

الديموقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة 8 ماي 1945 قالمة
Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la terre et de l'Univers



Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers
Filière : Géologie
Spécialité/Option : Hydrogéologie
Département : Sciences de la Nature et de la Vie

Thème

**Délimitation des Périmètres de protection de quelques forages
d'eau captant la nappe alluviale de Guelma (Nord-est Algérien)**

Présenté par :

- Gouaidia Samira
- Gouaidia Nadjma

Devant le jury :

Nom et prénom	Qualité	Grade	Université
KACHI Slimane	Président	Pr	Université de Guelma
BENACER Leila	Examinatrice	MCB	Université de Guelma
GHRIB Lassaad	Encadreur	MCA	Université de Guelma

Juin 2019

RÉSUMÉ

L'eau source de vie peut devenir une source de maladie lorsque sa qualité se dégrade. En effet, la qualité des eaux souterraines dans la wilaya de Guelma a connu ces dernières années une grande détérioration à cause des rejets industriels non contrôlés, et l'utilisation irrationnelle des pesticides et des engrais chimiques.

Cette étude concerne l'approche et la méthodologie de mettre en place des périmètres de protection autour des zones de captage de l'eau destinée à la consommation humaine.

Cinq forages installés au centre de la plaine de Guelma, ont fait l'objet de ce travail.

Plusieurs méthodes de traitement ont été utilisées à l'aide du logiciel Periprotect pour le calcul de la surface et du rayon des périmètres de protection rapprochée et éloignée.

Les méthodes appliquées, à savoir Sichardt, kusakin et celle du Cylindre ont donné des résultats de périmètres de protection rapprochée variant respectivement de 100m à 400m pour le rayon et de 1ha à plus de 50ha pour la superficie. Cependant les deux méthodes appliquées pour le périmètre de la protection éloignée (Infiltration et 3A2E) ont donné des résultats presque similaires.

Mots clés : Pollution, périmètre de protection, eaux souterraines, forage, Periprotect.

Abstract

Water source of life can become a source of disease when its quality deteriorates.

In fact, the quality of groundwater in the region of Guelma has in recent years suffered a great deterioration because of uncontrolled industrial discharges, and the irrational use of pesticides and chemical fertilizers.

This study concerns the approach and the methodology of setting up perimeters of protection around catchment areas of water intended for human consumption.

Five drillings installed in the center of the plain of Guelma, are the object of this work. Several met treatment were used with periprotect software to calculate the area and radius of the near and far protection perimeters.

The methods applied, namely Sichardt, Kusakin and cylinder gave results of perimeters of close protection varying respectively from 100 m to 400 m for the radius and from 1 ha to more than 50 ha for the surface. However the two methods applied for perimeter protection (infiltration and 3A2E) gave almost similar results.

Keywords : pollution, perimeter of protection, groundwater, drilling, Periprotect.

ملخص

الماء هو مصدر الحياة، ويمكن ان يصبح مصدرا للمرض عند تدهور نوعيته.

شهدت نوعية المياه الجوفية في ولاية قالمة تدهورا كبيرا في السنوات الأخيرة بسبب التصريفات الصناعية غير المنظمة والاستخدام غير العقلاني للمبيدات الحشرية والاسمدة الكيماوية.

تتعلق هذه الدراسة بمنهجية إعداد محيط الحماية حول مناطق مجمعات المياه الجوفية للاستهلاك البشري.

خمس آبار عميقة في وسط سهل قالمة شكلت موضوع هذا العمل، حيث تم استخدام عدة طرق للعلاج مع برنامج بيربيروتاكت لحساب مساحة المنطقة ونصف قطر محيط الحماية القريب والبعيد.

أعطت الطرق المطبقة وهي: سيشارد، كيزا كان، وطريقة الأسطوانة نتائج بالنسبة لنصف قطر محيط الحماية القريب الذي يتراوح من 100 متر إلى 400 متر ومساحة 1 هكتار إلى أكثر من 50 هكتار بينما قدمت طرق محيط الحماية البعيد نتائج تقريبا متشابهة.

الكلمات المفتاحية: تلوث، محيط الحماية، مياه جوفية، بئر عميقة، بيربيروتاكت.

REMERCIEMENTS

Avant tous, Nous remercions notre Dieu qui nous a donné le courage et la patience pour réaliser ce travail.

Merci à nos chers parents, notre famille et tous nos proches pour leur patience et soutien de tous les jours.

Nous voudrions exprimer un très chaleureux remerciement à : Monsieur GHRIEB Lassaad, notre encadreur, qui nous a guidé et suivi tout au long de ce travail. Ses critiques fructueuses ont été pour nous, une source d'enrichissement. Son aide et sa disponibilité nous a permis d'avancer dans le travail et de finaliser cette étude.

Nous adressons également nos vifs remerciements à :

Monsieur KACHI Slimane qui nous a fait l'honneur de présider ce jury

Madame BENACER Leila Qui a accepté de faire partie du jury et d'examiner ce travail.

Nos remerciements s'adressent au corps des enseignants des Sciences de la Terre, pour le soutien et les conseils avisés qu'ils ont su nous donner tout au long de notre formation de master.

Nous remercions vivement professeur Maoui Ammar du département de Génie civil et d'hydraulique, et madame Boudjebieur Assia de la direction des ressources en eau de la wilaya de Guelma, qui n'ont jamais épargné le moindre effort pour nous aider. Qu'ils trouvent dans ces lignes nos sentiments de respect et de gratitude.

Un grand merci à nos collègues et camarades de la promotion 2018/2019 et en particulier Khadidja, Imane, Ahlem, Oussama, Abir, Iness, Imane, Hadjer et Lamia.

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Cadre physique de la région d'étude

1. Situation géographique.....	3
2. Orographie et géomorphologie.....	5
3. Le relief.....	6

Chapitre II : Aperçu Hydroclimatologique

<u>1. Cadre climatique</u>	6
<u>1.1. Facteurs climatiques</u>	6
<u>1.1.1. Température</u>	6
<u>1.1.2. Précipitation</u>	7
a. Répartition des précipitations moyennes mensuelles.....	8
b. Le coefficient pluviométrique annuel.....	9
<u>1.2. Type de climat</u>	10
<u>1.2.1. L'indice climatique de De MARTONNE (1923)</u>	11
<u>1.2.2. L'indice de l'aridité mensuel de De MARTONNE (1923)</u>	11
<u>2. Hydrologie</u>	12
<u>2.1. Réseau hydrographique</u>	12
<u>2.2. Le bilan hydrique</u>	13
<u>2.2.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)</u>	13
<u>2.2.2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)</u>	14
<u>2.2.3. Estimation du ruissellement</u>	15
<u>2.2.4. Estimation de l'infiltration</u>	16
<u>3. Conclusion</u>	16

Chapitre III : Aperçu géologique

<u>1. Géologie</u>	18
<u>1.1. Nappes alluvionnaire de Guelma</u>	18
<u>1.2. Géologie et stratigraphie</u>	19
<u>1.2.1. Le Primaire</u>	19
<u>1.2.2. Le Trias</u>	19

1.2.3.	<u>Le Néritique</u>	19
1.2.4.	<u>L'unité tellienne</u>	20
1.2.5.	<u>L'unité ultra – tellienne</u>	20
1.2.6.	<u>Le Numidien</u>	20
1.2.7.	<u>Le Post – nappe</u>	21
1.2.8.	<u>Le Quaternaire</u>	21
2.	<u>La tectonique</u>	23
3.	<u>Conclusion</u>	23

Chapitre IV : Hydrogéologie et Géométrie de l'aquifère

1.	Géométrie de l'aquifère	26
1.1.	Prospection géophysique	26
1.2.	Echelle de résistivité.....	26
1.3.	Interprétation des coupes géoélectriques	27
1.4.	Carte du Substratum	29
1.4.1.	Coupe hydrogéologique.....	29
2.	Description hydrogéologique de la nappe alluviale	30
2.1.	Coupe hydrogéologique Nord-Sud (d'après Gaud)	30
2.2.	Coupe hydrogéologique Nord –Sud (d'après Gaud).....	31
3.	Propriétés hydrodynamiques.....	32
3.1.	La carte de transmissivité de la nappe aquifère de Guelma.....	32
3.2.	Piézométrie de l'aquifère alluvionnaire de Guelma.....	33
4-	Conclusion.....	35

Chapitre V : vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines

1.	<u>Introduction</u>	36
2.	<u>La vulnérabilité</u>	36
3.	<u>Les paramètres de vulnérabilité des nappes souterraines</u>	37
4.	<u>Les principaux types et origines de pollution dans la zone d'étude</u>	37
4.1.	<u>Pollution urbaines et domestiques</u>	37
4.2.	<u>Pollution industrielle</u>	38
4.3.	<u>Pollution d'origine agricole</u>	39
4.3.1.	<u>Pollution par les engrais</u>	40
a.	<u>Les types d'engrais</u>	40
b.	<u>Les engrais les plus utilisés dans la zone d'étude</u>	41

5.	<u>Vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Guelma</u>	42
6.	<u>Vulnérabilité à la pollution de quelques forages de la nappe alluviale de Guelma</u>	44
a.	<u>L'épaisseur de la zone non saturée</u>	44
b.	<u>La nature de la zone non saturée</u>	45
c.	<u>Le type de nappe</u>	45
d.	<u>La perméabilité de l'aquifère</u>	45
e.	<u>La relation avec le réseau hydrographique</u>	45
7.	<u>Conclusion</u>	48

