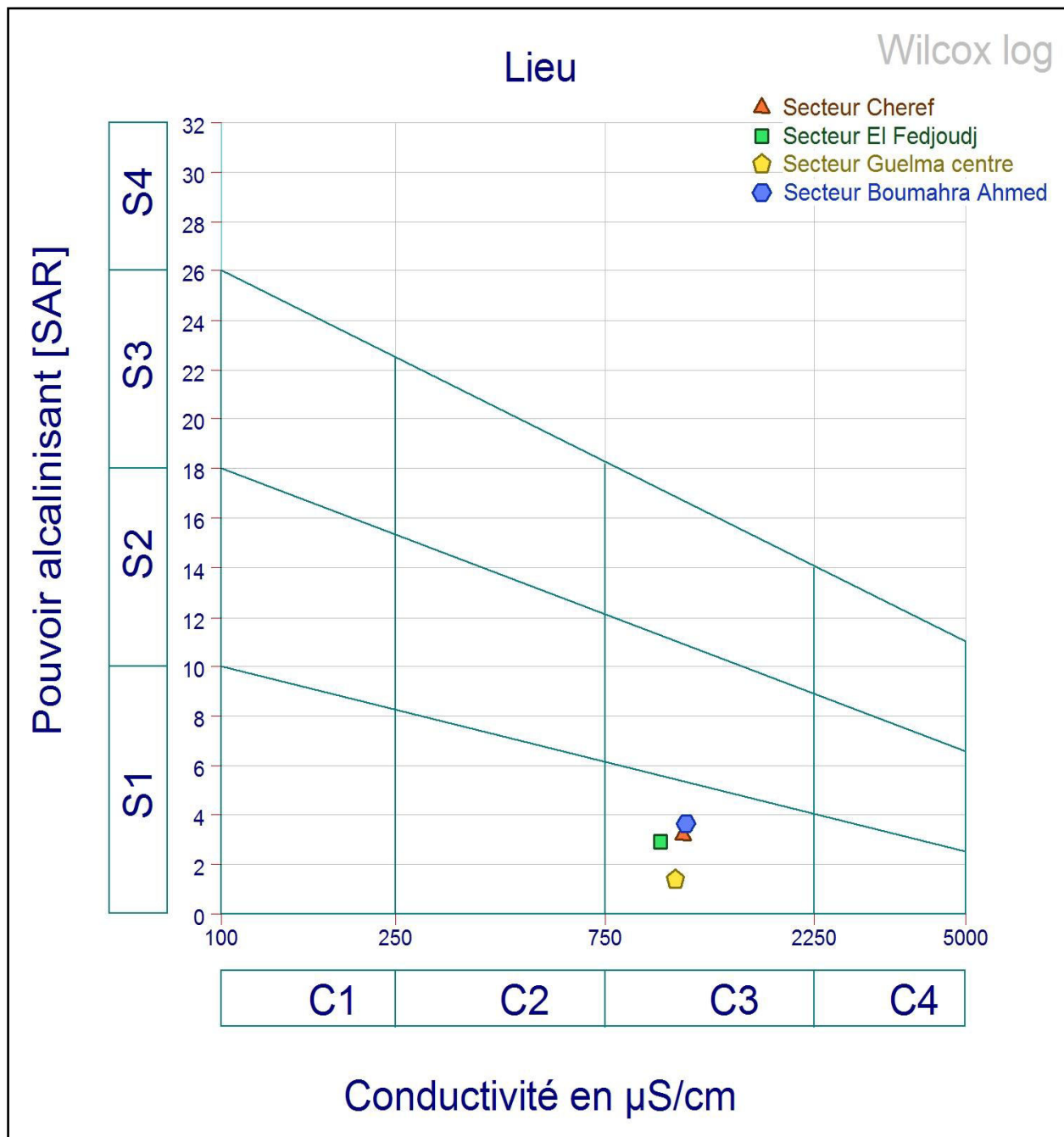


Figure. 46: Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Richards.

➤ **Classification des eaux d'irrigation selon la méthode de WILCOX 1954 :**

Cette classification est fondée sur la représentation des valeurs de la conductivité électrique (CE) en fonction du pourcentage (%) du sodium dans l'eau.

Le pourcentage du sodium est défini par la formule suivante :

$$Na+\% = [Na+ / (Ca^{++} + Mg^{++} + Na^{++} + K^+)] \cdot 100$$

Tous les éléments chimiques sont exprimés en méq/l.

La représentation des points sur diagramme de Wilcox montre que les eaux dans le périmètre de Guelma sont bonnes pour l'irrigation (figure 47).

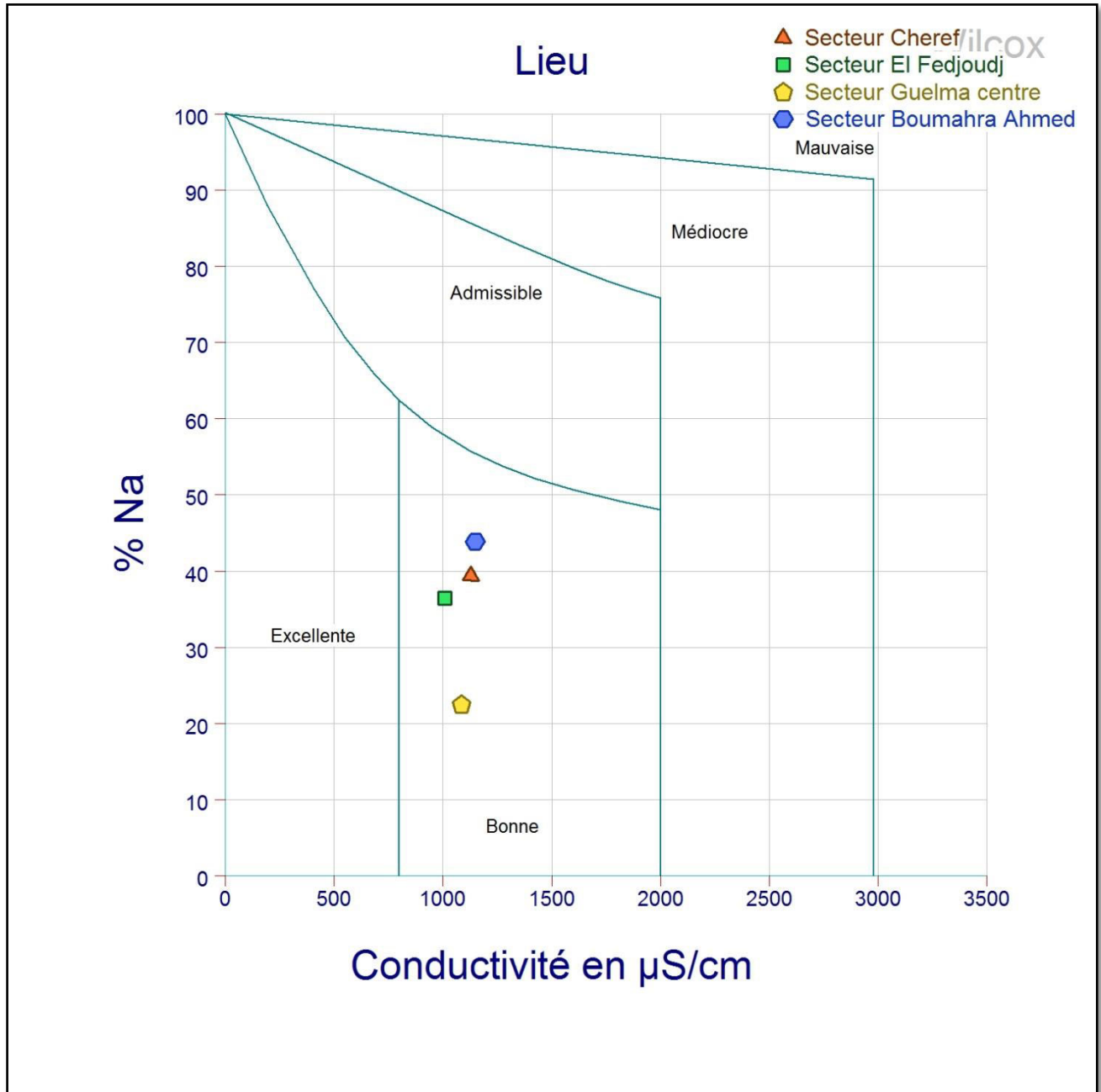


Figure. 47 : Diagramme de Wilcox.

V. Conclusion

Le présent chapitre, relatif à l'étude de la qualité des eaux a permis de mettre en évidence l'importance des caractéristiques physico-chimiques des eaux au sein de la région de Guelma. De manière générale, l'étude hydrogéochimique des eaux de la nappe alluvionnaire de Guelma permet de dire que :

-Les eaux sont caractérisées par une forte salinité et par la présence de deux faciès dominants, qui sont ; le faciès sulfaté calcique et le faciès chloruré calcique.

-La répartition spatiale des éléments chimiques montre que le chimisme est fortement lié à la lithologie de la nappe, suite à la dissolution des formations évaporitiques;

-Les eaux de surface d'Oued Maiz et Zimba présentent des signes de dégradation quelque soit la période de prélèvement, puisque la majorité des paramètres analysés ont révélé des teneurs qui dépassent les normes OMS.

Quant à la qualité des eaux souterraines, il ressort que la situation de la pollution nitrique est très alarmante avec 45% des points d'eau (sources, puits et forages) ayant des teneurs nitriques supérieures aux normes de l'OMS.

Pour le reste des éléments nutritifs (Nitrate, orthophosphate...), les résultats obtenus montrent que les eaux souterraines de la nappe, pour la plupart des points prélevés, sont supérieures à la norme de potabilité, comparées aux eaux de surface, qui ont montré de faibles teneurs en nitrates, ce qui confirme que l'origine des nitrates dans la nappe est due aux engrais chimiques.

De point de vue bactériologique, les eaux hébergent également des fortes densités de bactéries en période sèche qu'en période de crue. L'origine de cette contamination en période sèche peut être causée par des déjections animales rejetées à proximité des cours d'eaux et mixte avec prédominance animale en période de crue.

Les analyses chimiques des eaux d'irrigation, au niveau des stations de pompage ont montrées, que ces eaux sont de forte salinité, les sels solubles estimés en Na Cl correspondant sont compris entre 500 et 1500 mg/l. Cependant, le diagramme de Richards montre que les eaux de Charef, El Fedjoudj, Guelma, Boumahra sont de qualité *admissible*, en générale, convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.

1. INTRODUCTION

La nouvelle stratégie de protection de ressources en eau, qui doit être instaurée, est de protéger et sauvegarder les ressources dans leur gisement avant qu'elles ne soient contaminées, bien que le développement des techniques de décontamination des nappes a évolué, mais la dépollution reste longue, coûteuse et la restauration de la potabilité des eaux reste difficile. Cette stratégie sera basée sur l'élaboration d'un document cartographique (carte de vulnérabilité ou carte de sensibilité) que le gestionnaire de la ressource en eau pourra utiliser lors de l'implantation des installations (Gabriel AKE.2010).

Le but de l'établissement de cette cartographie est de montrer quelles sont, suivant les terrains rencontrés en surface, les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans le terrain, de mieux apprécier la fragilité des captages d'eau potable existants, de mieux cerner les zones à risque lors du choix de nouveaux sites des captages et de prévoir les mesures compensatoires à mettre en œuvre sur les infrastructures existantes ou à créer pour limiter les risques de pollution chronique ou accidentelle, diffuse ou ponctuelle.

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses. Chacun élabore sa méthode selon ses besoins. La multiplicité des méthodes provient aussi bien des objectifs recherchés (la réglementation, les activités humaines, les polluants), que du nombre d'organismes qui développent leur propre méthode pour une utilisation spécifique à leur pays.

II. VULNERABILITE DU SYSTEME AQUIFERE DE LA PLAINE DE GUELMA

Afin d'examiner la vulnérabilité du système aquifère de la plaine de Guelma, nous allons appliquer deux méthodes d'évaluation : à savoir la méthode de GOD et la méthode DRASTIC.

II.1. VULNERABILITE DU SYSTEME SELON LA METHODE GOD

Ce système a été développé par Foster en 1987(Kachi.S 2007). La méthode est basée sur la combinaison de trois paramètres : type de nappe, facteurs lithologiques et la profondeur de la nappe.

L'estimation de ces paramètres est aisée, car basée sur les informations recueillies par les opérateurs même sur une fiche de forage.

La détermination de ces facteurs aboutira à l'élaboration d'une carte de vulnérabilité.

II.1. 1. Description des paramètres et réalisation des cartes thématiques

II.1. 1. 1. Application à la nappe aquifère de la plaine de Guelma

La nappe aquifère est libre et est contenue dans des colluvions et des graviers, se caractérisant par des perméabilités élevées. Sa profondeur reste faible, mais sa valeur peut atteindre un maximum de 25 m, (fig. 48).

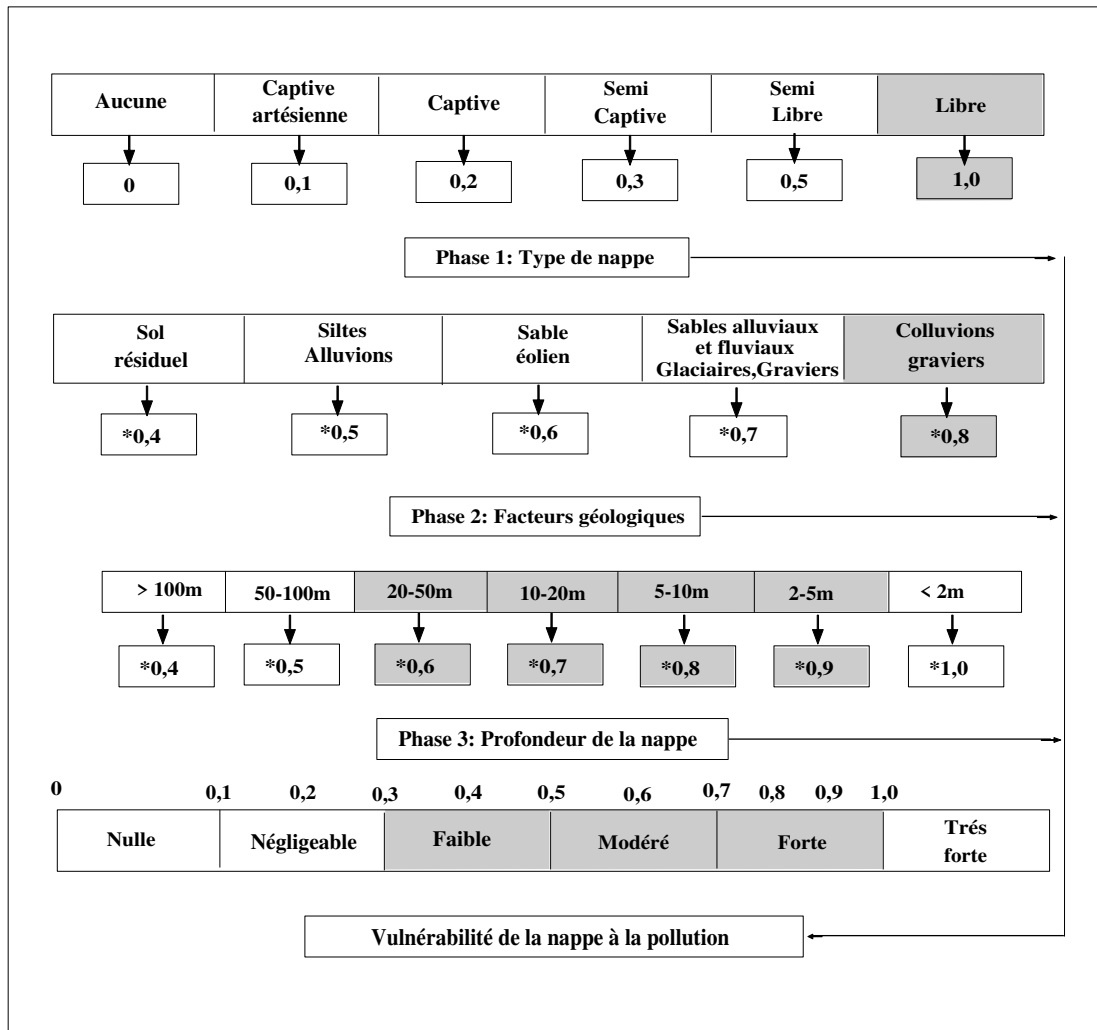


Figure. 48: Estimation de la vulnérabilité d'un aquifère par la méthode de GOD (d'après Foster, 1987) : Cas de la nappe aquifère de Guelma.

a. Carte des profondeurs « D »

Cette carte est établie à partir des données de forages, sa lecture, montre la présence de quatre zones de profondeur différentes.