Chapitre VI : périmètres de protection

1-	Introduction.....	49
2.	Méthodes de délimitation des périmètres de protection des captages d'eaux souterraines ...	49
2.1.	Approche Cartographique.....	49
2.2.	Approche empirique	49
2.2.1.	Méthode de Rehse	49
2.2.2.	Méthode géométrique	50
2.3.	Approche graphique	50
2.3.1.	Méthode d'Albinet et al (1972).....	50
2.4.	Approche hydrodynamique.....	51
2.4.1.	Méthodes volumiques.....	51
a.	Méthode de l'Infiltration.....	51
b.	Méthode du Cylindre.....	51
c.	Méthode de Sichardt.....	52
d.	Méthode de Kusakin.....	52
2.4.2.	Méthodes analytiques	52
2.4.2.1.	Méthode de Bear & Jacobs.....	52
2.4.2.2.	Méthode de Wyssling	52
2.4.2.3.	Méthodes numériques	53
2.5.	Approche mixte	53
a.	Méthode 3A2E	53
3.	Périmètres (ou zones) de protection	54
3.1.	Définition et objectif.....	54
a.	Périmètre de Protection Immédiate (PPI).....	54

b. Périmètre de Protection Rapprochée (PPR).....	55
c. Périmètre de Protection Eloignée (PPE).....	55
3.2. Délimitation des périmètres de protection des eaux souterraines	56
3.2.1. Choix de la méthode.....	56
3.2.2. Périmètres de protection rapprochée	57
a. Méthode de Sichardt.....	57
b. Méthode de Kusakin.....	59
c. Méthode de cylindre	60
3.2.3. Périmètre de protection éloignée.....	62
a. Méthode d'infiltration	62
b. Méthode 3A2E	63
4.Représentation des périmètres de protection des ouvrages de captage de la zone d'étude ...	65
5. Discussion et recommandation	68
Conclusion générale.....	71

Liste des figures

Fig.1. Situation géographique de la wilaya de Guelma (in Abdraman et al, 2014).....	3
Fig.2. Situation géographique de la région d'étude (Mouassa.2006, modifiée).....	4
Fig.3. Carte d'emplacement des forages (Google earth 2019)	4
Fig.4.Géomorphologie de la région de Guelma (Benmarce, 2007)	<u>5</u>
Fig.5. L'histogramme des températures moyennes mensuelles	8
Fig.6. Précipitations annuelles médianes « normales» (1965-95) (ANRH-GTZ ,2003)In Azzedine MEBARKI et Jean-Pierre LABORDE.....	9
Fig.7. Précipitation moyenne mensuelles en mm de la station de Guelma (1988-2017).....	9
Fig.8. Distribution interannuelles des précipitations mensuelles de l'année la plus sèche (1988) et l'année la plus humide (2003).....	12
Fig.9. Réseau hydrographique (A.B.H-C.S.M, 2005).....	15
Fig.10. La moyenne pluriannuelle des éléments climatiques (précipitation, ETP, ETR) de la station de Guelma (1988-2017).....	16
Fig.11. La moyenne pluriannuelle des éléments climatiques (RFU, Excédent et Déficit) de la station de Guelma (1988-2017).....	17
Fig.12. Esquisse structurale Extraite	23
Fig.13a. Coupe géoélectrique DD'	28
Fig.13b. Coupe géoélectrique EE'	28
Fig.14. Carte du toit du substratum imperméable de la nappe alluviale de Guelma (Kachi.N, 2015).....	30
Fig.15. Coupe hydrogéologique NNW-SSE (Gaud, 1974.)	31
Fig.16. Coupe hydrogéologique Nord –Sud (Brahmia, 2016).....	32
Fig.17. Carte de transmissivité de la nappe alluviale de Guelma. (in Moussa 2017)	33
Fig.18. Carte piézométrique de la plaine de Guelma, décembre 2013(in Latifi.S, 2017).....	35
Fig.19. Carte de localisation des sources de pollution dans la région de Guelma (in Latifi.S,2017)	40
Fig.20. Carte des valeurs d'indice de la profondeur de la nappe aquifère de la plaine de Guelma (Latifi.S, 2017).....	43
Fig.21. Carte de vulnérabilité de la nappe aquifère de la plaine de Guelma selon la méthode de GOD.(Latifi.S,2017 modifiée)	44
Fig.22. Carte d'emplacement des forages (Google earth, 2019)	57
Fig23. Représentation des superficies des PPR selon la méthode Sichardt (in Gouaidia, 2019)	58

Fig24. Représentation des superficies des PPR selon la méthode Kusakin (in Gouaidia, 2019)	59
Fig25. Représentation des superficies des PPR selon la méthode Cylindre (in Gouaidia, 2019)	60
Fig.26. carte des superficies des périmètres de protection rapprochée pour les trois méthodes (cylindre, Sichardt, Kusakin) (Gouaidia, 2019).....	62
Fig27. Représentation des superficies des PPE selon la méthode d'infiltration (Gouaidia,2019).....	63
Fig.28. carte des superficies des périmètres de protection éloignée selon la méthode d'infiltration et 3A2E. (Gouaidia, 2019)	65
Fig.29. schéma des périmètres de protection du forage BK1 (Gouaidia, 2019).....	65
Fig.30. schéma des périmètres de protection du forage BA3 (Gouaidia, 2019).....	66
Fig.31. schéma des périmètres de protection du forage Oued Maiz (Rail) (Gouaidia, 2019)..	66
Fig.32. schéma des périmètres de protection de forage GU 6 bis (Gouaidia, 2019)	67
Fig.33. schéma des périmètres de protection du forage BA2 (Gouaidia, 2019).....	67
Fig34. Représentation des superficies selon la méthode Kusakin et infiltration.....	68

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'eau constitue un élément indispensable pour la vie des êtres vivants et surtout à celle de l'homme. L'avoir à disposition en quantité suffisante et en qualité, contribue au maintien de la santé.

Les eaux souterraines, constituent une ressource de qualité généralement meilleure à celle des eaux de surface. Malheureusement, elle est aujourd'hui menacée par une pollution qui prend des dimensions de plus en plus importantes, liée notamment aux activités humaines telles que (l'urbanisation, l'industrialisation, et les activités agricoles), provoquant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau.

L'expansion des activités agricoles et industrielles ces dernières années dans la région de Guelma a fait d'elle une grande consommatrice des eaux sans pour autant parler de la demande en eau potable à l'alimentation humaine.

La mise en place de périmètres de protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine et la surveillance des prescriptions associées améliore la sécurité sanitaire en réduisant le risque de pollution microbienne ou toxique massive et brutale en contrôlant les activités susceptibles de générer des pollutions accidentelles pouvant avoir un impact sur la qualité des eaux d'adduction.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude, réalisée dans la plaine de Guelma et qui porte sur la délimitation des périmètres de protection de quelques forages d'eau potables en appliquant des méthodes hydrodynamiques en utilisant le logiciel Periprotect.

La présente étude comporte six chapitres :

Au départ un bref aperçu sur le cadre de la zone d'étude a été donnée, ce dernier à été suivi par une description des caractéristiques géomorphologiques.

Le seconde chapitre concerne les propriétés hydro climatique de la région de Guelma pour aboutir à l'établissement du bilan hydrique ensuite dégagé les éléments du bilan (l'écoulement, l'infiltration et le ruissellement et dans une autre partie l'hydrologie le régime d'écoulement de l'Oued Seybouse et ses principaux affluents.

Le troisième chapitre traite la géologie et la stratigraphie de la région pour ce faire la lithologie du remplissage alluvionnaire à été présenté.

Le quatrième chapitre présente l'hydrogéologie de la plaine, la géométrie de l'aquifère, ainsi que l'utilisation des données géophysique pour l'évaluation de certains paramètres hydrogéologique en l'occurrence, la transmissivité, la perméabilité.

Le cinquième chapitre concerne les sources de pollution et les différents types de pollution et de la vulnérabilité.

La délimitation des périmètres de protection des ouvrages de captages de la nappe alluviale de Guelma est présentée dans le chapitre six.

Enfin une conclusion générale regroupant tous les résultats de notre travail.

CHAPITRE I

CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

1. Situation géographique

La wilaya de Guelma se situe au Nord-est du pays et constitue, du point de vue géographique, un point de rencontre, voire un carrefour entre les pôles industriels du Nord (Annaba et Skikda) et les centres d'échanges au Sud (Oum El Bouaghi et Tébessa). Elle occupe une position médiane entre le Nord du pays, les Hauts plateaux et le Sud.

La wilaya de Guelma s'étend sur une superficie de 3.686,84 Km². Elle est limitrophe aux wilayas suivantes :

Au Nord la wilaya d'Annaba.

Au Nord-est, la wilaya d'El Taref.

A l'Est, la wilaya de Souk Ahras.

Au Sud, la wilaya d'Oum El Bouaghi.

A l'Ouest, la wilaya de Constantine.

Au Nord-ouest, la wilaya de Skikda.



Fig.1. Situation géographique de la wilaya de Guelma (inAbdraman, et al. 2014)

Le secteur étudié Guelma-Boumahra appartient à la nappe alluviale de Guelma, partie intégrante du bassin de l'Oued Seybouse qui fait partie de la moyenne Seybouse. Il se situe au cœur d'une grande région à activité agricole intense à 227 m d'altitude moyenne.

La nappe alluviale de Guelma couvre une superficie de l'ordre de 122 km² avec environ 25 km d'Est en Ouest et entre 3 et 10 km de largeur. La plaine est limitée:

- au Nord par le massif de Houara et Djebel Bousbaa,
- au Sud par le massif de la Mahouna et de Beni marmis,
- à l'Ouest par le Djebel Arar et,
- à l'Est par le massif du Nador n'Bails.[18]

Tab.1. Corordonnées des forages étudiés

N°	Forage	X	Y	Année de réalisation
1	BK1	928 ,550	361,300	1980
2	BA3	929,300	360,400	1980
3	Oued Maiz Rail	926,650	361,550	1949
4	GU 6 bis	926,200	361,700	1972
5	BA2	929,500	358,500	1980

2. Orographie et géomorphologie

L'orographie de la région d'étude est formée en ligne générale de reliefs montagneux et collinaires constituant l'extrémité orientale de la chaîne des monts de Constantine et des contreforts occidentaux de la chaîne de la Medjerda. Ces deux contreforts sont traversés par des vallées profondes où courent les affluents droits et gauches de la Seybouse. Tous les cours d'eau ont un caractère torrentiel.