La carte réalisée indique que les zones les plus profondes se localisent au Sud Ouest, au niveau de la haute terrasse (nappe des travertins). Les parties les moins profondes sont juxtaposées au Sud Est dans la moyenne terrasse, où on retrouve les profondeurs intermédiaires ; tandis que les faibles profondeurs recouvrent la basse terrasse au Nord de la

ville de Guelma, au Nord-Est de Boumahra et même jusqu'à Nador. Cette répartition nous a permis de déterminer quatre indices allant de 0,6 à 0,8, ce qui nous a permis de calculer les indices afin d'établir la carte de vulnérabilité (Fig.49).

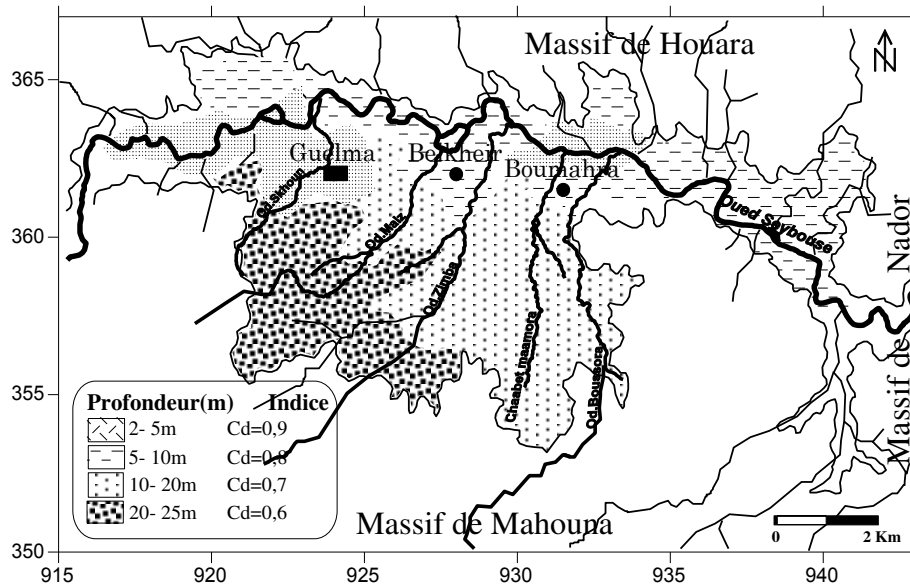


Figure.49 : Carte des valeurs de l'indice de la profondeur de la nappe aquifère de la plaine de Guelma.

Calcul des indices globaux ou carte de vulnérabilité :

$$\text{Indice GOD (IG)} = Ca \times Cl \times Cd \quad (\text{eq. 1})$$

Où C : désigne la cote du paramètre, Ca : Type d'aquifère ; Cl : Lithologie de l'aquifère ; Cd : Profondeur du niveau d'eau dans la nappe (Allechy.F et all 2016).

Les indices calculés aboutissent à la carte de vulnérabilité (fig.50), l'observation de cette dernière montre trois classes de vulnérabilité d'inégales extensions.

Les indices obtenus oscillent entre 0.48 et 0.72. L'observation de la carte montre trois catégories de vulnérabilités : la première, dont les indices atteignent 0.72, indique une très forte vulnérabilité et se localise au niveau de la ville de Guelma et Belkheir jusqu'à Nador, où elle couvre la surface totale de la basse terrasse.

Le deuxième des valeurs de l'indice varie de 0.56 à 0.64, et occupe une grande partie de la moyenne terrasse dans sa partie Sud Est.

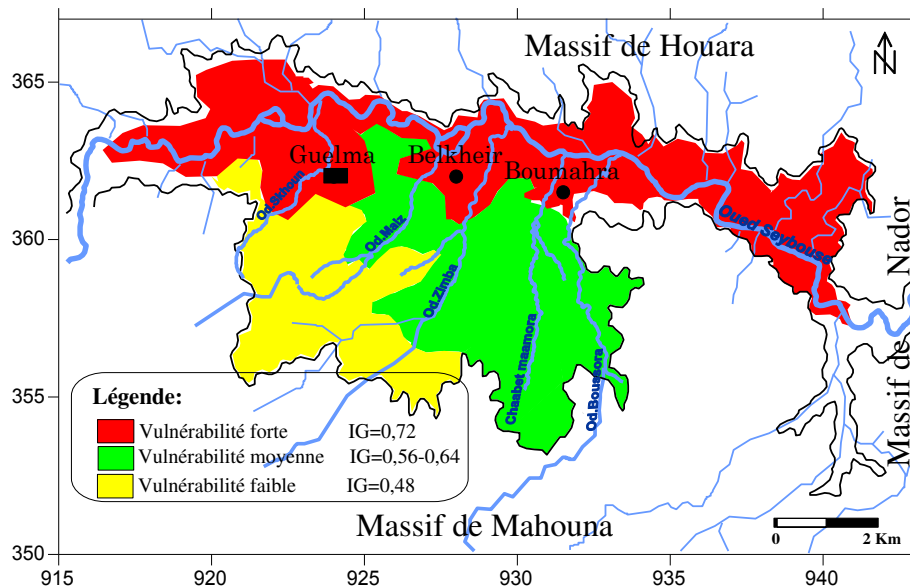


Figure.50: Carte de vulnérabilité de la nappe aquifère de la plaine de Guelma selon la méthode de GOD.

La partie Sud Ouest est caractérisée par des indices de l'ordre de 0.48, indiquant une vulnérabilité modérée.

La méthode de GOD, nous a permis d'avoir une première idée sur la vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe aquifère de la région de Guelma.

II.2. VULNERABILITE DU SYSTEME SELON LA METHODE DRASTIC :

II.2.1. Conditions d'utilisation de la méthode DRASTIC

Les conditions d'utilisation de la méthode sont les suivantes : (Chaffai H.2006)

- Le contaminant est introduit à la surface du sol.
- Le contaminant arrive aux eaux souterraines par infiltration.
- Le contaminant a la mobilité de l'eau.
- La zone à évaluer est d'au moins 0,4 km².

II.2.2. Construction de la carte de vulnérabilité :

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 (Aller et al., 1987), afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (Drias.T 2015) .

Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept facteurs :

- [D] : depth to groundwater (Distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée)
- [R] : recharge
- [A] : Aquifer media (nature de la zone saturée)

- [S] : Soil media (nature du sol)
- [T] : Topography (topographie, pente en %)
- [I] : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée)
- [C] : Conductivity (perméabilité de l'aquifère).

L'importance relative de chaque facteur est évaluée par un poids fixe variant d'une valeur de 5 pour les facteurs les plus significatifs et une valeur de 1 pour les facteurs qui le sont moins (Tab. 30). Chaque paramètre se voit attribuer une cote variant entre 1 et 10 en fonction des conditions locales: les conditions favorables procurent des cotes basses et les conditions défavorables (celles qui augmentent la vulnérabilité) procurent des cotes élevées.

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

Tableau. 30 : Les paramètres DRASTIC et leur poids respectif (Aller et al, 1987)

N°	Paramètres	Poids
1	D :Depth to water/(Profondeur de l'eau)	5
2	R :Net recharge /(Recharge efficace)	4
3	A :Aquifer media/(Milieu aquifère)	3
4	S :Soil media/(Type de sol)	2
5	T :Topography/(Pente de terrain)	1
6	I : Impact of the vadose zone/(Impact de la zone vadose)	5
7	C :Hydraulic Conductivity/(Perméabilité)	3

La vulnérabilité des eaux de la nappe alluviale de Guelma est évaluée au moyen de l'indice DRASTIC qui est un indice numérique représentant la somme pondérée des 7 cotes correspondant aux 7 paramètres définis ci dessus. L'indice local est obtenu en multipliant la cote de chaque paramètre par son poids relatif et en faisant la somme de ces produits:

$$\text{Indice DRASTIC} = D_c \cdot D_p + R_c \cdot R_p + A_c \cdot A_p + S_c \cdot S_p + T_c \cdot T_p + I_c \cdot I_p + C_c \cdot C_p \quad (\text{eq. 2})$$

Où : les indices 'c' et 'p' correspondent respectivement à la cote et au poids du paramètre
L'indice ainsi calculé représente une évaluation du niveau de risque de contamination d'une formation aquifère. Ce risque augmente avec les valeurs de l'indice (Baali.F 2007).

II.2.3.Les cartes thématiques :

Les cartes thématiques ont été établies grâce aux données géologiques, topographiques, hydrogéologiques, pédologiques, hydrodynamiques et hydroclimatologiques, ce qui a permis de définir :

- le bassin versant de l'Oued Seybouse et le bilan hydrique;
- le type, la géométrie, la structure et la perméabilité l'aquifère ;

- la distribution des charges piézométriques et la profondeur du niveau des eaux souterraines dans l'aquifère ;
- la nature du sol et de la zone d'aération;

La distribution des valeurs indicielles pour chaque paramètre (poids x cote) est représentée sur une carte. Les zones, où le risque de pollution est élevé, ont des cotes fortes et celles moins exposées avec une valeur faible.(LATIFI.S 2017)

La carte de synthèse de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère est obtenue en faisant la somme pondérée des valeurs indicielles des sept paramètres DRASTIC.

II.2.3.1. Profondeur de l'eau (D)

La profondeur du niveau d'eau dans la nappe est un paramètre important, il détermine l'épaisseur des matériaux de la zone d'aération à travers laquelle un contaminant percole avant d'atteindre le niveau piézométrique. Généralement, la capacité d'atténuation augmente avec la profondeur du plan d'eau, le poids attribué est de l'ordre de cinq (5) et le système de cotation, affecté à cette profondeur, est représenté au tableau (tab.31). Les indices ainsi calculés permettent de dresser la carte correspondante (fig. 51). Elle fait ressortir de forts indices aux endroits de Nador, au Nord de Belkheir et aux alentours de Guelma. La moyenne terrasse est caractérisée par des indices dont la valeur varie de 35 à 45. Par contre les zones, où l'indice est le plus faible, se situent dans la haute terrasse et surtout dans la nappe des travertins à l'Ouest avec des valeurs qui sont comprises dans l'intervalle 25-35.

Tableau. 31 : Cotation du paramètre profondeur de l'eau.

Profondeur de la nappe en (m)			
Intervalle	D _C	D _P	D _C .D _P
0-1.5	10	5	50
1.5-4.5	9	5	45
4.5-9	7	5	35
9-15	5	5	25

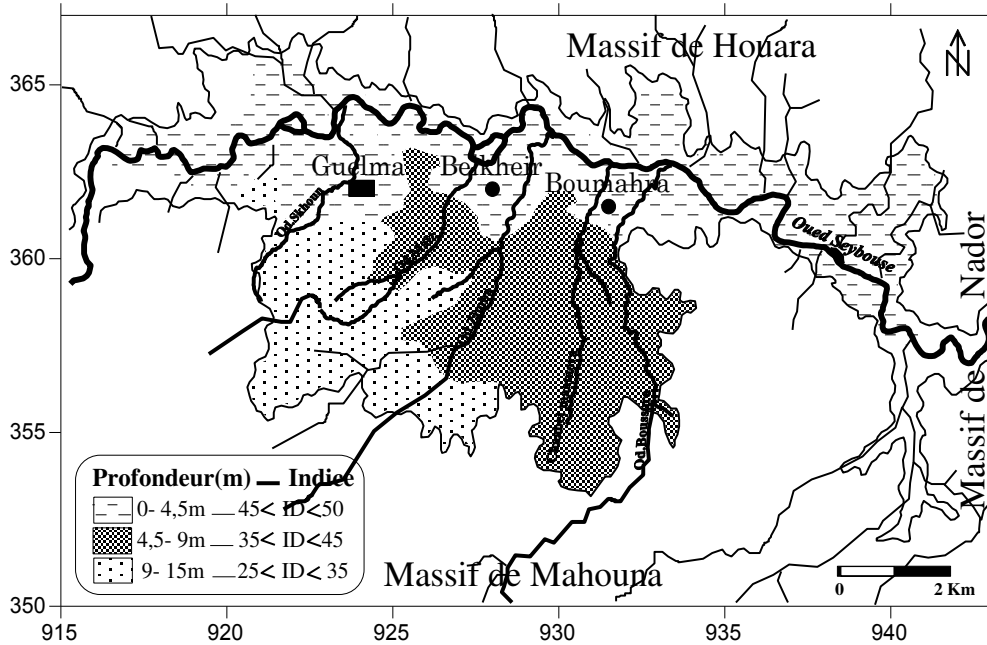


Figure. 51 : Carte de répartition des valeurs de l'indice de la profondeur d'eau dans l'aquifère.

II.2.3.2. Recharge efficace (R)

La recharge de la nappe provient principalement de l'infiltration directe des eaux de précipitation à travers les sédiments grossiers des bordures et des eaux de ruissellements, où des crues dans les lits des affluents de l'oued principal (notamment l'oued Seybouse). La recharge correspond à la quantité d'eau franchissant la surface du sol pour renouveler les stocks d'eau souterraine et entretenir le débit de l'écoulement souterrain dans les formations aquifères. L'observation de la carte de recharge (fig. 52) montre que l'infiltration est la même sur toute la plaine de Guelma. Le calcul du bilan hydrique a donné une valeur moyenne de l'infiltration efficace de 80,33 mm. La méthode DRASTIC attribue un poids de 4 à la recharge efficace pour l'intervalle se situant à plus de 25 mm. Ce paramètre est reporté au tableau (tab.32).

Tableau. 32 : Cotation du paramètre recharge de l'aquifère.

Recharge de l'aquifère (mm)			
Intervalle	R _C	R _P	R _C .R _P
+ 25 mm	9	4	36

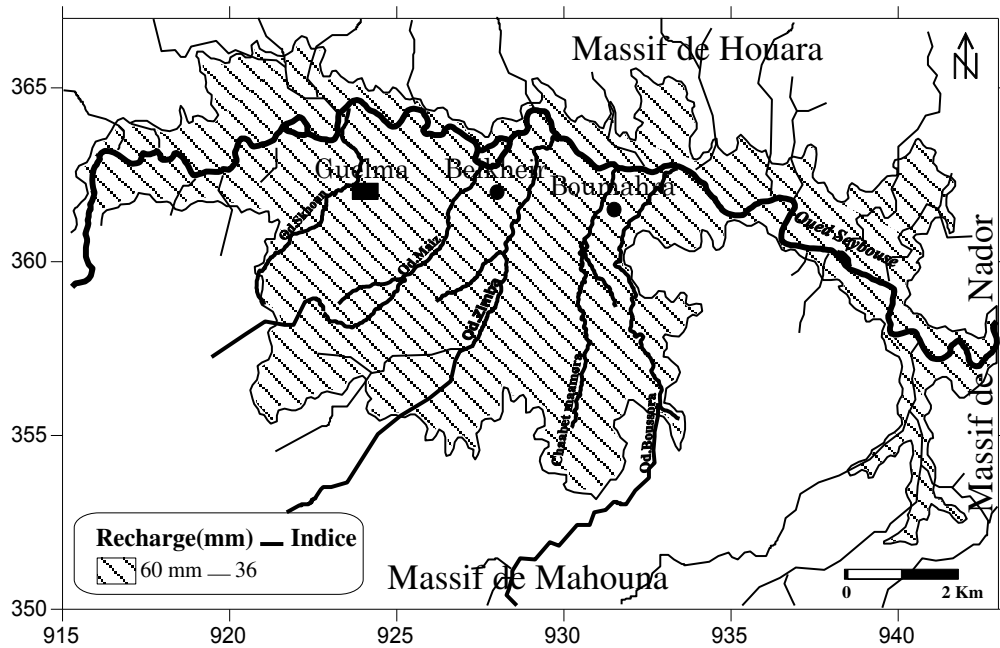


Figure. 52 : Carte de répartition des valeurs de l'indice de la de Recharge dans l'aquifère.