Les altitudes les plus élevées que l'on rencontre dans la région de Guelma sont Djebel Mahouna (1411m) et Ras El Alia (1317m). Dans la partie Sud, les altitudes varient de 100m à 1400m.[5]

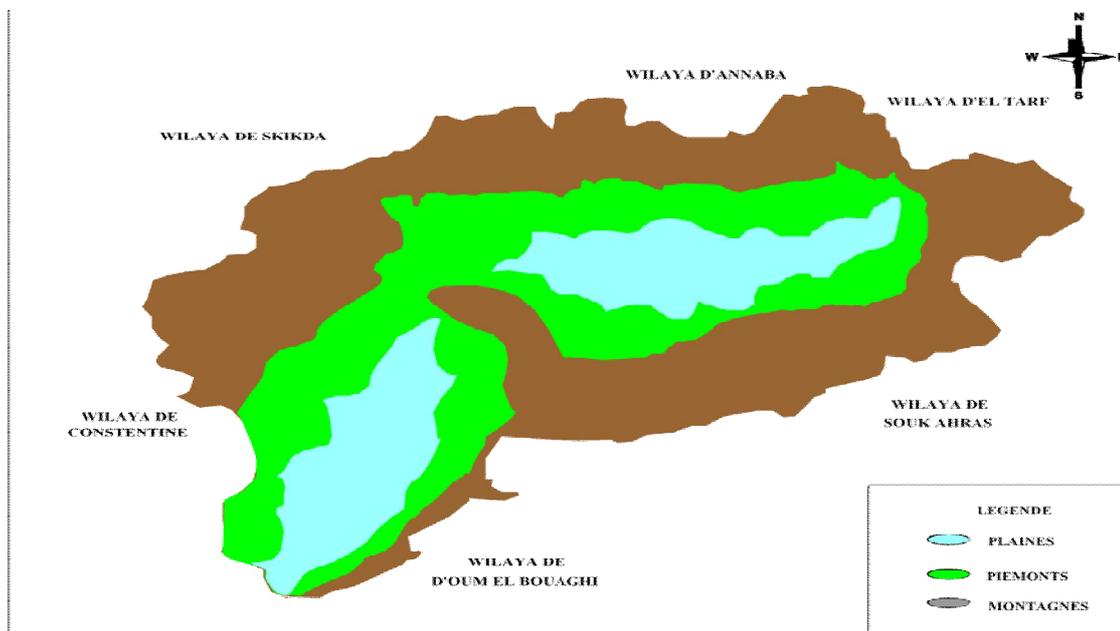


Fig.4. Géomorphologie de la région de Guelma (Benmarce, 2007)

3. Le relief

La géographie de la Wilaya se caractérise par un relief diversifié dont on retient essentiellement une importante couverture forestière et le passage de la Seybouse qui constitue le principal cours d'eau.

Ce relief se décompose comme suit :

Montagnes: 37,82 % dont les principales sont :

- a) Mahouna (Ben Djerrah) : 1.411 m d'altitude
- b) Houara (Ain Ben Beidha) : 1.292 m d'altitude
- c) Taya (Bouhamdane) : 1.208 m d'altitude
- d) Debagh (Hammam Debagh): 1.060 md'altitude

Plaines et Plateaux: 27,22 %

Collines et Piémonts: 26,29 %

Autres: 8,67 %.[3]

Le sud de Guelma comporte la chaîne centrale de la Medjerda où s'impose l'important massif du Ras El Alia.

A l'est, les montagnes boisées du versant septentrional des monts de la Medjerda s'abaissent rapidement par gradins vers la vallée de l'oued Seybouse, dont KefErramoul(797m) et KefDjemma (812m).

Les sommets sont arrondis sans alignement net, les formes massives et les vallées sont peu profondes.

Au nord, s'étendent les monts d'Ain Berda qui séparent la dépression de Guelma de celle du lac Fetzara.

Au nord-ouest, les derniers abrupts calcaires du chaînon du Débar (1060m) viennent s'envoyer dans les formations marneuses ou gréseuses à relief plus mou. Une autre chaîne de calcaire, Dj. Taya (1208m) continue vers l'ouest, séparant le bassin d'oued Safsaf au nord de l'oued Bouhamdane au sud.[7]

CHAPITRE II

APERÇU HYDROCLIMATOLOGIQUE

1. Cadre climatique

Pour connaître les mécanismes de la pollution des eaux souterraines, il est impératif d'étudier les données climatiques à fin de pouvoir déterminer les termes du bilan hydrologique, à savoir les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement et surtout l'infiltration qui représente le facteur de l'alimentation des nappes aquifères, et aussi un vecteur de pollution étant donné que les eaux infiltrées entraînent des polluants de différentes nature vers les eaux souterraines.[17]

Les données météorologiques récoltés de la station de Belkheir wilaya de Guelma (tableau 2), sur une série d'année de 30 ans, allant de 1988 jusqu'au 2017, nous ont permis de caractériser le climat de la région.

Tab.2. Coordonnées des stations météorologiques et périodes d'observation

Paramètre /station	Longitude	Latitude	Altitude(m)	Période d'observation
Guelma	07°28'E	36°28'N	227	1988-2017

1.1.Facteurs climatiques

1.1.1. Température

La température est l'un des facteurs les plus importants du climat. Elle agit sur les répartitions d'eau qui s'opèrent par le phénomène de l'évapotranspiration. Elle dépend de l'obscurité, de l'altitude, de l'exposition, de la présence d'une grande masse d'eau (l'influence des mers et des lacs sur la régulation des températures), du sol, des formations végétales en place (les végétaux amortissant les variations de températures).

L'étude des températures moyennes mensuelles et annuelles est primordiale, car c'est elle qui nous permet d'évaluer le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. [12]

a. Température moyennes mensuelles

Les données des températures disponibles sont des valeurs moyennes mensuelles mesurées au niveau de la station de Guelma, sur une période de 30 ans. Ces valeurs sont consignées dans le tableau 3, leur répartition est illustrée sur la (figure 5)[4].

Tab.3. Les températures moyennes mensuelles de la station de Guelma (1988-2017)

mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jun.	Jui.	Aout
P (mm)	23,86	20,02	14,54	10,82	9,81	10,16	12,52	14,91	19,16	23,78	26,89	27,42

Les températures moyennes mensuelles les plus élevées sont observées pendant la période allant de juin à octobre, avec des températures variant de (20°C à 27,42°C). Par contre les Températures les plus basses (9°C à 12,52°C) sont observées pendant la période hivernale (Décembre à Mars) avec un minimum enregistré pendant le mois de janvier 9,81°C[4].

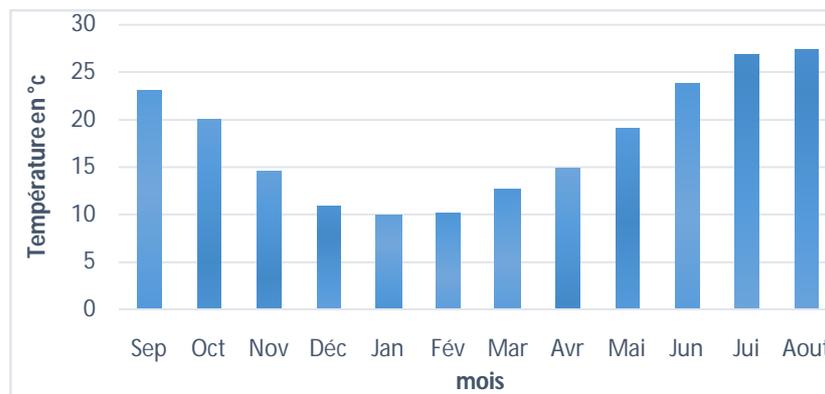


Fig.5. L'histogramme des températures moyennes mensuelles de la station de Guelma (1988-2017)

1.1.2. Précipitation

Les précipitations constituent le premier facteur important dans le cycle de l'eau, leur distribution dans le temps et dans l'espace conditionne la forme des écoulements et les apports aux nappes. La carte suivante de répartition des précipitations établie par l'ANRH (figure 6), montre que dans la région de Guelma ces dernières sont de l'ordre de 600 mm/an, ce qui constitue un apport considérable[23].