II.2.3.3. Matériaux de l'aquifère (A)

La détermination de ce paramètre résulte de la combinaison des données de forages et de la prospection géophysique. La carte des matériaux de l'aquifère (Fig.53) se distingue par la présence des sables, galets et graviers, qui couvrent la partie nord-est de l'oued Seybouse et s'étend vers le Sud entre la ville de Guelma et le village de Boumahra., des grés au niveau de Nador et Chaabet Maamora, et par la dominance des calcaires au niveau de la bordure sud-ouest de la haute terrasse (unité des travertins). La méthode DRASTIC attribue un poids de 3 au matériau de l'aquifère. Ce paramètre, figurant dans le tableau (tab.33), a un indice égal à 24 sur toute la plaine alluviale de Guelma, sauf pour la partie sud-ouest de l'oued Seybouse où il a une valeur de 18.

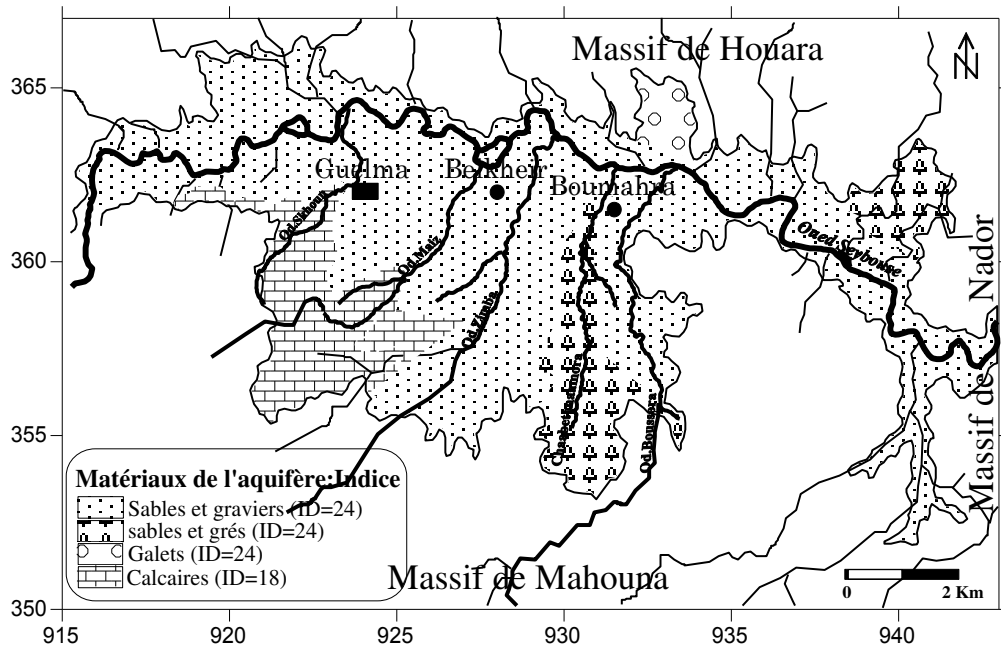


Figure.53 : Carte de répartition des valeurs de l'indice du matériau de l'aquifère.

Tableau. 33 : Cotation du paramètre matériau de l'aquifère.

Matériaux de l'aquifère			
Intervalle	A _C	A _P	A _C .A _P
Sables et grés	8	3	24
Galets et graviers	8	3	24
Calcaires	6	3	18

II.2.3.4.Type de sol (S)

Le sol a un impact sur la frange d'eau qui s'infiltre à travers le sol pour atteindre la nappe d'eau souterraine et donc la migration verticale des polluants à travers la zone non saturée. Ce facteur joue un rôle important quant à la détermination des zones polluées. La carte du type de sol (Fig. 54) montre que les graviers et les galets couvrent la totalité de la surface de la plaine de Guelma. Les lits de calcaire dominant la partie sud-ouest de la plaine. La méthode DRASTIC attribue à ce paramètre un poids de 2. Les indices correspondants sont présentés au tableau (tab.34).

Tableau. 34: Cotation du paramètre type de sol.

Type de sol			
Intervalle	S _C	S _P	S _C .S _P
Galets de calcaires	10	2	20
Galets et graviers	10	2	20

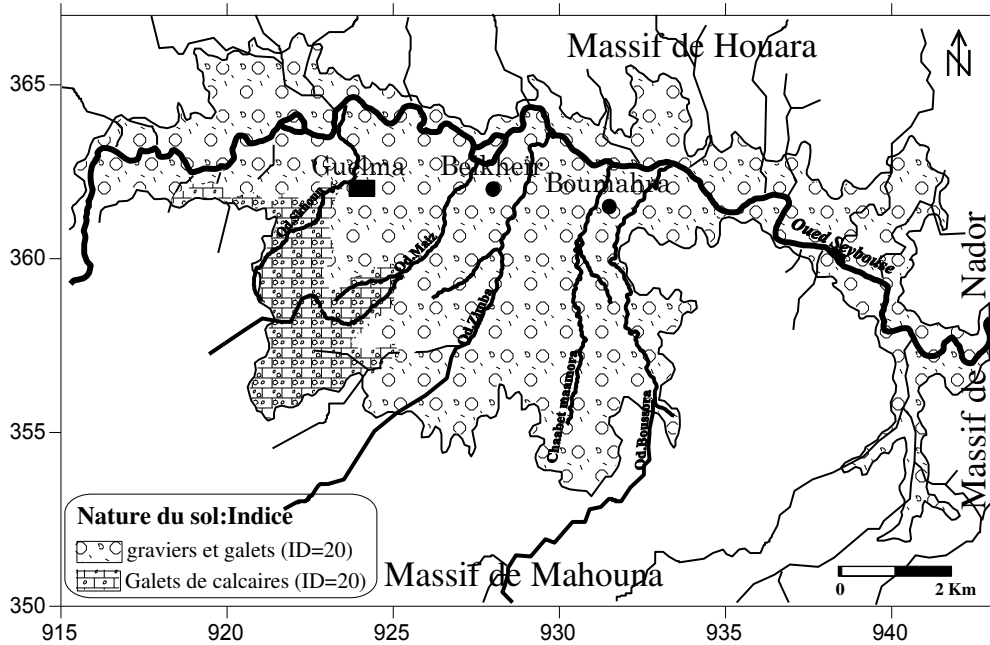


Figure.54: Carte de répartition des valeurs de l'indice du type de sol.

II.2.3.5.Type de sol (T)

La pente du terrain influe directement sur le temps de concentration des polluants. Elle contrôle certains paramètres tels que l'infiltration. L'examen de la carte topographique de la région fait ressortir trois intervalles différents variant de 0-12% (fig. 55). La pente du terrain se voit attribuer un poids très faible (1) par rapport aux autres paramètres. Le système de cotation attribué à la topographie est présenté au tableau (tab.35). Nous remarquons que l'indice correspondant évolue dans le sens inverse de la pente du terrain.

Tableau.35 : Cotation du paramètre pente de terrain.

Intervalle	Pente du terrain (T)		
	T _C	T _P	T _C .T _P
0 – 2%	10	1	10
2 – 6%	9	1	9
6 – 12%	5	1	5

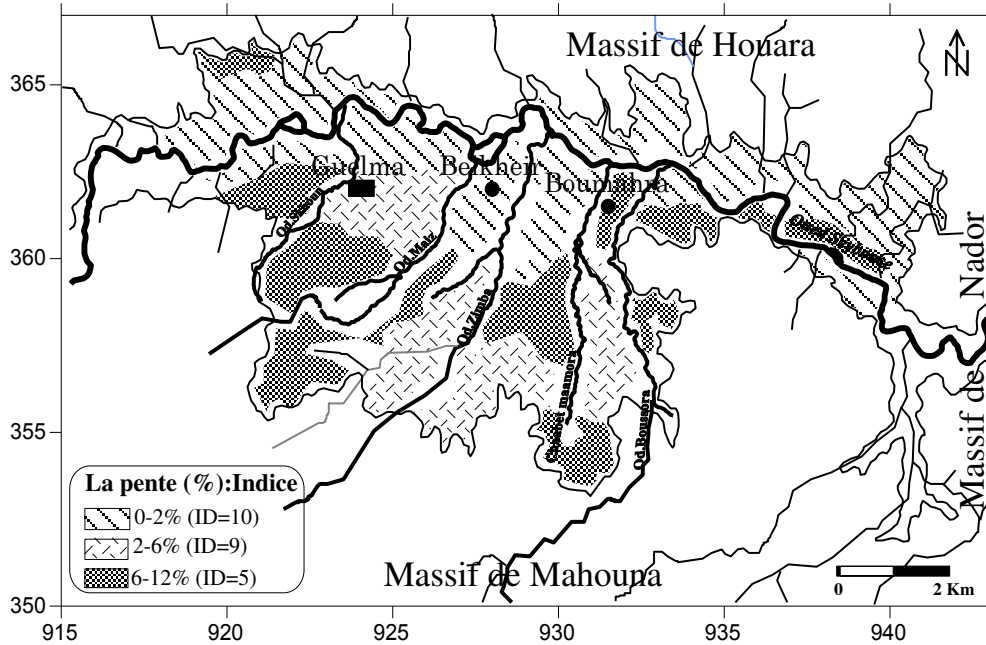


Figure. 55 : Carte de répartition des valeurs de l'indice de la pente de terrain.

II.2.3.5. Impact de la zone vadose (I)

L'impact de la zone non saturée (zone d'aération) est considéré comme étant un paramètre très important par la méthode DRASTIC, avec un poids de 5, car la nature et l'épaisseur de la partie comprise entre la surface du sol et l'aquifère, contrôlent dans une certaine mesure la vulnérabilité à la pollution des réservoirs. La carte de la zone vadose (Fig. 56) montre une domination des sables et des grès qui ont une bonne perméabilité dans la partie nord-est de la basse terrasse (la vallée actuelle). Les argiles occupent la partie sud-est de la plaine et les calcaires dans la partie sud-ouest au niveau de la nappe des travertins. Le tableau (tab.36) donne les indices correspondants.

Tableau. 36 : Cotation du paramètre impact de la zone vadose.

Impact de la zone vadose (I)			
Intervalle	I _C	I _P	I _C .I _P
Argiles sableuses	6	5	30
Calcaires	6	5	30
Sables, grès	6	5	30

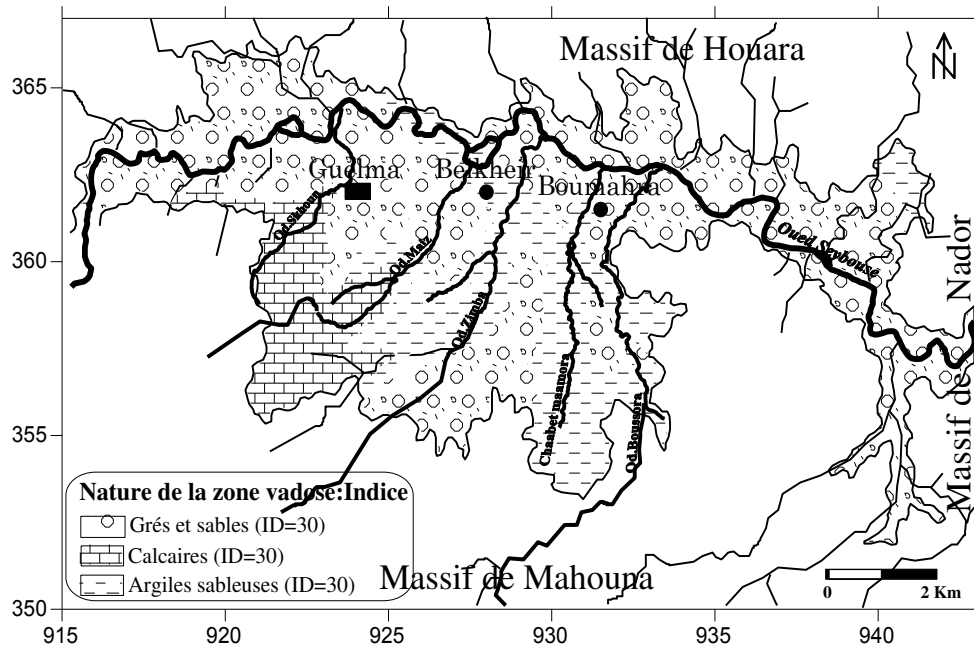


Figure. 56: Carte de répartition des valeurs de l'indice de la nature de la zone vadose.

II.2.3.6. Conductivité hydraulique (C)

La carte du coefficient de perméabilité est établie par les essais de pompage dans les différents forages et par l'interprétation des données géophysiques. Le coefficient de perméabilité traduit la vitesse à laquelle l'eau, transportant le polluant par dispersion, circule dans le sous sol (Bouchnan.R 2015). La méthode DRASTIC attribue un poids moyen de 3 à la perméabilité. Les valeurs de l'indice pour ce paramètre sont reportées dans le tableau (tab. 37). Nous remarquons que la valeur 18 de l'indice est attribuée aux endroits de Nador ; la valeur de 12 est attribuée aux extrêmes est et ouest de la basse terrasse (la vallée actuelle de l'oued Seybouse) ; la valeur 6 de l'indice couvre le centre de la nappe de la moyenne terrasse, ainsi qu'au voisinage des villages de Belkheir et de Boumahra et dans la partie extrême ouest de la nappe et enfin, la valeur 3 de l'indice couvre pratiquement la surface totale de la haute terrasse au niveau de la nappe des travertins (Fig. 57).

Tableau. 37: Cotation du coefficient de perméabilité.

Conductivité hydraulique (m/j) (C)			
Intervalle	C _C	C _P	C _C .C _P
0.04-4	1	3	3
4-12	2	3	6
12-29	4	3	12
29-41	6	3	18

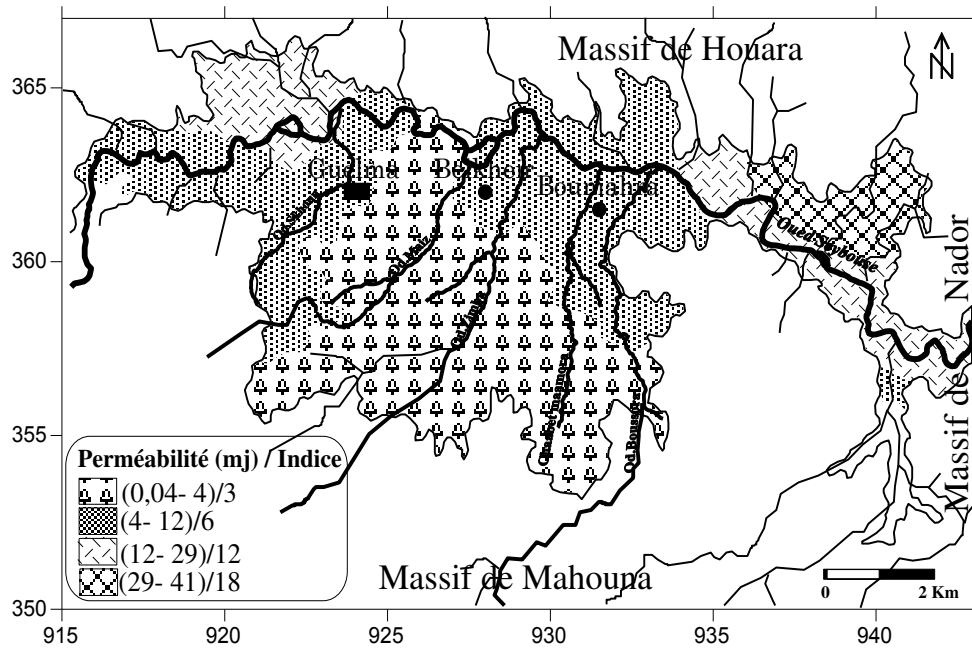


Figure. 57: Carte de répartition des valeurs de l'indice du coefficient de la perméabilité.