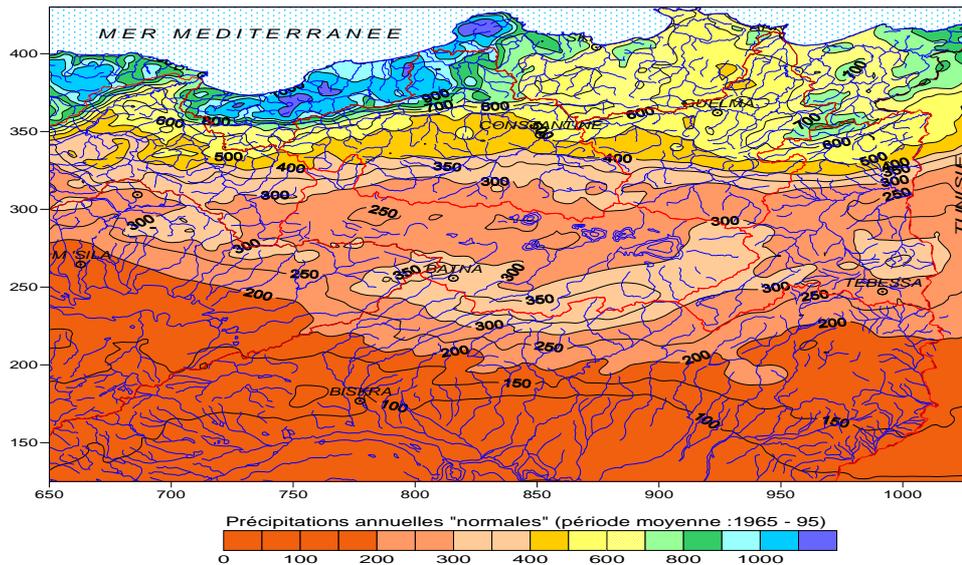


Fig.6. Précipitations annuelles médianes « normales» (1965-95) (ANRH-GTZ ,2003)In
Azzedine MEBARKI et Jean-Pierre LABORDE

a. Répartition des précipitations moyennes mensuelles

Les précipitations mensuelles recueillies à la station météorologique de Guelma sur une période de 30 ans (1988 -2017) sont récapitulées dans le tableau 4, leur répartition est illustrée par la figure 6. La valeur maximale est observée au mois de janvier avec 85.96 mm et la valeur minimale au mois de juillet avec 3.90 mm[4].

Tab.4. Précipitations moyennes mensuelles (station de Guelma 1988-2017)

mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jun.	Jui.	Aout
P(mm)	41.17	44.86	73.96	74.55	85.96	65.04	63.96	57.72	44.08	17.11	3.90	12.40

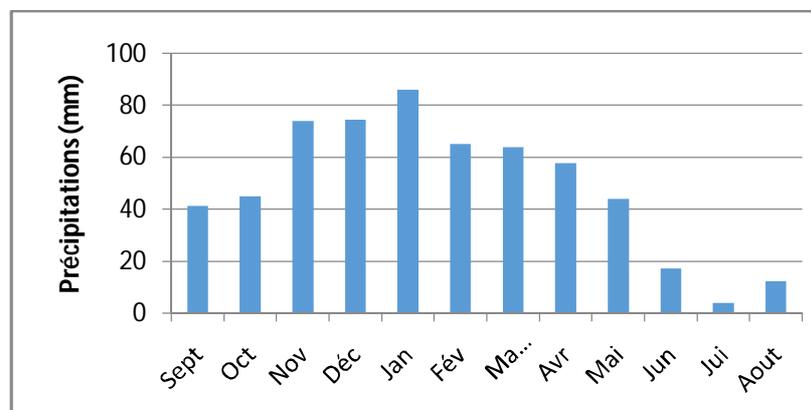


Fig.7.Précipitation moyenne mensuelles en mm de la station de Guelma (1988-2017)

b. Le coefficient pluviométrique annuel

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 celles déficitaires.

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 (tableau 5).

$$CP = \frac{P_{moy}}{P}$$

Avec :

- **CP** : Coefficient pluviométrique.
- **P** Hauteur de pluie.
- **P_{moy}** : Moyenne annuelle pluviométrique (mm).

Nous avons deux cas : Si **CP > 1** → une année excédentaire, **CP < 1** → une année déficitaire.

Tab.5. Précipitations interannuelle de la station de Guelma (1988-2017).

Année Hydrologique	CP	Remarque
1988	0.68	Année déficitaire
1989	0.79	Année déficitaire
1990	0.73	Année déficitaire
1991	1.07	Année excédentaire
1992	0.95	Année déficitaire
1993	0.98	Année déficitaire
1994	0.78	Année déficitaire
1995	0.99	Année déficitaire
1996	1.26	Année excédentaire
1997	1.06	Année excédentaire
1998	1.18	Année excédentaire
1999	1.02	Année excédentaire
2000	0.69	Année déficitaire
2001	0.83	Année déficitaire
2002	0.86	Année déficitaire
2003	1.61	Année excédentaire
2004	1.38	Année excédentaire
2005	0.93	Année déficitaire
2006	0.82	Année déficitaire
2007	1.24	Année excédentaire
2008	0.65	Année déficitaire
2009	1.52	Année excédentaire
2010	1.05	Année excédentaire
2011	1.22	Année excédentaire
2012	0.98	Année déficitaire
2013	1.08	Année excédentaire
2014	0.88	Année déficitaire
2015	1.14	Année excédentaire
2016	0.79	Année déficitaire
2017	0.87	Année déficitaire

Les variations temporelles des précipitations montrent une grande différence entre l'année la plus humide : 2003 avec 938.50 mm/an et l'année la plus sèche 1988 avec 395.4 mm/an (tableau 6, Figure 8).

Tab.6. Distribution inter annuelle des précipitations mensuelles (Année la plus sèche 1988 et l'année la plus humide 2003)

Mois/année	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jun.	Jui.	Aout
1988	14.6	8	65	31.6	69	34.2	36.5	13.8	44.3	75.7	1.7	1
2003	72	48.6	25.10	200.	238.	104.	19.90	187.	41.90	0.00	0.00	0.20
				30	30	60		60				

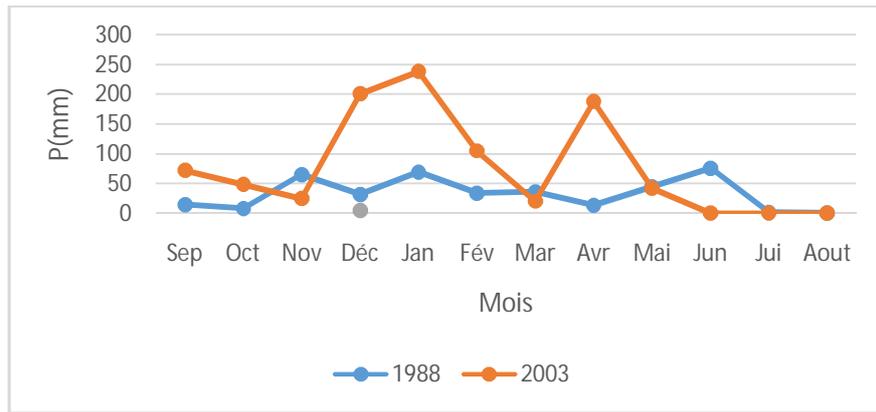


Fig.8. Distribution interannuelles des précipitations mensuelles de l'année la plus sèche (1988) et l'année la plus humide (2003)

1.2.Type de climat

On détermine le type de climat par l'utilisation de l'indice d'aridité de De Martonne qui donne les caractéristiques du climat régional.

1.2.1. L'indice climatique de De MARTONNE (1923)

La formule climatique de De. Martonne est appelée indice d'aridité, il est calculé en fonction de la température et de la précipitation :

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

Avec :

- **P** : précipitations moyenne annuelle en mm.
- **T** : température moyenne annuelle en °C.
- **A** : indice de l'aridité annuelle de De. Martonne.

Selon la valeur que prend ce facteur on peut caractériser le type de climat de la région d'étude comme suit :

A < 5	le.	climat hyperaride
5 < A < 7		climat désertique
7.5 < A < 10		climat steppique.
10 < A < 20		climat semi-aride.
20 < A < 30		climat tempéré.

A > 30

climat humide (l'écoulement est abondant).

La valeur obtenue de l'indice de l'aridité **A = 21.07** ce qui implique que le climat de la région est tempéré pour une température moyenne de **17.8 °C** et les précipitations de **585.9 mm**.

1.2.2. L'indice de l'aridité mensuel de De MARTONNE (1923)

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

$$I = \frac{12P}{T + 10}$$

Avec :

P : précipitations moyenne mensuelle en mm.

T : températures moyenne mensuelle en °C.

Cette équation définit l'évolution des conditions climatiques au cours de l'année considérée. Les résultats de la station de mesures sont présentés dans le tableau suivant :

Tab.7. Indice d'aridité mensuel moyen de la station de Guelma (1988-2017)

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jun.	Jui.	Aout
P(mm)	41.17	44.86	73.96	74.55	85.96	65.04	63.96	57.72	44.08	17.11	3.90	12.40
T (°C)	23.8	20.02	14.54	10.82	9.81	10.16	12.52	14.91	19.16	23.78	26.89	27.42
A	14.61	17.93	36.16	42.96	52.07	38.71	34.08	27.80	18.13	6.07	1.26	3.97

D'après les résultats figurant dans le tableau précédent on remarque que :

- le mois de juillet et aout présentent un climat hyperaride,
- le mois de juin un climat désertique,
- les mois de septembre, octobre et mai jouissent d'un climat semi-aride
- alors que le climat humide marque le reste des mois de l'année.

2. Hydrologie

L'hydrologie est la science qui étudie l'eau sous ses aspects quantitatif et qualitatif durant les différentes phases de son cycle dans la nature. Elle utilise des modèles mathématiques pour prédire les différents phénomènes hydrologiques dans le but de gérer les ressources hydriques.