II.2.4. Carte globale des indices :

L'application de l'équation (2) :

$$\text{Indice DRASTIC} = Dc.Dp + Rc.Rp + Ac.Ap + Sc.Sp + Tc.Tp + Ic.Ip + Cc.Cp \quad (\text{eq. 2}).$$

En utilisant les indices répartis sur les différentes cartes, nous permet d'obtenir la carte finale des indices (Fig.58), nécessaire à l'établissement de la carte de vulnérabilité de l'aquifère à la pollution (Seghir.2008).

La carte établie, montre que les indices varient entre 62 et 167. Les valeurs les plus faibles oscillent entre 62 et 126 et sont localisées sur la bordure sud-ouest de la haute terrasse, au niveau de la nappe des travertins. Au centre de la nappe des hautes terrasses et à l'extrême est de la moyenne terrasse les valeurs de l'indice oscillent entre 127 et 149, par contre dans la zone de Nador, au Nord de Belkheir et aux alentours de Guelma, les valeurs sont fortes et vont de 150 à 167.

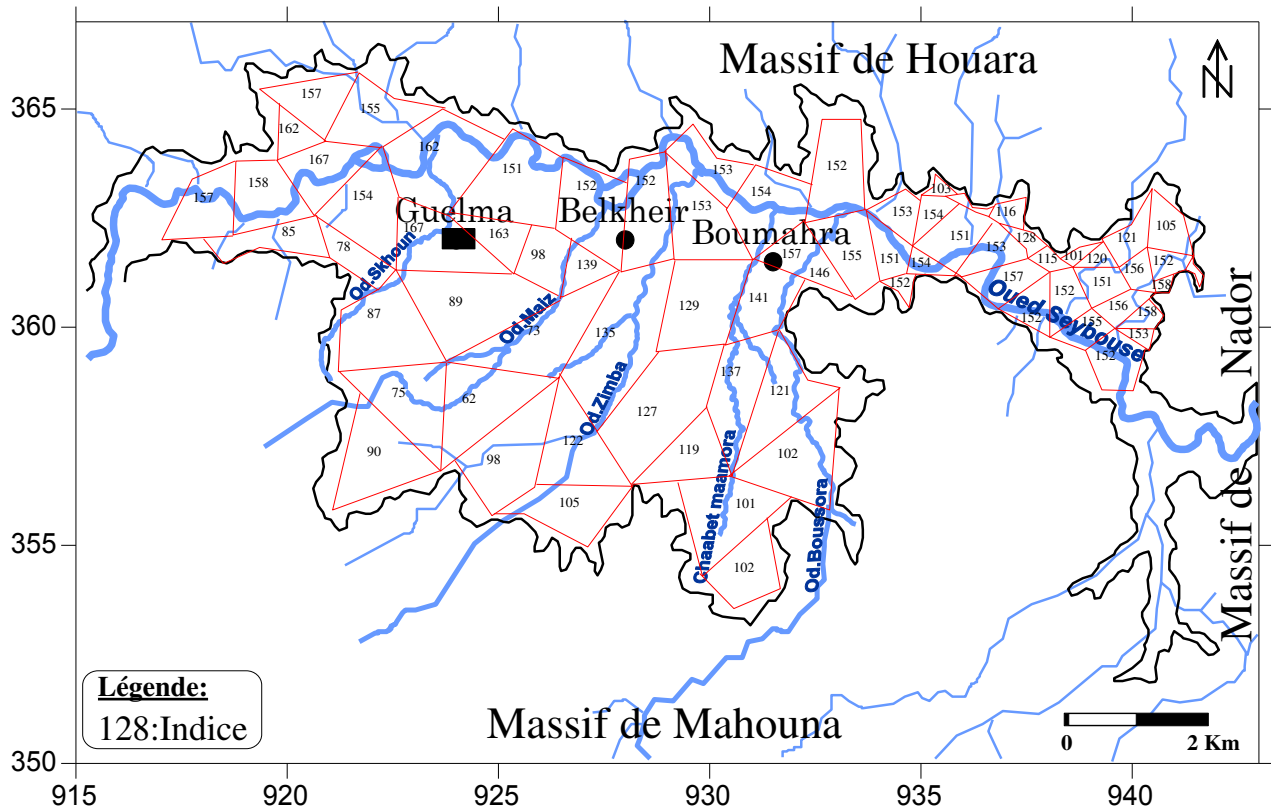


Figure.58: Carte de l'indice DRASTIC.

II.2.5. Carte de la vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC

La carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Guelma permet de visualiser les principales zones à risque qui sont liées à des indices élevés. Selon la méthode DRASTIC, les plages de vulnérabilité, basée selon la classification de l'U.S. Environmental Protection Agency, sont définies comme suit : 1) vulnérabilité faible : $I < 100$; 2) vulnérabilité moyenne : $100 < I < 150$; 3) vulnérabilité forte : $I > 150$.

La lecture de la carte de vulnérabilité (Fig. 59) met en évidence la dominance de la classe 3 ($I > 150$), qui représente une forte vulnérabilité à la pollution aux endroits de Nador, au Nord de Belkheir et aux alentours de Guelma, où la propagation du polluant, à partir de la surface du sol, est facilitée par la perméabilité des matériaux encaissants 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 l'Oued Seybouse, surtout en période sèche. En plus, la faible profondeur des puits et des pentes faibles (3%) avec des terrains quasi-plats favorisent l'infiltration et, par conséquent, la contamination de l'aquifère à ces endroits. Une moyenne vulnérabilité est observée dans la partie extrême nord-est de la moyenne terrasse, au centre de la nappe des hautes terrasses et au également, plus au Sud, au niveau de la limite avec la molasse argilo-gréseuse, là où les ouvrages, captant l'aquifère, y sont profonds et où les

surface totale et se localisent dans les parties extrême et moyenne au nord-est de la moyenne terrasse, au centre de la nappe des hautes terrasses et également plus au Sud, au niveau de la limite avec les molasses argilo-gréseuses. Par contre les zones à forte vulnérabilité, sont plus importantes et couvrent 45% de la surface totale et se situent à Nador, au Nord de Belkeir et aux alentours de Guelma. Le long de l'Oued Seybouse et ses affluents (Oued Maiz, Oued Zimba, Chaabet Maamora).

Les résultats de la méthode GOD, qui est plus simple avec un nombre réduit de paramètres, confirment, avec une certaine marge d'erreur, la répartition de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère, où les zones à forte vulnérabilité occupent 40% de la surface totale le long de l'axe Guelma-Belkeir-Boumahra.

I. Introduction

Afin d'avoir une idée sur le procédé de traitement et la description des différentes étapes du processus d'épuration, ce chapitre traitera les résultats obtenus à travers l'analyse des paramètres physico-chimiques effectué au niveau de la station d'épuration des eaux usées de Guelma. Les analyses ont concerné deux points de prélèvements : l'un à l'entrée de la STEP (1) et l'autre à sa sortie (2).

II. Description de la station d'épuration des eaux usées de Guelma (STEP de la ville de Guelma)

II.1. Localisation

La STEP de Guelma est située sur la route nationale N.21, pont Héliopolis près de l'Oued Seybouse. Elle est fonctionnelle depuis le 18 février 2008 à raison d'un traitement d'environ 32000 m³/jour au temps sec et 43000 m³/jour au temps de pluie.

La station est implantée sur un terrain agricole de 7.8 Hectares avec une capacité de 200 000 équivalent / habitant (L'équivalent par habitant ; c'est une unité de mesure permettant d'évaluer la capacité d'une station d'épuration. Cette unité de mesure se base sur la quantité de pollution émise par personne et par jour.

1 EH = 60 g de DBO₅/jour en entrée station soit 21,6 kg de DBO₅/an.

La directive européenne du 21 mai 1991 définit l'équivalent-habitant comme la charge organique biodégradable ayant une demande biochimique d'oxygène en cinq jours (DBO₅) de 60 grammes d'oxygène par jour.

Elle utilise le procédé de culture libre (boue activée) comme procédé d'épuration.

II.2. Réseau de raccordement

Il faut noter que le réseau d'assainissement de la ville de Guelma est un réseau de type unitaire (Il englobe tout en même temps ; les égouts, les rejets industriels, individuels...etc.). La station reçoit des affluents à partir de deux stations de relevage défini comme suite :

***SP1** : Alimentée par Oued El Maïz, elle ramène des effluents beaucoup plus chargé que SP2, puisque elle est raccordée par les effluents des usines qui se trouve dans la zone industrielle de la ville de Guelma, avec un débit de : 1575m³/h.

***SP2** : Alimentée par Oued Skhoun, ces effluents de rejet des habitants, avec un débit de : 1125m³/h.

II.3. Procédé et capacité de traitement

Le procédé utilisé dans la station est un procédé de culture libre (boue activée), la quantité des boues séchées à une moyenne : 15 724 Kg/jour. Avec une charge nominale de 10 800Kg de DBO par jour.

La station d'épuration est fonctionnelle pour traiter un volume journalier d'eaux usées de 32000 m³/j et un volume maximum journalier temps pluie de 43388 m³/j pour la première phase (perspective 2010).

Pour le long terme il est nécessaire d'augmenter la capacité de traitement, donc de continuer l'aménagement de la galerie existante de Oued Skhoun avec les mêmes dimensions (2.60x3.00) m jusqu'à l'agglomération Bendjerrah.

Tableau. 38 : Capacité de traitement (Younci 2015)

Habitants+Equivalents-habitants	199 086	
Charge de pollution (Kg/j)		mg/l
DBO ₅	10 800	338
DCO	16 000	500
MES	14 000	438
N	-	
P	-	
Volume et débit		
Volume journalier eaux usées (m ³ /j)	32 000	
Volume maximum journalier temps pluie (m ³ /j)	43 388	
Débit moyen temps sec (m ³ /h)	1 333	
Débit moyen temps pluie (m ³ /h)	1 807	
Débit de pointe temps sec (m ³ /h)	2 091	
Débit de pointe temps pluie (m ³ /h)	4 182	

Révision PDAU du groupement de Guelma1-18-07-2010 (DUC Guelma)

II.4. Qualité de l'effluent rejeté

L'effluent traité de la station est débarrassé des sables et matières flottantes et respecte les valeurs limites suivantes :

Tableau.39 : Valeurs limites des eaux usées traitée de la station d'épuration (Younci 2015)

	Par temps sec		Par temps de pluie	
	Valeur moyenne sur 2 heures	Valeur sur 24 heures ⁽¹⁾	Valeur instantanée	Valeur sur 24 heures ⁽¹⁾
DBO₅ (mg/l)	30	20	40	30
DCO (mg/l)	120	90	150	120
MES (mg/l)	30	20	40	30

(1):Échantillons moyens pondérés sur 24 heures.

Suivant l'organigramme de la STEP Guelma, l'exploitation de la station repose sur trois services :

- Service d'exploitation.
- Service d'analyse (laboratoire).
- Service de maintenance.

III.1.Fonctionnement de la station d'épuration des eaux usées avec le procédé de culture libre (boues activées)

Une station d'épuration comprend classiquement plusieurs unités de traitement, placées en série, qui assurent :

- un prétraitement physique de l'effluent,
- une décantation primaire,
- un traitement biologique,
- une décantation secondaire,
- le traitement des boues récoltées dans les bassins de décantation.

Au cours du traitement un laboratoire d'analyse contrôle la qualité des effluents entrant et sortant de la station, ainsi que les paramètres de fonctionnement du procédé.

III.1.1.Le prétraitement physique de l'effluent

Le prétraitement vise à protéger le relèvement des eaux brutes et plus généralement à éliminer tout ce qui pourrait gêner les traitements ultérieurs. Suivant la qualité de l'eau à traiter (Boumedienne 2012). Le prétraitement comporte une succession d'opérations physiques ou mécaniques destinées à séparer les eaux usées des matières volumineuses, en suspension ou flottantes, qu'elles véhiculent, pour extraire le maximum gêne ultérieurement. Donc le traitement primaire au sens strict est un traitement physico-chimique. Il est possible d'ajouter dans l'eau des agents coagulants et flocculants. On peut alors récupérer un grand nombre de particules en suspension par décantation ou flottation. (Boues physico-chimiques). Cette étape permet d'éliminer 90% des particules et objets en suspension (ADEME in MOULIN.S et al. 2013). Elle est commune à une très grande majorité des stations d'épuration. Mais il reste alors dans l'eau tout ce qui y est dissous : éléments azotés, phosphatés, composés actifs et des particules fines. Se rajoutent ensuite aux traitements secondaires voire tertiaires. Ces opérations sont :

III.1.1.1.Le dégrillage

Premier poste de traitement (SAHTOUT 2012) situé à l'arrivée des eaux usées dans la station, l'eau est passée à travers des grilles plus ou moins grossières pour récupérer tous les éléments solides plus gros que les espacements des grilles (papiers, feuilles, objet divers...), charriés par l'eau brute, et qui pourraient endommager les installations situées en aval (pompes, conduites).

L'effluent passe pour cela entre les barreaux métalliques d'une grille dont le nettoyage se fait soit automatiquement (à privilégier pour réduire les interventions humaines), soit manuellement, l'espacement de barreaux varie de 6 à 100 mm et sont placés verticalement ou inclinés de 60 à 80° sur l'horizontale (fig. 60).

Le nettoyage de la grille est généralement mécanique. Il est réalisé par un râteau solidaire d'un chariot qui se déplace de bas en haut le long d'une crémaillère ou entraîné par deux câbles.

Le fonctionnement du dispositif de nettoyage peut être commandé par une temporisation ou/et à partir d'un indicateur de perte de charge différentiel. Les déchets ainsi recueillis, après stockage, ont des destinations variables selon leur nature : mise en charge, incinération.



Figure. 60: Entrée de la STEP de Guelma(Dégrillage).

III.1.1.2.La dilacération

Cette opération consiste à dilacérer les matières solides véhiculées par les eaux. Ainsi réduites, ces matières continuent le circuit du traitement de l'eau, sans être extraites. On supprime ainsi un des problèmes inhérents au dégrillage à savoir celui du devenir des résidus de dégrillage.

En fait, assez rarement utilisée en France (risque de «bouchage» des installations en aval par des fibres textiles ou végétales agglomérées) dans le cadre du traitement des eaux résiduaires, cette opération s'intègre plus volontiers au traitement des boues, en substitution au dégrillage.

III.1.1.3. Le dessablage

Le dessablage a pour but d'extraire des eaux brutes les graviers, les sables et les particules minérales plus ou moins fines, de façon à éviter les dépôts dans les canaux et conduites, ainsi pour protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion et à éviter de surcharger les stades de traitements ultérieurs en particulier les réacteurs biologiques.

L'écoulement de l'eau, à une vitesse réduite, dans un bassin appelé "dessableur" entraîne leur dépôt au fond de l'ouvrage. Les sables récupérés, par aspiration, sont ensuite essorés, puis lavés avant d'être soit envoyés en décharge, soit réutilisés selon la qualité du lavage.

Cette opération concerne les particules minérales de granulométrie supérieure à 100µm. (Metahri. M 2012).

Plusieurs procédés peuvent être utilisés :

- Le dessableur couloir simple : souvent réservé aux petites installations, l'extraction du sable se faisant manuellement :
- Le dessableur circulaire extraction mécanique : le sable collecté est évacué par une pompe le plus souvent :
- le dessableur rectangulaire aéré : particulièrement indiqué pour les débits importants, ce procédé permet d'une part, grâce à l'air insufflé, de séparer les particules de sables matières organiques, d'autre part, d'éliminer les matières flottantes. La récupération du sable peut se faire de diverses façons (raclage vers une fosse de collecte, émulseur d'air, pompe suceuse...).

III.1.1.4. Le dégraissage-déshuilage

Le dégraissage élimine la présence de graisses qui pourraient gêner l'efficacité des traitements biologiques qui suit (fig.61). Le dégraissage s'effectue par flottation. Les graisses sont

raclées à la surface, puis stockées avant d'être éliminées (mise en décharge ou incinération). On enlève ainsi de l'eau les éléments grossiers et les sables de dimension supérieure à 200 microns ainsi que 80 à 90 % des graisses et matières flottantes (soit 30 à 40 % des graisses totales).



Figure.61 : Entrée de la STEP de Guelma (dégraissage-déshuilage).

III.1.1.5. La neutralisation

La neutralisation d'un effluent consiste à ramener son pH (par acidification ou par alcalinisation) à une valeur fixée en fonction des besoins. En effet, suivant l'utilisation de l'effluent la valeur du pH peut sensiblement varier.

III.1.1.6.L'évacuation et le traitement des sables et refus

Qu'il s'agisse du dégrillage, du dessablage ou du déshuilage de dégraissage, le traitement primaire a pour corollaire la récupération de déchets dont il convient d'assurer l'élimination. Les refus de dégrillage peuvent être envoyés en décharge, enterrés ou incinérés. Les sables récupérés peuvent être lavés avant stockage et éventuelle réutilisation (lits de séchage).

III.1.2. La décantation primaire

Elle permet de retirer des eaux usées les matières décantables qu'elles contiennent encore. Dans ce cas, la séparation qui s'effectue par gravité ne concerne que les particules de diamètre supérieur à 100 micromètres. Celles de diamètre inférieur à 100 micromètres ne décantent pas, mais seront entraînées vers les unités ultérieures de traitement (fig.62).

Les bassins de décantation sont des bassins à ciel ouvert, le plus souvent cylindriques. L'effluent brut arrive par un point central. Les matières décantables en suspension dans l'eau

vont se séparer de l'effluent et se déposer au fond du bassin où elles seront raclées par un pont radial tournant. Les eaux de surface sont déversant.

Les matières décantables ainsi obtenues par séparation de l'effluent les boues dites «primaire», qui sont récupérées et orientées vers le traitement des boues.

Au terme de ce prétraitement essentiellement mécanique, les eaux usées sont dépourvues de la quasi-totalité des particules en suspension qu'elles contenaient et peuvent subir le traitement biologique.



Figure. 62 : Bassin de décantation primaire (décanteur).

III.1.3. Le traitement biologique

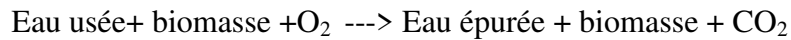
Dans la grande majorité des cas, l'élimination des pollutions carbonées et azotées s'appuie sur des procédés de nature biologique, basés sur la croissance de micro-organismes aux dépens des matières organiques "biodégradables" qui constituent pour eux des aliments (Metahri.M 2012).

Les principes de fonctionnement diffèrent suivant que l'objectif est de traiter le carbone ou le carbone et l'azote et/ou le phosphore : en pratique, il s'agit de permettre la sélection des espèces de bactéries capables soit de transformer le carbone en CO_2 , soit de transformer l'azote en nitrates puis les nitrates en azote gaz (N_2), soit de stocker le phosphore. Les bactéries ne sont pas fixées sur un support mais elles sont dispersées dans l'eau usées: on parle de cultures libres.

A-L'élimination du carbone

L'élimination du carbone des matières organiques se fait dans un bassin d'aération. Les bactéries se multiplient dans des bassins alimentés d'une part en eaux usées à traiter et d'autre

part en oxygène par des apports d'air. Les bactéries, en suspension dans l'eau des bassins, sont donc en contact permanent avec les matières polluantes dont elles se nourrissent et avec l'oxygène nécessaire à leur assimilation. Elles transforment les matières organiques en CO₂ et H₂O. Elles forment des amas en suspension dans l'eau appelés "flocs" dont l'accumulation donne des boues.



La technique de traitement biologique appliquée dans la STEP du Guelma est le procédé des boues activées.

B-L'élimination de l'azote

L'élimination de l'azote par voie biologique consiste à oxyder l'azote ammoniacal en azote nitreux puis en azote nitrique en milieu aérobie, puis à réduire les nitrites en azote gazeux en zone anoxie. Les différentes étapes sont :

- **l'assimilation**

C'est l'utilisation d'une partie de l'azote ammoniacal et éventuellement organique pour la synthèse bactérienne. Les besoins de celle-ci sont de l'ordre de 5% de la DBO₅ éliminée par la culture bactérienne.

- **La Nitrification**

La nitrification est l'oxydation de l'azote ammoniacal en nitrites, puis en nitrates après transformation de l'azote organique en azote ammoniacal (ammonification) (Ladjel et al, 2009). Elle s'effectue en deux stades par micro-organismes autotrophes :

*Oxydation de (NH₄⁺) en (NO₂⁻) : c'est l'œuvre essentiellement des germes Nitrosomonas,

*Oxydation de (NO₂⁻) en (NO₃⁻) : Les bactéries responsables de cette deuxième réaction, appartiennent aux germes Nitrobacter.

La réaction globale simplifiée de la nitrification peut s'écrire :



La nitrification demande des besoins en oxygène supplémentaire. Il faut fournir 4,6 mg d'oxygène par mg de (NO₃⁻) produit (Boumediene 2013).

- **La Dénitrification**

C'est une réaction des nitrites en azote gazeux qui retourne ainsi sous sa forme primitive dans l'atmosphère. Cette réduction se fait par l'intermédiaire de bactéries anaérobies facultatives

hétérotrophes qui en cas de carence du milieu en oxygène ont la propriété d'utiliser l'oxygène combiné de certains composés chimiques et notamment des nitrites réduits alors en azote gazeux

C-L'élimination de phosphore

Le principe de la déphosphatation biologique repose sur l'aptitude de certains micro-organismes présents dans la station à relarguer leur réserves en phosphore lorsque les conditions de vie sont difficiles (le phosphore est alors évacué de la cellule) et à reconstituer des réserves au maximum lorsque les conditions redeviennent favorables. Ces conditions défavorables puis favorables sont créées par l'établissement d'une zone anaérobie suivie d'une zone aérobie. Le phosphore se retrouve finalement concentré dans les boues, le rendement se situe entre 60% et 80% (Chaouch.A 2013).

Les différentes étapes de la déphosphatation biologique sont :

- **La zone anaérobie**

- 1- Synthèse à partir de la pollution carbonée facilement utilisable de polymères qui seront stockés dans les cellules.
- 2- Relargage de phosphore lié à la consommation de l'énergie stockée sous forme de polyphosphates pour la réaction précédente.

- **La zone anoxie ou aérée**

Oxydation des polymères organiques avec production d'énergie stockée par la synthèse des poly phosphates.



Figure. 63: Bassin d'aération. (STEP Guelma 2016)

III. 1.4. La décantation secondaire

La séparation des boues formées a lieu dans un décanteur (ou clarificateur). La masse biologique ainsi récupérées constitue les boues secondaires dont une partie est évacuées vers le traitement des boues, tandis que l'autre est recyclée pour maintenir une masse biologique suffisante pour l'épuration (fig.64).



Figure.64 : Bassin de décantation secondaire(Clarificateur).

III.1.5. Les lits de séchage

Ce procédé est très largement utilisé en Europe dans les stations d'épuration de petite capacité, pour des raisons d'hygiène et afin de ne pas créer des odeurs désagréables, on utilise les lits de séchage pour des boues très minéralisées issues d'une station d'épuration totale ou d'un dispositif de digestion des boues (fig.65).

On introduit la boue dans des bassins peu profonds contenant des graviers et du sable munis d'un système de drainage, la déshydratation des boues s'opère en fait de deux façons : d'une part, par infiltration de l'eau à travers le milieu filtrant et élimination par les drains et d'autre part, par évaporation, le rendement de ces lits de séchage dépend de la nature des boues et des conditions climatiques du lieu. La boue sèche ainsi obtenue va utilisée pour l'agriculture. Il arrive souvent qu'un début de végétation croisse au cours de séchage (Jamonet, 1987).



Figure.65 : les lits de séchage.

III. 1.6. Désinfection

Les traitements primaires et secondaires ne détruisent pas complètement les germes présents dans les rejets domestiques. Des procédés d'élimination supplémentaires sont donc employés lorsque les eaux traitées sont rejetées en zone de baignade, de pisciculture ou d'élevage de coquillages, réutilisation d'effluents à des fins d'irrigation comme le cas d'effluent de la STEP Guelma (fig.66).



Figure.66: Sortie de la STEP (bassin de désinfection).

Les germes pathogènes présents dans les effluents sont très divers ; ils restent cependant peu nombreux par rapport aux germes d'origines tellurique et fécale non pathogènes qui les

accompagnent. L'évaluation du risque de contamination et l'efficacité de la désinfection sont donc généralement appréhendées via le dénombrement de germes indicateurs (coliformes totaux, coliformes fécaux, streptocoques fécaux). Dans les effluents secondaires, après traitement par boues activées, on dénombre généralement 10^5 à 10^8 coliformes totaux par 100ml, 10^4 à 10^7 coliformes fécaux par 100 ml et 10^4 à 10^6 streptocoques fécaux par 100 ml. Selon la qualité de milieu récepteur, on cherche à atteindre, lors de l'étape de désinfection, une diminution moyenne pour chacun des germes indicateurs de 3 à 4 unités logarithmiques par 100 ml.

Les procédés de désinfection les plus couramment mis en œuvre font appel au chlore ou à ses dérivés, à l'ozone ou au rayonnement ultraviolet.

✚ L'utilisation du chlore est la plus ancienne mais elle présente des contraintes de transport et de manutention. Pour agir correctement, le chlore impose d'une part que l'eau soit préalablement bien épurée et, d'autre part, qu'un temps de contact de 30 minutes soit respecté. Le chlore se combine à l'ammoniac contenu dans l'eau pour former des chloramines qui deviennent alors l'agent désinfectant.

Si le chlore est peu onéreux et donne de bons résultats sur les bactéries, il s'avère cependant peu efficace sur le virus. Les doses habituellement adoptées se situent entre 5 et 10 g/m^3 de chlore.

✚ Dérivé de chlore, le dioxyde de chlore (ClO_2) peut être produit directement sur le site. Plus puissant que le chlore en termes d'efficacité désinfectantes, il agit directement sur les germes pathogènes. Toutefois, sa mise en œuvre est très délicate et nécessite une surveillance continue et permanente.

✚ L'ozone offre un large spectre d'action. Il est efficace aussi bien contre les virus que contre les bactéries et agit avec un temps de contact de courte durée (10 min). Produit sur site, il nécessite pour son exploitation du personnel qualifié.

Les doses habituellement adoptées se situent entre 2 et 5 g/m^3 d'ozone.

✚ La désinfection aux ultraviolets tend à se développer de façon plus intense car elle présente un certain nombre d'avantages comme des temps de contacts très courts, pas d'utilisation de produits chimiques, une bonne efficacité sur les bactéries et sur les virus.

Le principe d'action des UV repose sur le fait que les rayons ultraviolets sont des ondes électromagnétiques qui correspondent à une gamme de longueur d'onde comprise entre 100 et

400 nm. L'absorption de ces rayons par les micro-organismes provoque une modification de leur ADN qui bloque toute réplication du matériel génétique et engendre leur mort.

Il existe de lampes basse tension qui émet des UV sur la longueur d'ondes de 254 nm. Elles ont un rendement énergétique optimal (27 à 32 %) mais sont mal adaptées aux gros débits (grand nombre de lampe, nettoyage manuel...) ou à une dégradation de la qualité de l'eau brute. La puissance de ces lampes varie entre 100 et 300 W.

Les lampes moyenne tension émettent sur plusieurs longueurs d'onde mais sont bien adaptées aux gros débits. Elles compensent leur moins bonne efficacité énergétique par le maintien d'un pouvoir de transmission UV élevé, par l'automatisation du lavage et par de l'effluent à traiter. La puissance des lampes varie selon les techniques entre 3 kW et 16 kW.

III. 2. Méthodes et Points de prélèvements

III.2.1. Méthode de prélèvements

Les analyses physico-chimiques ont concernés les paramètres suivant : T°C, pH, la conductivité électrique, les matières en suspension (MES), la DB0₅, la DCO, les nitrates, les nitrites, les ortho-phosphates et l'ammonium. Les échantillons d'eau ont été prélevés à l'aide des bouteilles en plastique préalablement rincées avec l'eau de la station. Ils ont été ensuite conservés à une température de 4°C°, puis ont été analysés dans les 24 heures.

III.2.2. Point de prélèvement

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate auquel il faut apporter le plus grand soin. Il conditionne les résultats et l'interprétation des données. Les analyses physicochimiques ont été effectuées au niveau du laboratoire de la station d'épuration de Guelma à partir du mois de Septembre 2014 jusqu'au mois de Mars 2016 sur deux points un à l'entrée et l'autre à la sortie de la STEP.

III.3.Résultats d'analyses physico-chimique

III.3.1.Le potentiel Hydrogène (PH)

Le pH est un facteur important qui influence directement sur la prolifération des microorganismes dans l'eau. Ces dernières vivent normalement à un pH voisin de la neutralité. Il peut être aussi influencé par d'autres facteurs tels que la température.

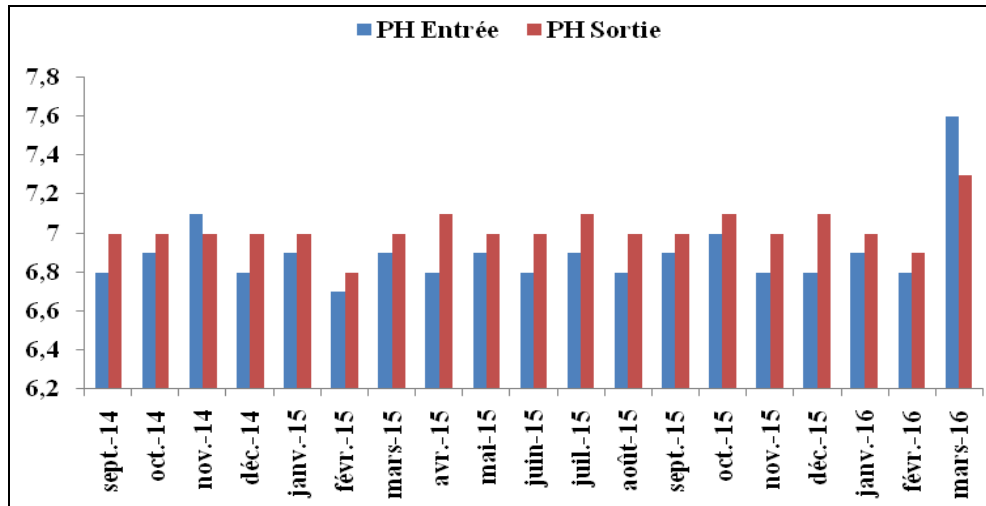


Figure .67 : Evolution temporelle du pH mesuré à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma

Les valeurs du pH de l'eau usée brute sont comprises entre 6,7 et 7,6 donc légèrement alcalin ce qui confirme selon (Rejsek .2002) que l'effluent est d'origine urbaine. Les valeurs enregistrées à la sortie de la station sont comprises entre 7,24 et 7,63(fig. 67). Elles restent toujours dans les normes fixées à un maximum de 8,5. On note une légère différence entre le pH de l'eau traitée et celui de l'eau usée brute, ceci est due probablement aux réactions chimiques et/ou biologiques qui produisent des ions acides ou qui consomment des ions basiques, d'ailleurs les réactions de nitrification entraînent une acidification du milieu.

III.3.2.La température (T°C)

En effet, la température est un facteur climatique très important qui à une grande influence sur les propriétés physico chimiques des eaux. Les températures moyennes enregistrées au niveau de la station d'épuration sont inférieures à la norme fixée par l'OMS (30°C) et cette dernière, considérée comme une valeur limite des rejets directs dans le milieu récepteur.