2.1.Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux (la géologie, le climat, la pente du terrain, la présence humaine, le couvert végétal). L'étude du réseau hydrographique permet de donner une idée sur le développement de son chevelu (ramification lâche ou dense), sa forme, sa hiérarchisation, sa densité de drainage, son rapport de longueur. Le réseau hydrographique du secteur d'étude draine une superficie de l'ordre de 770.91 km². Il est caractérisé par un réseau hydrographique dense au Nord et plus lâche au sud. [9]

La zone d'étude est caractérisée par un réseau hydrographique très dense. Il est constitué principalement de l'oued Seybouse (57.15 km) et ses majeurs affluents dont l'écoulement général est d'Ouest en Est pour l'Oued Bouhamdane (45,37km) et du Sud vers le Nord pour Oued Cherf (36,46 m), Oued Zimba, Oued Maiz, Oued Skhoun, Oued Boussora, Oued Halia et l'Oued Melah. L'Oued Bouhamdane et l'Oued Cherf drainent respectivement des sous bassins de 1105 km² et 2845 km² à la station de Medjez Ammar, point de confluence et de naissance de l'Oued Seybouse. [2]

Le réseau hydrographique emprunte surtout les axes des principaux plissements dans les couches marneuses facilement érodables. D'autres affluents suivent le sens des failles affectant les formations mio-pliocène. [24]

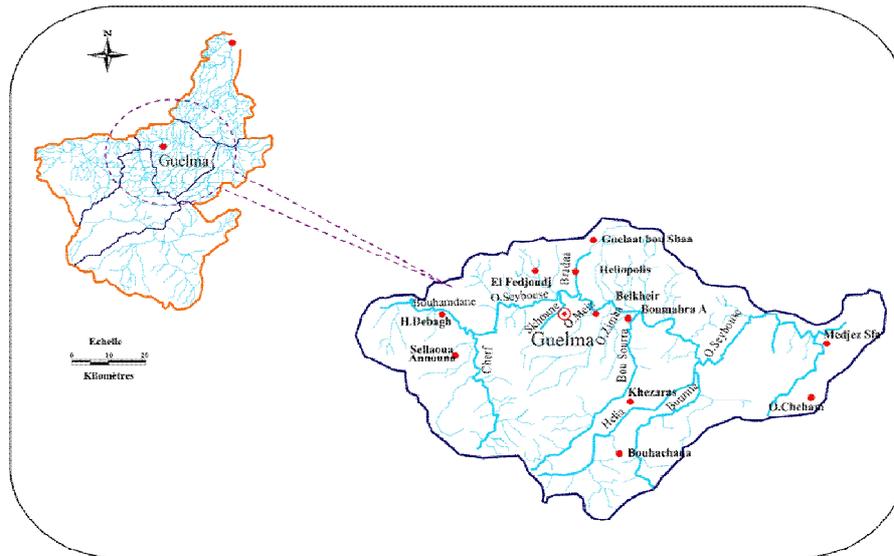


Fig.9. Réseau hydrographique (A.B.H-C.S.M, 2005)

2.2. Le bilan hydrique

L'ensemble de tous les processus de transformation de l'eau sur terre s'appelle cycle hydrologique dont les phases principales sont : Evaporation, Transport par les vents et les courants, Précipitations, Infiltration, Ecoulement souterrain et Ruissellement de surface [10].

2.2.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

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

Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle nous avons utilisé la formule de Thornthwaite qui a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle, cet auteur définit d'abord un indice thermique mensuel (**i**),

$$\text{ou : } i = \left(\frac{T}{5}\right) \quad I = \sum_i^{12} i^a = 1.6 \frac{I}{100} + 0.5$$

$$ETP = 16. \left(\frac{10T}{I}\right)^4 . K$$

Avec :

- **ETP** : Evapotranspiration potentielle du mois considéré en mm.
- **T** : Température moyenne du mois considéré en °C.

- **K** : Coefficient d'ajustement mensuel.
- **i** : Indice thermique mensuel.

Les résultats obtenus sont portés dans le tableau 8.

2.2.2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

On appelle évapotranspiration réelle effective actuelle ou encore déficit d'écoulement, la somme de l'évapotranspiration et transpiration réelle pour une surface donnée. Les résultats de calcul sont récapitulés dans le tableau 8 :

Tab .8. Bilan hydrique selon la méthode de C.W. Thornthwaite. Station de Guelma (1988-2017).

Mois	P(mm)	T(°C)	i	K	ETP	ETR	RFU	Exc.	DA	BH
S	41.17	23.86	10.7	1.03	111.6	41.2	0.0	0.0	70.5	-70.5
O	44.86	20.02	8.2	0.97	75.6	44.9	0.0	0.0	30.8	-30.8
N	73.96	14.54	5.0	0.86	36.8	36.8	37.2	0.0	0.0	37.2
D	74.55	10.82	3.2	0.81	19.9	19.9	91.9	0.0	0.0	54.7
J	87.12	9.81	2.8	0.87	17.8	17.8	100.0	61.2	0.0	69.4
F	65.04	10.16	2.9	0.85	18.5	18.5	100.0	46.5	0.0	46.5
M	63.96	12.52	4.0	1.03	33.3	33.3	100.0	30.7	0.0	30.7
A	57.72	14.91	5.2	1.10	49.3	49.3	100.0	8.4	0.0	8.4
M	44.08	19.16	7.6	1.21	86.8	86.8	57.2	0.0	0.0	-42.8
J	17.11	23.78	10.6	1.22	131.5	74.4	0.0	0.0	57.1	-114.4
J	3.90	26.89	12.8	1.24	168.3	3.9	0.0	0.0	164.4	-164.4
A	12.40	27.42	13.2	1.16	163.3	12.4	0.0	0.0	150.9	-150.9
Total	585.9	17.8	86.2		912.7	439.0		146.9	473.7	-326.8

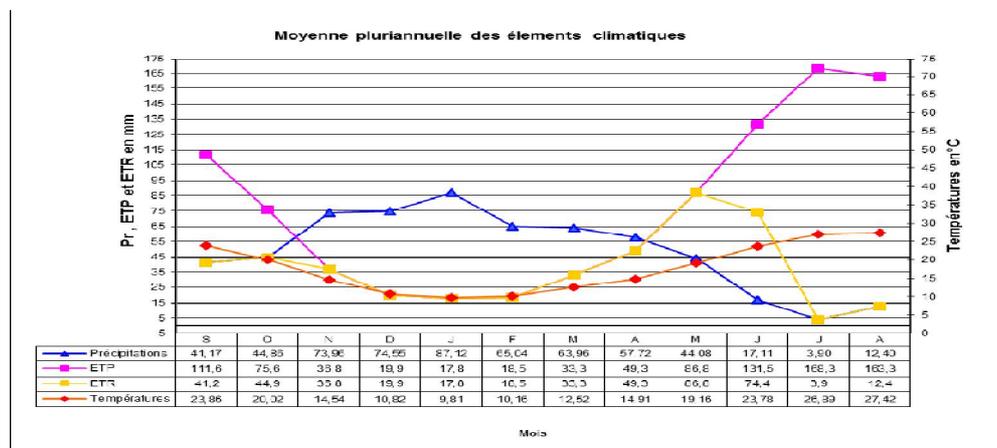


Fig.10. La moyenne pluriannuelle des éléments climatiques (précipitation, ETP, ETR) de la station de Guelma (1988-2017).

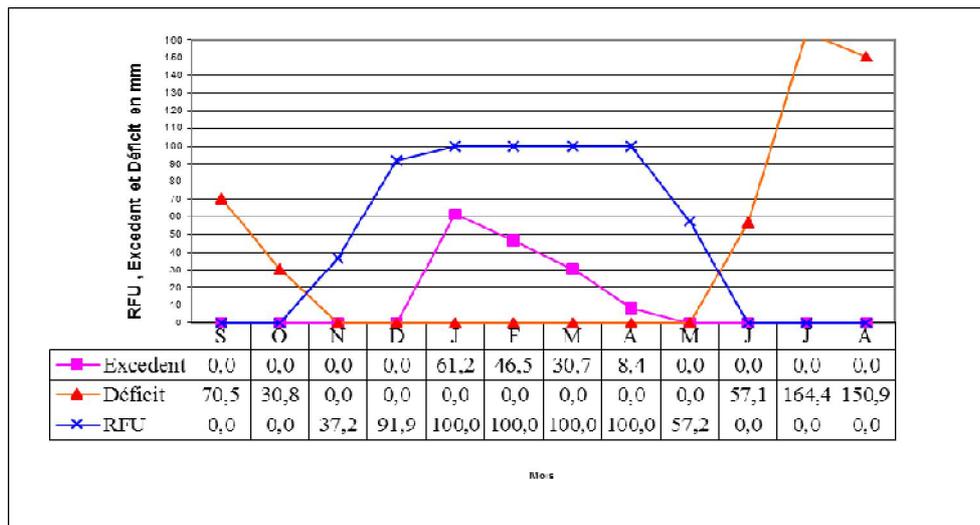


Fig.11. La moyenne pluriannuelle des éléments climatiques (RFU, Excédent et Déficit) de la station de Guelma (1988-2017).

2.2.3. Estimation du ruissellement

Pour déterminer le bilan hydrologique. Il est nécessaire d'évaluer le ruissellement dans le but d'apprécier l'importance de l'érosion mécanique et chimique qui affecte la surface de la terre.

Le ruissellement (**R**) peut être calculé par la formule Tixeront Berkallof :

$$R = P^3 / 3ETP^2$$

R : Ruissellement (mm).

P : Précipitations moyenne (mm).

ETP : Evapotranspiration en (mm).

Les précipitations enregistrées avoisinent **600 mm (585.9 mm)**, ce qui nous amène à utiliser la formule de Tixeront Berkallof

R = 80.32 (mm).

2.2.4. Estimation de l'infiltration

L'infiltration, élément très important du bilan hydrologique, est définie comme étant le mouvement de l'eau dans un sol en passant par la surface. Elle est calculée à partir de la formule générale du bilan.

$$P = ETR + I + R$$

Donc:

$$I = P - ETR - R$$

Ou ; I = Infiltration (mm)

P = Précipitations annuelle moyenne (mm).

ETR = Evapotranspiration réelle (mm).

R = Ruissellement (mm).

$$I = 66.52 \text{ mm}$$

D'après le bilan hydrique : pour une précipitation de **585.9 mm**, nous notons une **ETP** très élevée de l'ordre de **912.7 mm** et une **ETR** de l'ordre de **439 mm**, par contre les lames d'eau de **80.32 mm** ruisselées et **66.52 mm** infiltrées.