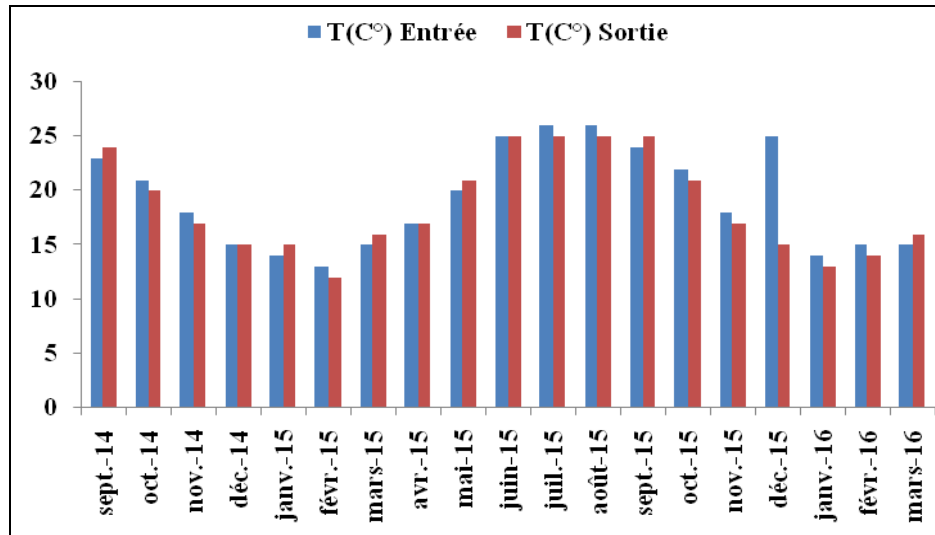


Figure .68 : Evolution temporelle de la température à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma

Les différentes valeurs de température sont liées aux conditions climatiques. A l'entrée et à la sortie de la STEP, Les valeurs sont très proches (fig.68). Avec une légère augmentation de la température de l'eau brute probablement liée à la température des conduits acheminant les eaux usées vers la station.

III.3.3.La conductivité électrique (CE)

C'est la capacité de l'eau à conduire le courant. Elle renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau, c'est-à-dire qu'elle traduit la présence d'ions dans l'eau brute.

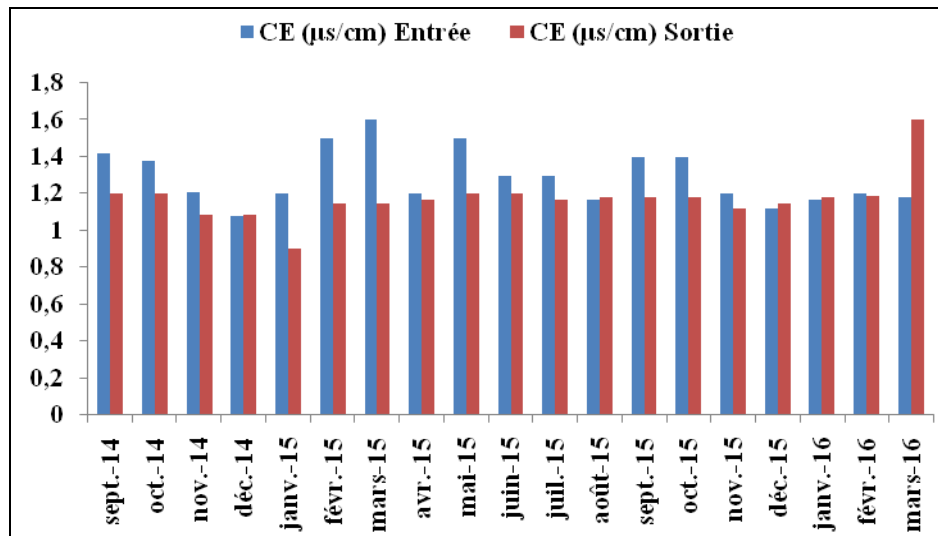


Figure .69: Evolution temporelle de la conductivité électrique à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma

La figure ci-dessus (fig. 70). révèle que l'eau brute possède une gamme de conductivité qui varie dans l'intervalle 1,08-1,6 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Par contre pour l'eau traitée, cette conductivité oscille entre 0,9 et 1,2 $\mu\text{s}/\text{cm}$, avec un pic distingué au mois de Mars 2016. Cette légère diminution pourrait être expliquée par la sédimentation des sels minéraux dans le décanteur qui se sont concentrés dans les boues.

III.3.4. Les matières en suspension (MES)

Les matières en suspension, représentent l'ensemble des particules minérales et organiques contenues dans les eaux usées. La connaissance de la concentration des éléments colloïdaux dans les eaux usées est nécessaire dans l'évaluation de l'impact de la pollution sur le milieu aquatique.

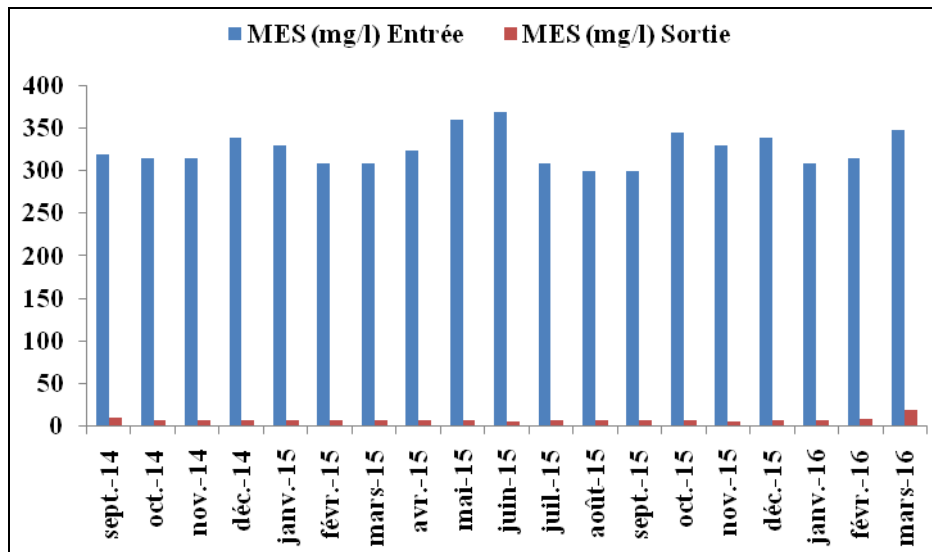


Figure 70 : Evolution temporelle des MES mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma

Selon le graphe ci-dessus (fig.70) on observe que les valeurs de MES diminuent de l'entrée à la sortie de la station. Les valeurs des MES à l'entrée de la station varient entre 300 et 370 mg/l. Selon (Baumont.S, 2005) le maintien d'une concentration importante en MES dans les eaux usées gêne considérablement l'efficacité des traitements destinés à éliminer les germes pathogènes.

La concentration à la sortie varie entre 6 mg/l et 19 mg/l avec une moyenne de 8,15 mg/l. Cette valeur reste inférieure à la norme de rejet de l'OMS (30 mg/l) et à celle de l'OMS appliquée en l'Algérie (35 mg/l). Cette diminution est due à la sédimentation des particules au niveau du clarificateur. Ces résultats confirment l'efficacité du clarificateur de la STEP.

III.3.5. La demande biochimique en oxygène DBO5

La DBO5 est un paramètre très significatif et révélateur pour l'appréciation de la qualité des eaux. La figure (fig.71) représente la variation de la demande biologique en oxygène (DBO5) de l'eau brute et de l'eau traitée. La valeur maximale enregistrée à la sortie de la STEP est de l'ordre de 29 mg/l O₂ en mars 2016, celle indique que le traitement biologique effectué sur l'eau est acceptable selon la norme Algérienne qui exige une DBO5 inférieur à 25 mg/l O₂.

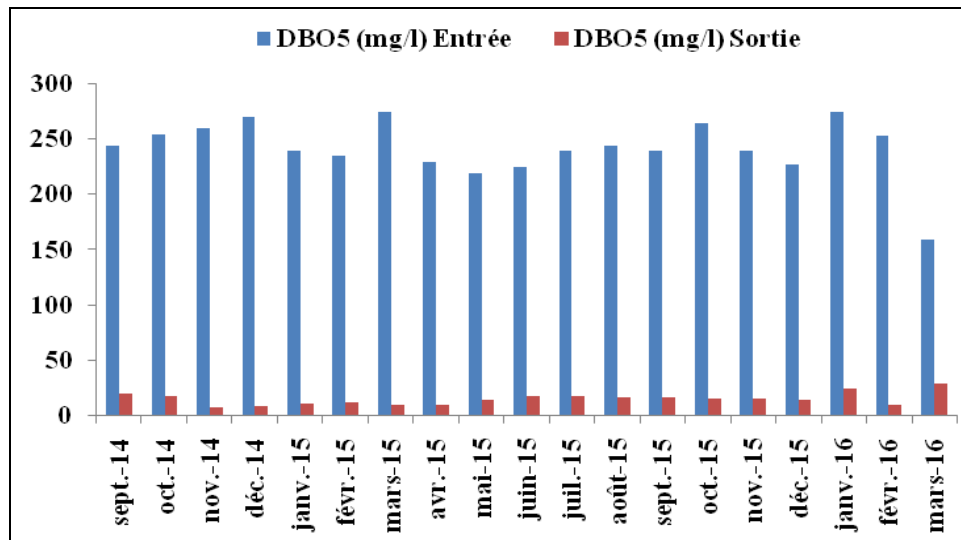


Figure 71 : Evolution temporelle de la DBO₅ mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma

En examinant les résultats de la figure (fig .72), il ressort que l'eau brute à l'entrée de la station présente une DBO5 instable dans le temps et qui varie de 160 à 275 mg/l. Cette instabilité est due à la variabilité de la pollution organique véhiculée par l'effluent. Après épuration, les teneurs de la DBO5 diminuent de façon remarquable. Elles sont comprises entre 8 et 30 mg/l, soit au dessous la norme de rejet qui est de 30 mg/l.

III.3.6. La demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO permet d'apprécier la concentration en matières organiques ou minérales, dissoutes ou en suspension dans l'eau, au travers de la quantité d'oxygène nécessaire à leur oxydation chimique totale.

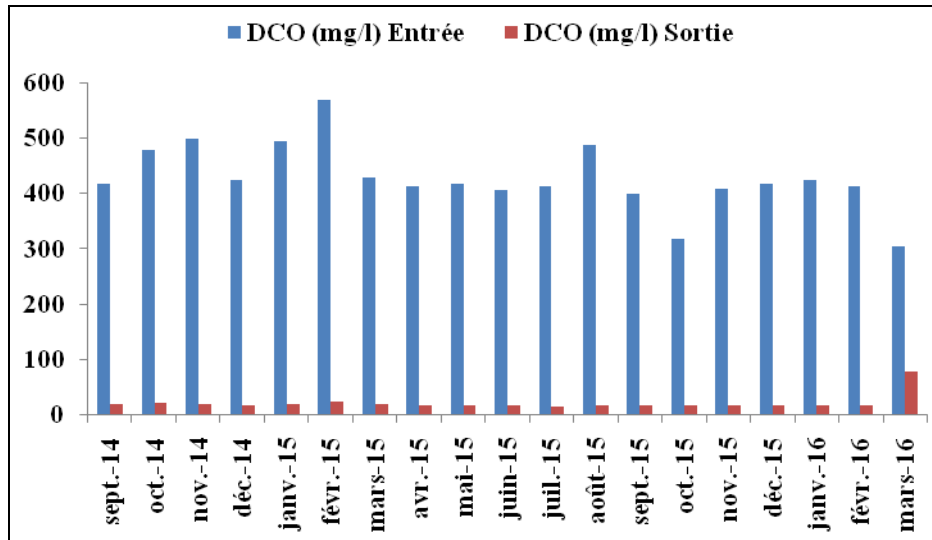


Figure 72: Evolution temporelle de la DCO mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.

Les valeurs de la DCO montrent une nette baisse de l'entrée à la sortie de la station (fig.72). On note un maximum de 570 mg/l, pendant l'entrée, lors des prélèvements de Février 2015. L'évolution de ce paramètre après l'épuration marque une chute des valeurs notamment pendant le prélèvement du mois de juillet 2015 d'un ordre de 16 mg /l. Cette diminution des teneurs est causée d'une part par l'élimination de la matière minérale lors des procédés de prétraitement et d'autre part par la dégradation de la matière organique par les microorganismes.

Ces valeurs sont conforme à la norme des rejets (120 mg/l), donc une grande concentration a été éliminé par ces procédés car il y'a une dégradation importante de la charge polluante.

III.4. Nitrification, dénitrification au niveau de la station d'épuration

III.4.1. Définitions

✚ La nitrification

La nitrification biologique consiste en l'oxydation de l'ammonium présent dans les eaux polluées en nitrate pendant la phase d'aération. Cette étape de nitrification s'effectue en deux

phases successives : Phase nitritation avec la transformation du NH_4^+ (azote ammoniacal) en NO_2^- Phase nitratisation avec la transformation des nitrites (NO_2^-) en Nitrates (NO_3^-). L'étape de la nitratisation est plus rapide que la nitritation ce qui engendre la disparition rapide des nitrites.

✚ La dénitrification :

En l'absence d' O_2 , la dénitrification est la réduction par les microorganismes des nitrates en azote moléculaire (N_2) donc en gaz qui retourne à l'atmosphère. Généralement la nitrification/ dénitrification se passent dans le même bassin avec alternance des phases aération/non aération. Il s'agit d'un procédé biologique qui consiste à la réduction du nitrate en azote gazeux. La dénitrification est d'une grande importance écologique puisqu'il s'agit de la voie majeure de la perte d'azote fixé dans l'environnement. Elle occupe donc une place importante dans le bilan de l'écosystème à l'échelle globale. La dénitrification est aussi un mode respiratoire qui permet aux bactéries anaérobies facultatives de continuer à minéraliser du carbone organique en l'absence d'oxygène moléculaire. Dans cette respiration, les oxydes d'azote sont réduits depuis la forme nitrate jusqu'aux formes gazeuses de l'azote : N_2 , NO_2 , NO , via le nitrite. Les bactéries dénitrifiantes influencent donc à la fois le cycle du carbone et celui de l'azote, et leur impact varie en fonction de la tension locale en oxygène.

III.4.2. Les nutriments

III.4.2.1. Les nitrates NO_3^-

Les nitrates sont en effet l'élément chimique majeur qui conditionne la vie des microorganismes dans l'eau, les nitrates ont toujours besoin d'une source azotée pour la synthétiser et structurer leurs protéines.

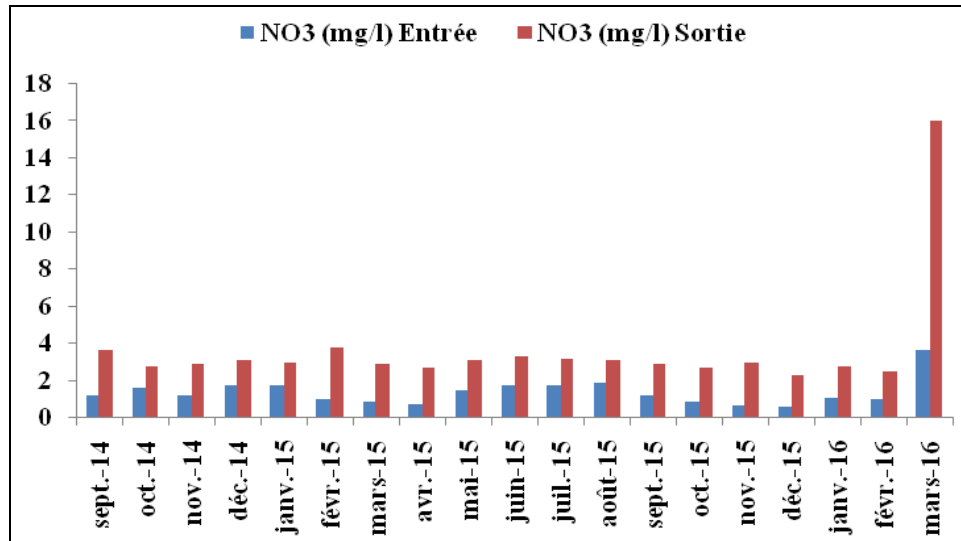


Figure. 73 : Evolution temporelle de nitrate mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.

D'après les résultats de la concentration en NO_3 a l'entrée et a la sortie de la STEP de Guelma durant la période de prélèvement (fig.73) , on remarque que les nitrates sont en quantités faibles dans l'eau usée ne dépassent pas 3,7mg/l, autrement dit, la quantité de la pollution azotée est élevée, mais après le traitement le nitrate augmente avec un maximum de 16 mg/l a cause de la nitrification ce qui signifie que le taux d'oxygène dissous dans le bassin d'aération est suffisant.