3. Conclusion

La synthèse des données climatiques nous permet de distinguer que la région d'étude est soumise à un climat méditerranéen, elle est caractérisée par deux saisons distinctes, l'une pluvieuse humide à précipitations relativement élevées et des températures basses, l'autre sèche moins pluvieuse et avec des températures relativement élevées.

La température moyenne annuelle est 17,82 C°, et la moyenne annuelle des précipitations est de 584,71 mm.

L'étude du climat en utilisant l'indice d'aridité de De Martonne a montré que notre secteur d'étude est en zone tempérée. Elle est marquée par une évapotranspiration réelle (ETR) de 439mm des précipitations, alors que la lame d'eau ruisselée constitué 80,32 mm et de la lame d'eau infiltrées de l'ordre 66,52.

CHAPITRE III

*APERÇU
GÉOLOGIQUE*

1. Géologie

La géologie de la région de Guelma est caractérisée par des formations allant du Quaternaire au Trias, présentant ainsi une lithologie très variée et qui comprend essentiellement : les alluvions (sables, graviers, cailloutis...etc.), les grès, les marnes, les argiles et les calcaires. Le fond du bassin correspond à un fossé d'effondrement comblé par des sédiments alluvionnaires d'âge Mio-plio-quaternaire, formant le réservoir aquifère de la vallée de Guelma. Ce remplissage constitue l'ancienne et actuelle terrasse de la vallée de la Seybouse.[19]

1.1.Nappes alluvionnaire de Guelma

Elle est située dans la vallée de l'Oued Seybouse en grande partie sur sa rive droite. Elle est sillonnée par l'Oued Seybouse d'Ouest en Est, depuis Medjez Amar jusqu'à Nador. (Djabri L, 1996). Ces alluvions sont perméables et sont alimentés par les eaux d'infiltrations des pluies et des apports latéraux du bassin versant de Guelma. Elle est constituée de trois terrasses distinctes (basse, moyenne, et haute). [17]

a. La basse terrasse (terrasse actuelle)

C'est la vallée dans laquelle coule l'actuel Oued Seybouse. Elle est formée de graviers, de sables et de galets. Son épaisseur croit vers l'Est, elle est de 8 m au Nord de la ville de Guelma et atteint 16 m au Nord-est de Boumahra, Le substratum est constitué de marnes à gypses et d'argiles du Miocène dans sa partie Ouest. A l'Est, il est constitué d'argiles et de grès numidiens. [17]

b. La moyenne terrasse

Elle est constituée d'un matériel détritique relativement fin en alternance avec des passées argileuses. Le substratum est toujours marneux à gypse. Son épaisseur est plus importante que celle de la basse terrasse (40 m environ).[17]

c. La haute terrasse (terrasse ancienne)

Elle est située au Sud de la moyenne terrasse et elle est formée d'alluvions grossières Plio-quaternaires (galets, graviers, grès, sables et quelques passées argileuses) perméables. La couche superficielle montre une affinité argileuse nette. Le substratum est aussi constitué de marnes à gypses et d'argiles du Miocène jusqu'à l'Oued Boussora. Vers l'Est, il est constitué d'argiles Eocènes. L'épaisseur de cette partie de la nappe aquifère est plus importante que

celles des deux premières et varie de 50 m à 150 m par endroits (H'Fais) entre Belkheir et Boumahra.

La plus grande quantité en eau de la nappe est exploitée par le biais de forages de différentes profondeurs, de puits, et de captage de sources.[17]

1.2.Géologie et stratigraphie

1.2.1. Le Primaire

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

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

1.2.2. 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.

1.2.3. Le Néritique

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.

a. Le Jurassique

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

b. Le Crétacé

Le Crétacé inférieur est représenté par des calcaires massifs ou lissés et de dolomies à algues d'âge Aptien, on le rencontre à Hammam Bradaa et Djebel Debagh.

Les calcaires massifs à microbrèches calcarinites avec des niveaux calcaires à chailles indiquent nettement le faciès néritique du Compagnien – Mæstrichtien (Vila 1972).

Le Crétacé supérieur est caractérisé par des niveaux calcaireux dolomitiques riches en orbitolines et des débris à Rudiste datant le Cénomaniens – Vraconien d'épaisseur limitée.

1.2.4. 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.

1.2.5. L'unité ultra – tellienne

Le faciès dominant est celui des marnes et marnocalcaires avec des barres de micrites à microfaunes variées (Delga et al, 1968).

La stratigraphie est la suivante, dont nous distinguons de bas en haut :

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

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

1.2.6. Le Numidien

Il forme les principaux reliefs de la région de Guelma (Mahouna, Houara).

Il est caractérisé par un flysch gréseux constitué par les trois termes suivants :

- épaisseur d'argile verte et rouge 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 (Lahondere, 1981).

1.2.7. Le Post – nappe

1.2.7.1. Le Mio-Pliocène

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 :

-La molasse de Guelma visible sur la route Guelma Bensmih, composé 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, argiles grises à gypses et à soufre et des calcaires lacustres.

1.2.8. Le Quaternaire

Les formations du Quaternaire sont la base de cette étude puisque avec les formations pliocènes, 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 :

1.2.8.1. 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 55m à 60m 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 90m à 100m au-dessus de la Seybouse. Cette dernière comprend tantôt des limons avec cailloux roulés, tantôt des conglomérats intercalés de bancs marno – calcaires un peu travertineux.

1.2.8.2. 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.[18]

2. La 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 De La Chavane (1910), les effets tectoniques dans la région de Guelma se sont manifestés surtout par des phénomènes de compression et de refoulement intense des plis qui sont en général déversés vers le Sud et le Sud-Est. Ces plis, souvent empilés les uns sur les autres, se chevauchent et se recouvrent à la façon d'écaillés imbriquées. Ce phénomène de structure écaillée est fréquent dans la chaîne atlasique. Dans ces plis déversés, les flancs inverses sont le plus souvent supprimés par compression et/ou par étirement.

Les formes synclinales s'observent par endroit, dans les zones plus ou moins épargnées par les effets tectoniques. Quant aux voûtes anticlinales, elles sont assez rares et quand elles existent, elles se trouvent plutôt à l'état de brachy-anticlinaux ou de dômes, structurés en horst et graben.[9]

3. Conclusion

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.

Le couplage des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des formations de la région d'étude, a permis de distinguer un ensemble du remplissage Mio plio-quadernaire, 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.[19]

Tab.9. description géologique et hydrogéologique des formations de la région d'étude (Moussa S.2006)

période	système	lithologie	épaisseur	Intérêt hydrogéologique	
				perméabilité	Type de nappe
Quaternaire	récent	-alluvions actuelles : Galets, calcaires, limons, travertins.	15	perméables	*nappe de la basse terrasse
		-alluvions anciennes *basse terrasse : sables, cailloutis, limons.	30-50		*nappe de la moyenne terrasse
		*moyenne terrasse : Sables, cailloutis, galets, limons, conglomérats. *haute terrasse : Galets, conglomérats, limons, sables.	100		*nappe de la haute terrasse
	ancien	Tufs calcaires	-	perméable	
	Moi-palioène	Argile à gypse	-	imperméable	substratum
	palioène	Travertins	-	perméable	Nappe de travertins

CHAPITRE IV

HYDROGÉOLOGIE ET GÉOMETRIE DE L'AQUIFÈRE

1. Géométrie de l'aquifère

1.1. Prospection géophysique

La prospection électrique implique la détection d'effets produits lorsqu'un courant électrique traverse le sous-sol.[9]

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

En 1971, une étude géophysique par prospection électrique a été réalisée par la C.G.G (compagnie générale de géophysique) dans le bassin de Guelma, en vue de reconnaître et localiser les horizons aquifères.[21]

Suite à la demande de la direction de l'Hydraulique de la wilaya de Guelma (D.H.W), une deuxième campagne géophysique dans la plaine de Guelma par sondage électrique vertical a été réalisée par l'entreprise nationale de géophysique (E.N.A.GEO. 1997-1998) dans le but, cette fois-ci d'étudier l'assise perméable plus profonde (sous les marnes du Miocène), 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.

L'objectif de la prospection était de déterminer :

La profondeur du substratum marneux à gypse du Miocène et l'épaisseur de l'aquifère alluvionnaire.

Identifier les formations géologiques en vue de localiser celles qui s'avèrent les plus intéressantes du point de vue hydrogéologique.

Les grands accidents de bordure qui accompagnent le fossé d'effondrement alimentant la nappe par les infiltrations des eaux de pluies.[14]

1.2. Echelle de résistivité

Une échelle de résistivité corrélée à 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. [14]

Tab.10.Échelle des corrélations résistivités-lithologie (CGG.1971- modifié)

Période	Lithologie	Résistivité (ohm.m)	Perméabilité
Plio-quaternaire	-Alluvions grossière de la Seybouse.		Formation perméable
	Niveau sec	200 à 400	
	Niveau humide	70 à 150	
	-Calcaire travertin crayeux de Guelma	100	Formation perméable
	-Sables et graviers	100 à 200	Formation perméable
	-sables et graviers à passées argileuses	50 à 80	Formation perméable
	-Limons sableux	15 à 50	Formation perméable
	-limons argileux	8 à 10	Formation imperméable
Miocène	-Marno-calcaire	15 à 30	Formation imperméable
	-Marnosulfo-gypseuse	1 à 8	Formation imperméable
Oligo-Miocène Inferieur	-Argile numidienne	10 à 48	Formation imperméable
	-Argile gypseuse	15 à 30	Formation imperméable
	-Argile numidien	40 à 70	Formation perméable

1.3.Interprétation des coupes géoélectriques

L'interprétation des résultats des coupes de sondages électriques dans la zone d'étude en se basant sur la lecture des résistivités des formations traversées, a permis de faire une description lithologique des formations géologiques susceptibles de présenter un intérêt aquifère.