III.4.2.2.Les Nitrites (NO_2)

L'ion nitrite est la principale forme d'azote inorganique, trouvée dans les eaux. Il s'oxyde facilement en ion nitrate et se retrouve ainsi rarement en concentration importante dans les eaux. Les nitrites instables ne se maintiennent que lorsque le milieu, n'est pas suffisamment oxydé, leur présence indique un état critique de pollution organique.

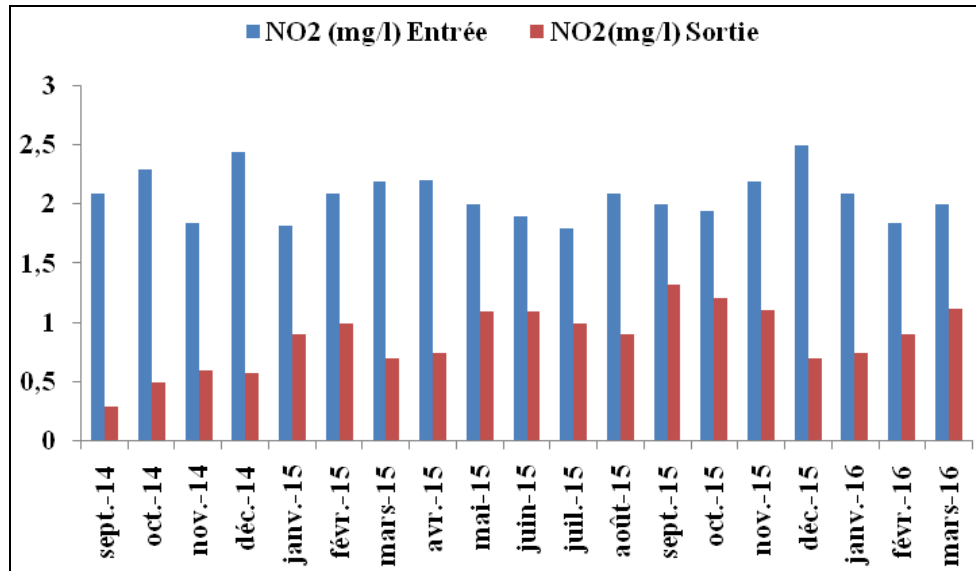


Figure. 74 : Evolution temporelle de nitrite mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.

L'analyse de l'ion nitrite dans les eaux usées de la station montre une évolution plus ou moins régulière avant et après épuration (fig.74). A l'entrée de la station, les concentrations en nitrite oscillent entre 1,8 et 2,5 mg/l, puis diminuent après épuration variant de 0,3 à 1,32 mg/l ce qui est due probablement aux deux processus :

- L'oxydation incomplète de l'azote ammoniacal, (nitrification incomplète).
- La réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiant.

III.4.2.3.L'Azote ammoniacal NH_4^+

Pourriot et Meybek (1995), considère que les eaux ont une teneur de l'ordre de 0,015mg/l en NH_4 . En général une eau bien oxygénée ne contient que des traces d'ammonium. Les sites pollués par la matière organique sont aussi pollués par l'ammonium dont les teneurs augmentent avec l'augmentation de la température et avec la diminution de l'oxygène dissous.

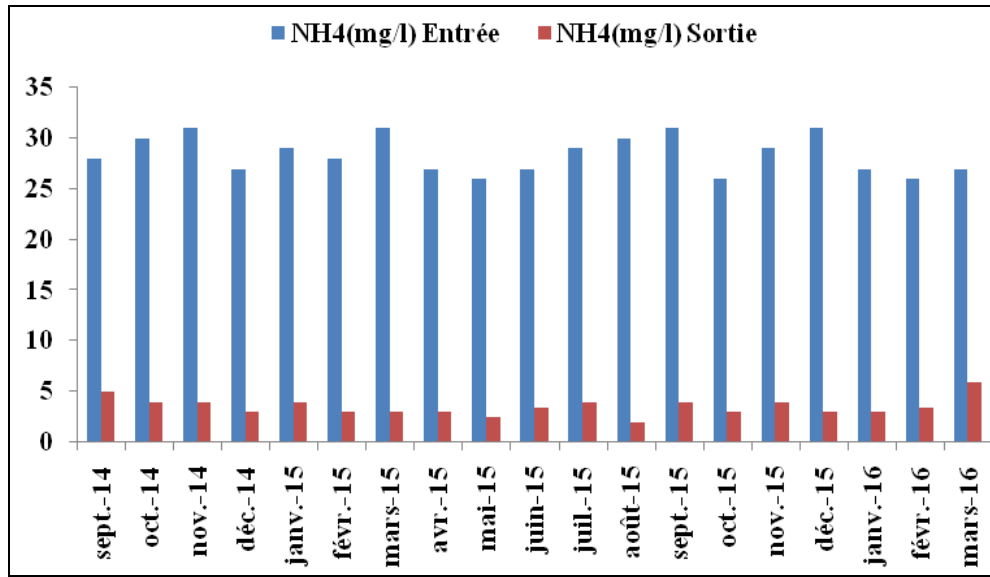


Figure.75 : Evolution temporelle de l'ammonium mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.

Selon les résultats présentés sur la figure (fig.75), on remarque que la concentration de l'azote ammoniacal dans l'eau brute varie entre 26 mg/l à 31 mg/l avec une moyenne de 28,42 mg/l alors qu'à la sortie, la valeur oscille entre 2 mg/l et 6 mg/l avec une moyenne de 3,59 mg/l.

L'azote ammoniacal rencontré dans les eaux usées épurées, et dont la présence est normalement ne doit pas dépasser la norme de rejet (5 mg/l), traduit habituellement un processus de dégradation incomplète de la matière organique lorsque la teneur en oxygène est insuffisante pour assurer sa transformation. Cela explique l'élévation de la teneur en NH_4^+ de l'eau usée avant le traitement.

III.4.2.4.L'ortho phosphate (OPO_4)

L'accroissement des flux de phosphore dans les eaux de surface résulte de l'intensification de la l'accroissement démographique et des activités agricoles dans les bassins versants (Pilleboue, 1987). La pression démographique est à l'origine des sources ponctuelles alors que l'activité agricole crée les sources diffuses. La présence des phosphates dans les eaux usées entraîne un développement massif d'algues qui caractérisent le phénomène d'eutrophisation. Dans les eaux usées, la part des rejets humains ne présente que 30 à 50% du

phosphore total (entre 5 et 20mg/l), le reste provenant des produits de nettoyages (Rodier, 1984). Cela explique les teneurs élevées perçues dans les prélèvements des eaux usées.

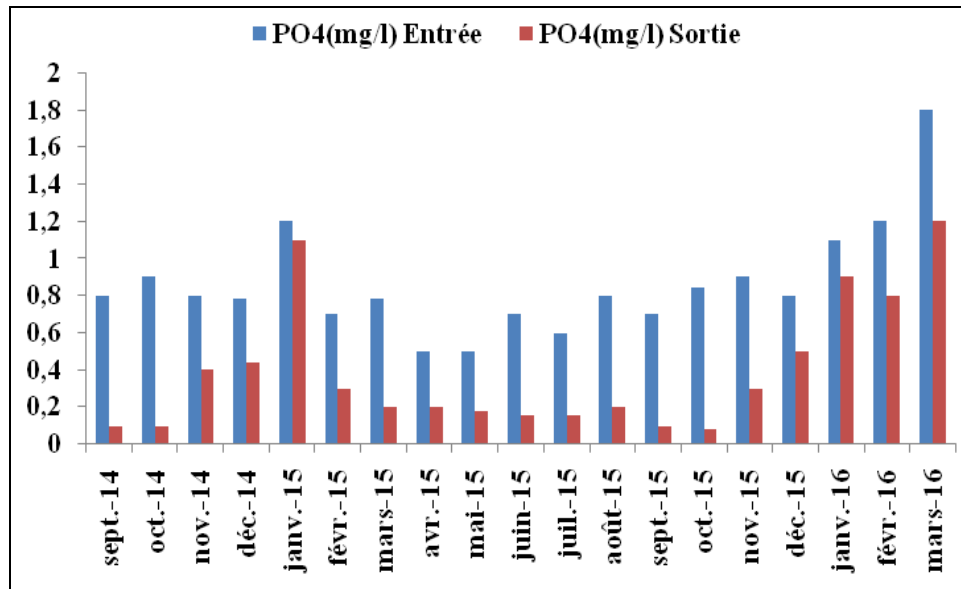


Figure.76: Evolution temporelle de l'Orthophosphate mesurée à l'entrée et à la sortie de la STEP de Guelma.

D'après les résultats obtenus, les valeurs en (PO_4^{3-}) varient de 0,5mg/l à 1,8mg/l au niveau des eaux brutes d'entrée de la STEP. Concernant les eaux épurées, les concentrations oscillent entre 0,08mg/l à 1,2mg/l (fig.76). la valeur moyenne en orthophosphates des eaux traitées (0,41mg/l) est inférieure à celle enregistrée dans les eaux brutes (0,89mg/l).

Les valeurs des Orthophosphates (PO_4^{3-}) restent au dessous de la norme de rejet fixée (10 mg/l). Le phosphate échappe en grande partie au traitement des stations d'épuration biologique, et la diminution des valeurs moyennes en phosphates à l'entée de la station (0,89mg/l) vers la sortie (0,41mg/l) est due à sa consommation par les bactéries au cours des processus d'épuration.

III.4.2.4.L'ortho phosphate (OPO₄)

Dans le tableau ci-dessous figurent les moyennes des résultats d'analyses effectuées pendant une durées de 19 mois (de septembre 2014 jusqu'au mars 2016). On a pris en considération la moyenne des points à l'entrée de STEP (1) et la moyenne des points de sa sortie (2), pour toute la période de 19 mois.

Tableau.40: Qualité des eaux de la STEP entrée et sortie (Sep.2014-Mars 2016)

Points de prélèvement	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ²⁻
P1	28,42	2,07	1,39	0,89
P2	3,59	0,87	3,67	0,41

- ✚ L'ammonium, les nitrites et les phosphates diminuent considérablement de l'entrée à la sortie de STEP.
- ✚ Les nitrates au contraire augmentent de l'entrée vers la sortie de la STEP, ceci s'explique par le fait que l'action de dénitrification n'est pas réalisée convenablement.

IV. Performances de fonctionnement de la station

Afin d'évaluer les performances de l'épuration des eaux usées au niveau de la STEP de Guelma, on présente dans ce travail, l'abattement des principaux paramètres de pollution : DBO₅, DCO et MES au niveau de cette station durant la période de fonctionnement allant du mois de septembre 2014 jusqu'au mois de mars 2016.

IV. 1.Variation de la DBO₅

L'abattement de la DBO₅ atteints après traitement est 92 % (fig.77). Sauf pour le mois de mars 2016 le rendement moyen d'abattement est de 81%.

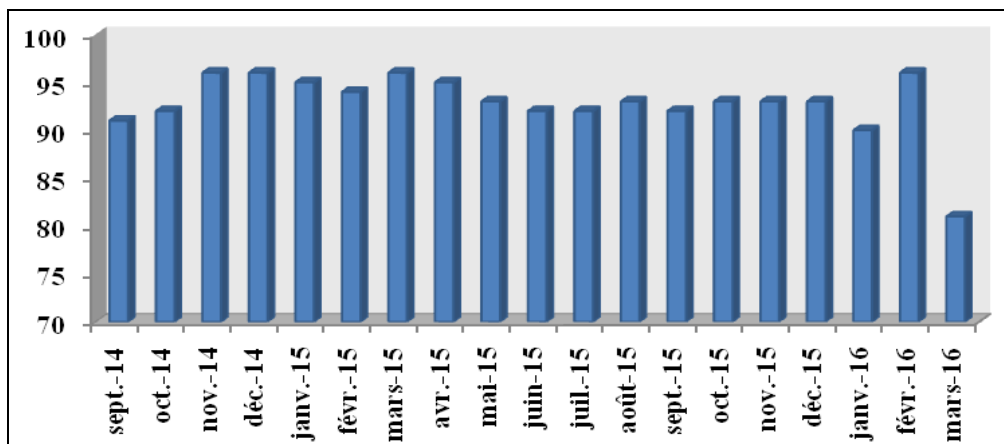


Figure.77: Rendement d'élimination de la DBO₅ dans la STEP

IV.2. Variation de la DCO

Les rendements d'élimination de la DCO sont très satisfaisant et dépasse les 94% (fig.78), avec un pourcentage de 73% observé pendant le mois de mars.

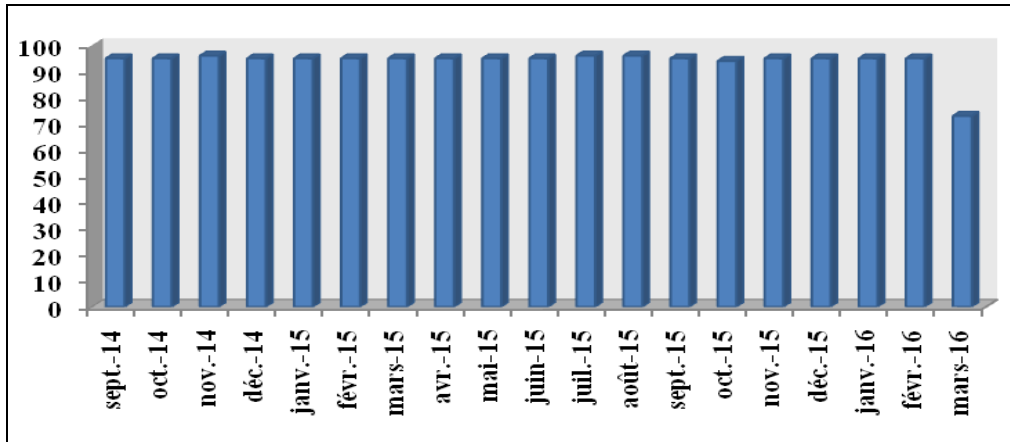


Figure.78 : Rendement d'élimination de la DCO dans la STEP

IV.3. Variation des MES

A l'exception du mois de mars 2016 (94%), les rendements d'abattement des MES dépasse le seuil de 97 % (fig.79).

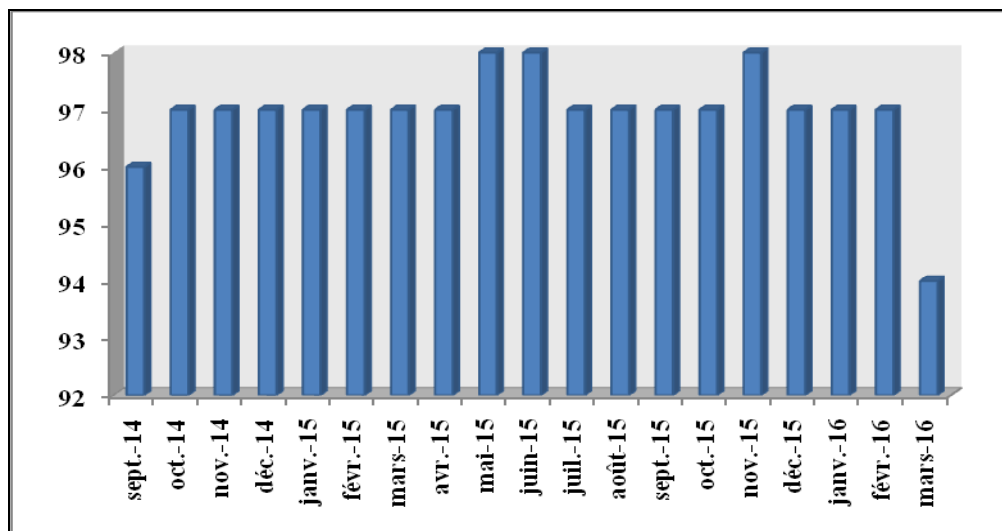


Figure.79: Rendement d'élimination des MES dans la STEP

L'ensemble des résultats obtenus sur les indicateurs de performances de la STEP de Guelma confirme l'efficacité de cette station en matière d'épuration des eaux. Les rendements épuratoires de la station sont moins important au mois de Mars qui attend des rendements de 81%

en DBO, 73% en DCO et 94 % en MES, mais ceci est certainement dû à la dilution, l'effluent en entrée n'est pas suffisamment concentré pour que l'abattement de concentration des paramètres étudiés soit significatif.

V. Conclusion

L'eau constitue l'élément majeur du monde minéral et biologique. En entreprenant cette étude, une évaluation de l'efficacité du traitement des eaux usées au niveau de la station d'épuration de Guelma (système à boues activées) a été mise en évidence. Après une description détaillée de la STEP, les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- ✚ L'analyse des paramètres de pollution (DBO₅, MES, DCO, NH₄⁺, NO₂⁻, PO_{4.3-}) est faite selon les normes en vigueur. Notre étude a montré que les valeurs trouvées respectent les normes de rejet à la sortie de la STEP, à l'exception pour Les nitrates qui augmentent de l'entrée vers la sortie de la STEP, ceci s'explique par le fait que l'action de dénitrification n'est pas réalisée convenablement.
- ✚ Le traitement biologique des eaux usées par boues activées représente une solution de choix pour la dépollution de l'eau. Une bonne élimination de la DCO avec des rendements de 73%, de la DBO₅ avec un taux de 81% et des MES de 94 % a été constaté au niveau de la STEP de Guelma.
- ✚ Au terme de cette étude, on peut dire que l'épuration des eaux usées à Guelma est efficace et très satisfaisante. L'eau traitée au niveau de la STEP ne représente aucun danger pour l'environnement.
- ✚ Les apports de cette station traduits par un volume annuel en eau non conventionnelle de l'ordre de 13 millions de mètres cube nous aidera à bénéficier de la être quantité d'eau conventionnelle équivalente qui est orientée maintenant vers les domaines de l'irrigation et l'industrie dans le domaine de l'AEP. En plus, elle peut accroître les investissements industriels et agricole par le bais de l'augmentation des superficies destinées à ces deux domaines.

Conclusion Générale

Les résultats obtenus nous permettent de conclure ce qui suit:

La zone d'étude fait partie du domaine externe de la chaîne Alpine de l'Algérie orientale et est constituée essentiellement de deux formations géologiques d'âge Mio-Pliocène et Quaternaire. Ces formations sont constituées essentiellement d'alluvions (graviers, limons, conglomérats, travertins perméables), et peuvent être considérées comme aquifères.

Le climat de la région étudiée est subhumide, caractérisé par un hiver plus froid et humide et un été chaud et sec.

Les précipitations ont une moyenne annuelle de l'ordre de 601.89 mm/an. Le bilan hydrique et l'estimation de ses paramètres nous ont permis de faire ressortir une évapotranspiration réelle de l'ordre de 208 mm /an, une infiltration et un ruissellement respectivement de l'ordre de 80.33 mm/an et 72.36 mm/an.

La nappe alluviale de Guelma fait partie du bassin versant de la moyenne Seybouse. Il s'agit d'une dépression dont le remplissage des formations aquifères d'âge Plio-quaternaire, essentiellement alluvionnaires constituées de trois terrasses distinctes (basse, moyenne et haute). la nappe alluviale reposant sur un substratum marneux à gypse d'âge Miocène de la vallée de l'Oued Seybouse et d'autres fissurées moins importantes du Pliocène (calcaires travertins).

La carte piézométrique établie montre que l'oued Seybouse draine la nappe et que l'écoulement se fait généralement du Sud vers le Nord. A l'ouest, la nappe des hautes terrasses est alimentée latéralement par les travertins. . La nappe des hautes terrasses alimente à son tour la nappe de la vallée actuelle (basse terrasse).

Les plus fortes valeurs de la transmissivité sont observées au voisinage du lit actuel de l'oued Seybouse, là où les alluvions deviennent plus grossières et sont dépourvues de la matrice argileuse.

Sur le plan hydrochimique les eaux souterraines de la nappe aquifère ont une forte teneur en chlorure, sulfates et calcium avec un faciès chimiques dominant de type chloruré et sulfaté calcique.

Pour les eaux des Oueds Maiz et Zimba, Les concentrations de certains éléments chimiques augmentent progressivement de l'amont vers l'aval. Par contre, ces eaux sont salines à fortement salines au niveau de tout le périmètre d'étude ($CE > 1000 \mu S/cm$).

Concernant les éléments nutritifs, les résultats obtenus montrent que les eaux souterraines de la nappe, pour la plupart des points prélevés, sont supérieures à la norme de

potabilité, comparées aux eaux de surface, qui ont montré de faibles teneurs en nitrates, ce qui confirme une origine des nitrates dans la nappe due aux engrais chimiques.

Du point de vue bactériologique, les eaux contiennent une forte densité de bactéries surtout en période sèche. L'origine de cette contamination en période sèche peut être causée par des déjections animales rejetées à proximité des cours d'eaux.

Deux méthodes DRASTIC et GOD ont été adoptées pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère de la plaine de Guelma. Elles tiennent compte de plusieurs facteurs, tels que la lithologie, la piézométrie, l'hydrochimie...

L'analyse des cartes obtenues a permis de distinguer trois zones de degré de vulnérabilité différent. Les zones de faible et moyenne vulnérabilité occupent respectivement 25 et 30% de la surface totale de la plaine, alors que les zones à forte vulnérabilité occupent 45% de la surface totale et se situent à Nador, au Nord de Belkheir, aux alentours de Guelma et le long de l'Oued Seybouse et ses affluents (Oued Maiz, Oued Zimba et Chaabet Maamora).

La mise en exploitation de la station de traitement des eaux usées (STEP) a permis de diminuer les concentrations en polluants et donc d'atténuer le risque sanitaire à un niveau très acceptable. Cependant pour mieux évaluer la qualité chimique et bactériologique des eaux traitées, il est nécessaire de compléter par les actions suivantes :

- Compléter les analyses physico-chimiques faites par le laboratoire de la station par des analyses microbiologiques, ainsi qu'un contrôle de la boue activée.
- Agrandir la STEP en la dotant d'un plus grand nombre de bassins d'aération afin de palier l'insuffisance du dispositif vis-à-vis de la grande charge polluante entrant quotidiennement dans la station.
- Suivre l'évolution des paramètres de l'eau rejetée par la station tout le long de son parcours au sein de l'Oued seybouse, afin d'évaluer les conséquences de l'utilisation de ces eaux sur l'irrigation, sur l'environnement et la santé humaine et animale.

AKE Gabriel Etienne, Hélène Boyossoro KOUADIO, Kouassi DONGO, Brou DIBI, Fernand Koffi KOUAME et Jean BIEMI., (2010) : Application des méthodes DRASTIC et SI pour l'étude de la vulnérabilité à la pollution par les nitrates (NO_3^-) de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 4(5): 1676-1692.

Allechy.F, Lasm.T, Youan.T, Yao Kouadio, Kouakou.O, Oka Koua.A, Baka.D, De Lasme.O., (2016) : Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères du socle Précambrien : Cas de la région D'oumé (Centre-Ouest De La Côte D'ivoire). *European Scientific Journal*. vol.12, No.20 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431

Aller L., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J. Hacket G., (1987) : A standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrological settings, *Prepared by the National Water Well Association for the US Environmental Protection Agency*, Vol. 600(2),87-035.

ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques) ., (2012) : Grille de qualité des eaux de surface.

Attoui.B., (2014) : Etat de la vulnérabilité à la pollution des eaux des grands réservoirs d'eaux souterraines de la région de Annaba- El-Tarf et identification des sites d'enfouissement de déchets. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba.134p.

Baali.F., (2007) : Contribution à l'étude hydrogéologique, hydrochimique et Vulnérabilité d'un système aquifère karstique en zone semi aride. Cas du plateau de Chéria N. E. Algérien. Thèse doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba. 121 p.

Baumont S, Camard J-P, Lefranc A, Franconi A, (2005), Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Observatoire régional de la santé Île-de-France, Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, 222p.

Bechiri. N.,(2011): Evolution du chimisme des eaux de surface et Souterraines dans le bassin versant de la Seybouse (Nord-Est Algérien) : Université Badji Mokhtar-Annaba. Mémoire d'ingénieur d'état en Hydrogéologie. 100 pages

Benmarce. K., (2007): Caractéristiques physico-chimiques et isotopiques des eaux souterraines dans la région de Guelma (N.E Algérien). Mémoire de magister en hydrogéologie, IST , Université Badji-Mokhtar Annaba, Algérie. 126 p.

Bouchnan.R., (2015) : Vulnérabilité des aquifères fracturés : méthode F-DRASTIC et aspect dynamique Applications aux aquifères d'Angad et de Bou-Areg (Maroc).Thèse de Doctorat. Université Abdelmalek Essaadi,Maroc.165 p.

Boumedienne.M., (2013) : bilan de suivi des performances de fonctionnement d'une station d'épuration a boues activées : cas de la STEP Ain el Houtz. Mémoire licence.39 p

Bouselsal. B., (2007) : Etude hydrogéologique et hydrochimique de la nappe aquifère libre d'El-Oued Souf. Mémoire de magister. Univ. Badji-Mokhtar Annaba. 107 p.

Brahmia.N., (2016) : Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de la moyenne Seybouse, Nord-Est, Algérien. Thèse doctorat.Univ Badji Mokhtar Annaba, 115 p.

Chaouch.A., (2013) : Surveillance de l'état de fonctionnement d'un procédé biologique de dépollution. Mémoire de magister. Univ. 20 Août 1955 – Skikda. 106 p.

Chaffai H., Laouar R., Djabri L., Hani A., (2006) : Etude de la vulnérabilité a la pollution des eaux de la nappe alluviale de Skikda : Application de la méthode DRASTIC, *Bulletin du Service Géologique National*, Vol. 17(1) ,63-74.

Débieche .T.H., (2002) : Evaluation de la qualité des eaux (salinité, azote, et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la base plaine de la seybose N-E Algérien. Thèse pour le grade de docteur de l'université de Franche-comté. 199p.

Durand Delga, (1969) : Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. *Publ. Serv. Géol. Algérie*, n°39, 89-131. Alger

DHW., (2007) : Bilan des rejets domestiques et industriels du bassin de Guelma, Rapport inédit, Direction de l'hydraulique de Guelma, Algérie, 20 p.

Djabri. L., (1996) : Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Annaba. 261 pages.

D.P.A.T., (2008) : Direction De La l'Aménagement Du Territoire. Rapport Interne, Monographie de la Wilaya de Guelma. 36p.

Drias T., Toubal A.C., (2015) : Cartographie de la vulnérabilité a la pollution de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (Bassin versant de l'Oued Ksob) extrême Est Algérien, *Larhyss Journal*, ISSN, Vol.1112-3680(22),35-48.

Gaud B., (1976) : Etude hydrogéologique de la nappe alluvionnaire de Guelma. Rapport interne, page : de 318 à 333

Ghachi. A ., (1982) : Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie le bassin de la Seybouse. Office des publications universitaires- 508 p.

Jamonet. B., (1987):le traitement des boues résiduaires. Univ des sciences du langue doc, Montpellier.10p.

Kachi. S., (2007): Vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott face aux polluants. Thèse de doctorat. Université Badji-Mokhtar Annaba. 158 p.

Kachi. N (2015) : impact du périmètre irrigue sur la qualité des eaux souterraines dans le bassin versant de la seybose. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba, 170 p.

Khadri.S (2009) : Qualité des eaux de la vallée de la Seybouse dans sa partie aval : Impacts des néofacteurs de pollution, Mémoire de Magister 109 p.

Ladjel Faride, Mme Bouchefer Soraya-Amel., (2009) : Exploitation d'une STEP à boues activées et d'une lagune, niveau 2. Centre de formation aux métiers de l'assainissement, CFMA, Boumerdes.

- Latifi.S., (2017) :** Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien. Rev. Sci. Technol., Synthèse 34: 48 -62 .
- Laraba. A et Hadj ZOBIR. S., (2009):** Pollution organique des eaux d'Oued seybouse (Plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien). Bulletin des sciences géographiques N°23 (1er Semestre).
- Louamri. A., (2013):** Le bassin-Versant de la Seybouse (Algérie orientale) Hydrologie et Aménagement des Eaux. Thèse de Doctorat. Université de Constantine 1. 300p.
- Metahri .M.,(2012) :** Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la STEP est de la ville de Tizi-Ouzou. Thèse doctorat. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.138p.
- Mouassa .S ., (2006):** Impact du périmètre d'irrigation sur la qualité des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma et sur les sols. Ingénieur en Hydrogéologie. Université Badji Mokhtar Annaba. 152 p.
- Mouchara. N., (2009):** Impacts des lâchées de Barrage Hammam Debagh sur la qualité des eaux de la vallée de la Seybouse dans sa partie amont (Nord-Est Algérie). Mémoire de magister. Université de Badji Mokhtar Annaba. 123 p.
- Moulin.S, David Rozen-Rechels, Milena Stankovic., (2013):**Traitement des eaux usées. ATELIER L'EAU Qualité vs Quantité.1er semestre.12 p.
- Nouar T., 2007 :** Impact de la pollution sur les ressources en eau superficielles et souterraines de la région de Guelma. Thèse de Doctorat en hydrogéologie .Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.179p.
- OMS. Organisation mondiale de la santé. (1994):** Directive de qualité pour l'eau de boisson. Recommandation. Vol 1. Genève ; 202 p.
- OMS., (1973):** La réutilisation des effluents : méthodes de traitement des eaux usées et mesures de protection sanitaire. Série de rapports techniques de l'OMS. N° 517, 68 p.
- OMS., (1994):** Directive de qualité pour l'eau de boisson : Recommandations. Ed. OMS. 202p.
- Pilleboue. E., (1987) :** Origines, bilans et mécanismes de transfert du phosphore et de l'azote d'un bassin versant vers un lac. Thèse Paris VI. 251 p.
- Pourriot. R. et Meybeck . M., (1995) :** Limnologie générale. Collection d'écologie 25, Masson, Paris,956 p.
- Reggam.A, Bouchelaghem.H , Houhamdi.M.,(2015) :** Qualité Physico-Chimique des Eaux de l'Oued Seybouse (Nord-Est de l'Algérie): Caractérisation et Analyse en Composantes Principales (Physico-chemical quality of the waters of the Oued Seybouse (Northeastern Algeria): Characterization and Principal Component Analysis). J. Mater. Environ. Sci. 6 (5) (2015) 1417-1425. ISSN : 2028-2508.
- REJSEK F. (2002) :** Analyse de l'eau : Aspects et règlementaire et technique .Ed CRDP d'Aquitaine. France, 358 p

Rouabhia.A ., (2005): vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'el ma el abiod Nord-Est Algerien. Thèse de Doctorat ès sciences.167 p.

Sahtout.N., (2012) : Etude de station de traitement des eaux à boues activées : Optimisation de l'aération et la clarification en vue d'une bonne décantabilité des boues. Mémoire magister. Université Badji Mokhtar-Annaba. 83 p.

Sedrati .N., (2011) : Origines et caractéristiques physico-chimique des eaux de la wilaya de Biskra Sud Est Algerien .Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba. 252 p.

Seghir.K., (2008) : Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien).Thèse de doctorat. Université de Badji Mokhtar Annaba. 142 p.

Villa J.M., (1980): La chaîne Alpine d'Algérie oriental et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse de Doctorat ès sciences Nat, Université de Pierre Marie Curie, ParisVI, France.2 vol, 665p.

Younci .A., (2015): Impact de la station d'épuration des eaux usées sur la ville de Guelma. Mémoire de Master .Univ.Ziane Achour–Djelfa.65p.

Zaoui L., (2016) : Evaluation de la pollution des sols et des eaux de la plaine de Bounamoussa et essais de dépollution. Thèse de Doctorat. Université de Badji Mokhtar Annaba. 116 p.

Zeddouri. A., (2003): Contribution à l'étude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine alluviale de Guelma. Mémoire de Magister en Hydrogéologie, IST. Université de Badji Mokhtar Annaba. 107 p.