La figure 13a, montre une partie centrale épaisse et résistante (80 Ω m) correspondant à la nappe alluvionnaire limitée par deux failles correspondant aux axes des Oueds Maiz et Zimba. Cette partie peut présenter un intérêt aquifère.[24]

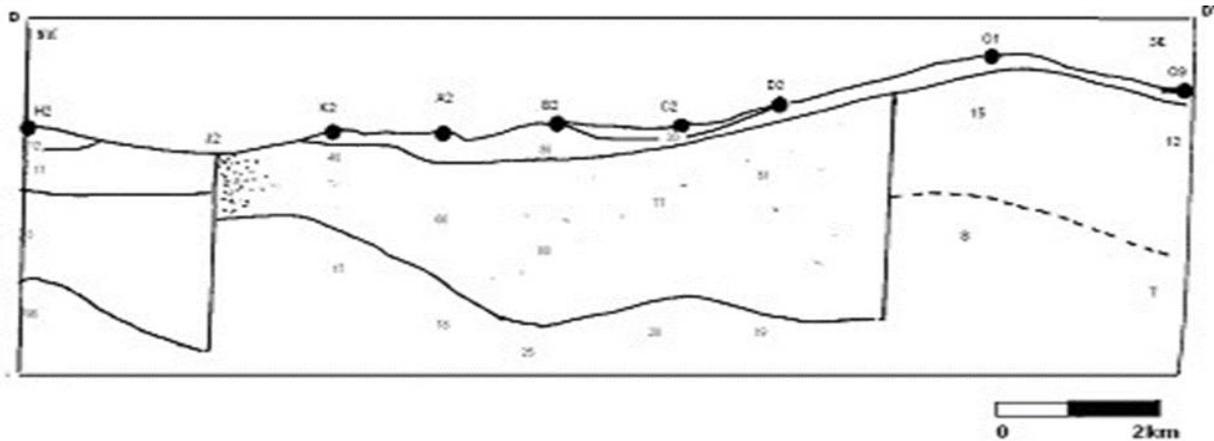


Fig.13a.Coupe géoélectrique DD'.

De part et d'autre, cette partie est limitée par deux horizons de faibles résistivités que l'on peut attribuer aux marnes argileuses. La figure 13b, montre aussi entre les points de sondage, A4 et C4, une couche épaisse de 100 à 120 m et de résistivité égale à 150 Ω m que l'on peut attribuer aux alluvions grossières de la nappe et donc d'intérêt aquifère.

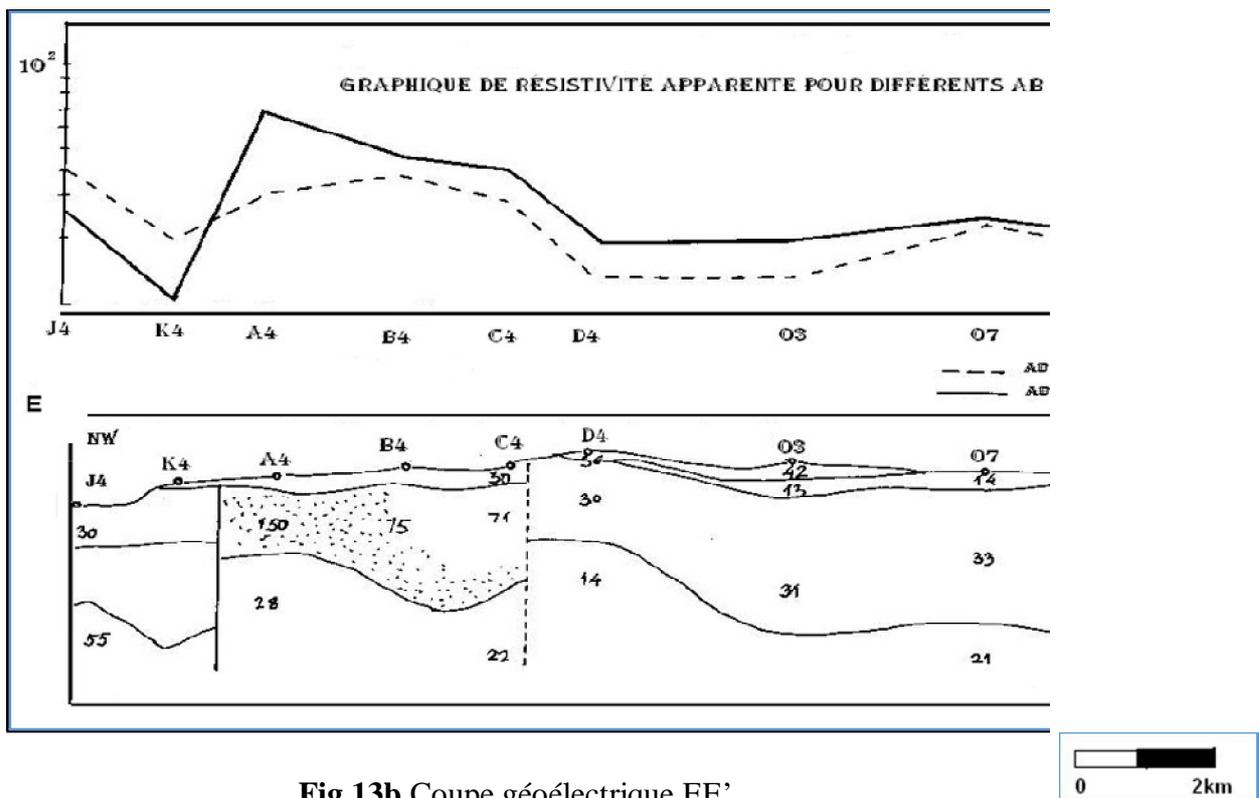


Fig.13b.Coupe géoélectrique EE'

1.4. Carte du Substratum

La carte de la profondeur du toit du substratum par rapport au sol a été réalisée à l'aide des coupes transversales des sondages géo-électriques établies dans la zone d'étude.

Le substratum imperméable est formé par des marnes à gypses et d'argiles du Miocène de résistivité de 1 à 8 ohm-m, jusqu'à l'Oued Boussora. Vers l'Est, il est constitué d'argiles éocènes.

La profondeur du toit de substratum varie entre 30 et 270 m d'altitude dans la zone d'étude, ce qui traduit un bassin d'effondrement de la plaine de Guelma, comblé par des dépôts alluvionnaires du plio-quadernaire.

Le substratum est moins profond au Sud de Guelma avec 270 m d'altitude. Il afflue en surface dans certains endroits où on note l'émergence de plusieurs sources marquant les séparations des terrasses à savoir les sources de : Ain Guettich, Jurodon et Oued Maiz.[14]

1.4.1. Coupe hydrogéologique

Une dépression du substratum, marquée par la faible altitude au Sud de Boumahra (120 m), au niveau de la haute terrasse.

Le substratum devient encore plus profond à l'Est de Boumahra (inférieur à 60 m) où le remplissage alluvionnaire est très important, traduisant ainsi un bon réservoir pour les eaux souterraines.

La structure onduleuse du substratum au niveau de la plaine, laisse envisager plusieurs dépressions criant ainsi des bons réservoirs pour les eaux souterraines.

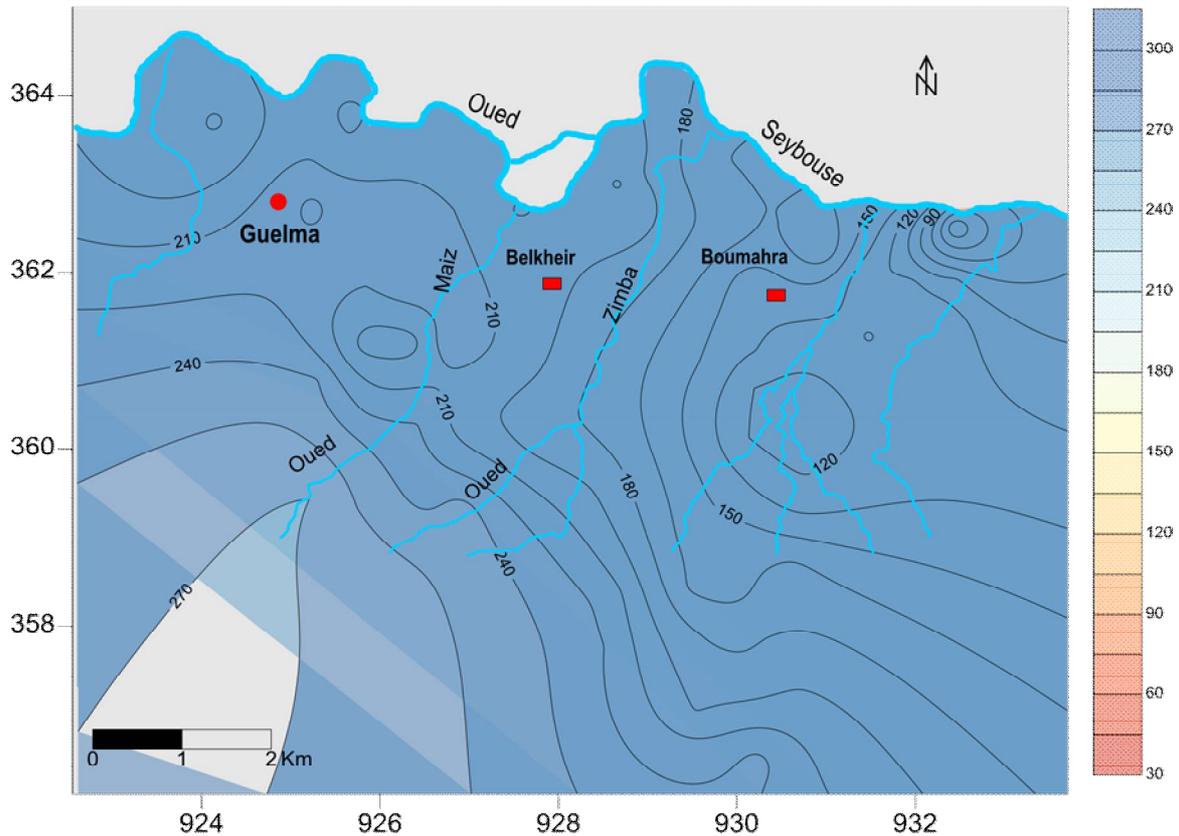


Fig.14. Carte du toit du substratum imperméable de la nappe alluviale de Guelma (Kachi.N, 2015)

2. Description hydrogéologique de la nappe alluviale

Des coupes hydrogéologiques ont été dressées afin de visualiser la géométrie et la structure de la nappe aquifère.

2.1. Coupe hydrogéologique Nord-Sud (d'après Gaud)

Cette coupe est d'orientation Nord – Sud traverse la ville de Belkheir à l'Est. Nous observons presque les mêmes ensembles aquifères :

Les alluvions grossières (cailloutis et sable), d'une épaisseur de 15 m environ, forment la basse terrasse, d'une épaisseur de 30 m environ, avec la présence d'un horizon argileux, d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 8 m, qui s'intercale dans les alluvions pour former la moyenne terrasse. Cette couche est plus importante avec ses 100 m d'épaisseur, en moyenne, (elle atteint 110 m, forage G2). Elle est formée essentiellement de dépôts plio-quaternaires grossiers, constitués de cailloutis et de graviers avec de petites lentilles d'argiles de faible épaisseur au niveau des forages BK1. La colonne stratigraphique du forage G2 indique une nature semi perméable. L'ensemble forme les hautes terrasses.

Les formations plio-quaternaires (galets et graviers) forment un bon réservoir aquifère, dont le substratum imperméable est constitué des formations miocènes marneuses et qui présentent un sous bassement au centre de la plaine (ancien lit probable de la Seybouse).

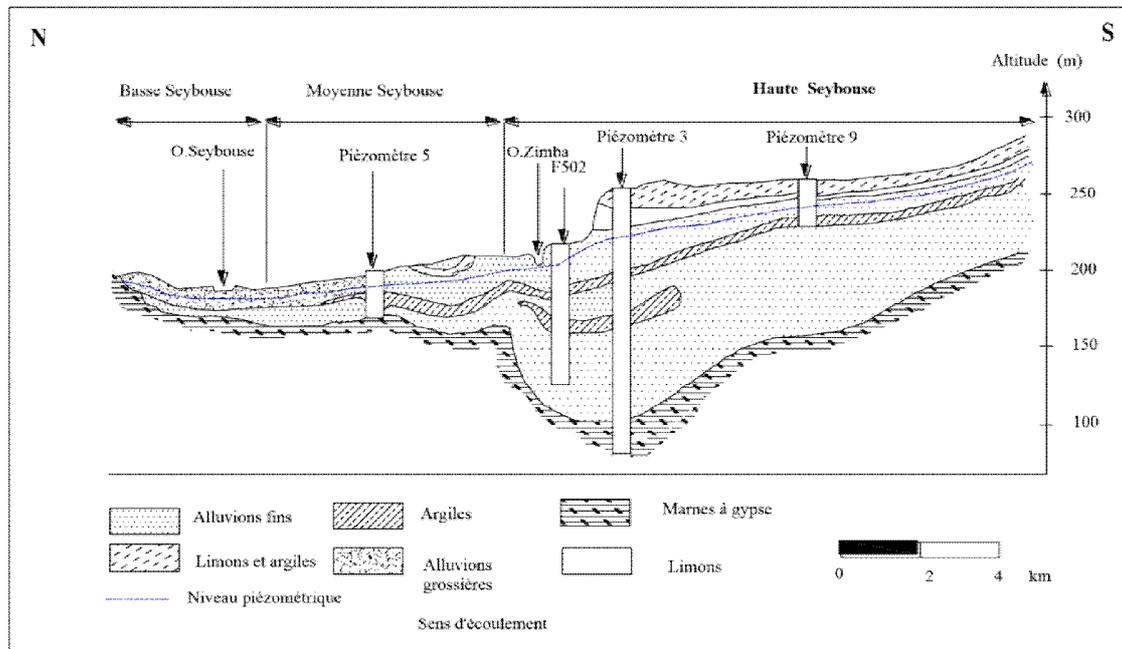


Fig.15.Coupe hydrogéologique NNW-SSE (Gaud, 1974.)

2.2. Coupe hydrogéologique Nord –Sud (d’après Gaud)

Cette coupe est établie à l'Ouest de Belkheir mais toujours d'orientation Nord – Sud. Nous distinguons du Nord au Sud quatre nappes aquifères différentes :

- Au Nord, la basse terrasse formant la nappe actuelle de la Seybouse. Elle est constituée par des alluvions grossières d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 10 m reposant sur un substratum marneux à gypse ;
- La moyenne terrasse est constituée d'un matériel relativement fin en alternance avec des passées argileuses d'une épaisseur plus au moins importantes d'environ 40 m et repose sur un substratum marneux à gypse
- La haute terrasse a une épaisseur plus importante (plus de 90 m), grâce à un remplissage alluvionnaire, composé essentiellement de sables, graviers et de cailloutis avec de petites intercalations argileuses.
- La forme du substratum marneux témoigne de l'ancien lit de la Seybouse qui été positionné plus au Sud que son parcours actuel. L'affleurement des marnes à gypse du

Miocène forme un seuil qui sépare les nappes aquifères des vallées ancienne et actuelle.

- La partie sud est occupée par les calcaires travertineux du Pliocène qui sont en contact direct avec les alluvions des hautes terrasses. D'après la colonne stratigraphique du piézomètre P3, il s'agit de tufs vacuolaires ou spongieux, de calcaires blancs crayeux fissurés avec de nombreuses recristallisations de calcite.[9]

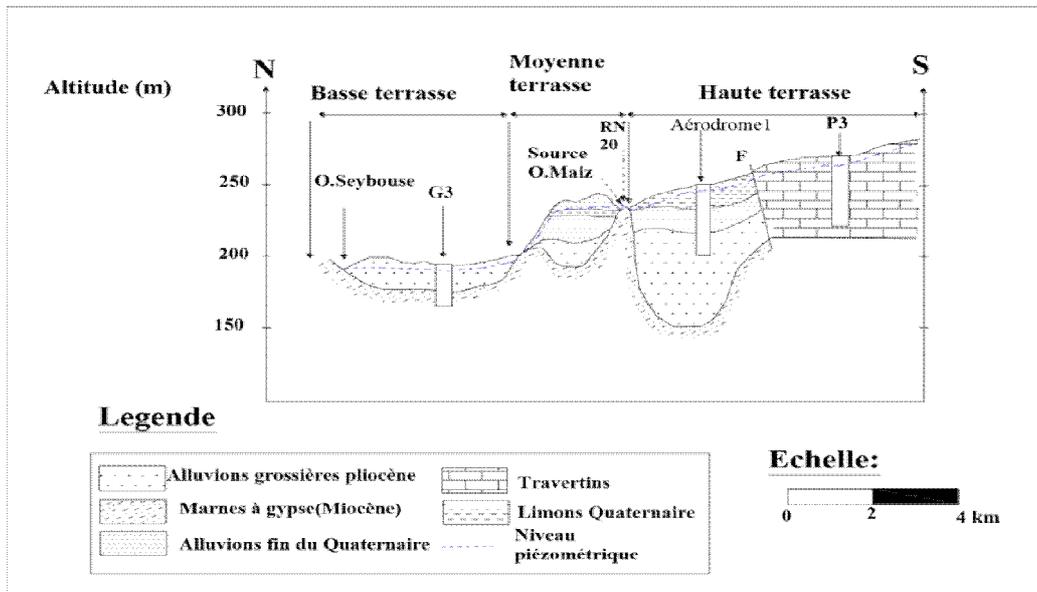


Fig.16.Coupe hydrogéologique Nord –Sud (Brahmia, 2016).

3. Propriétés hydrodynamiques

3.1.La carte de transmissivité de la nappe aquifère de Guelma

Au niveau de la nappe de basse terrasse, les plus fortes valeurs de transmissivité sont localisées entre Oued Maïz et Oued Skhoûn, au voisinage du lit actuel de l'oued Seybouse, où on a des valeurs de l'ordre de $3,8 \cdot 10^{-3}$ à $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Dans cette nappe, les transmissivité diminuent de l'ouest vers l'est, où ils atteignent les plus faibles valeurs ($2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$), entre ChaabetMaamora et Oued Boussora, cela est dû à l'augmentation de l'épaisseur de la trame argileuse dans cette partie. Plus à l'Est, la transmissivité diminue en se dirigeant vers MechtetRegrig ($6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$).

Au niveau de la nappe des travertins, les valeurs de transmissivité, augmentent vers le Nord, à la limite avec la haute terrasse, où elles atteignent la valeur de $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Dans la haute terrasse, dans la partie Nord-Ouest, entre oued Skhoûn et oued Maïz, les valeurs de transmissivité augmentent du Sud vers la nappe des basses terrasses, où les alluvions deviennent plus grossières. Au niveau de ChaabetMaamora, on note les plus grandes valeurs de transmissivité ($4,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$). [18]

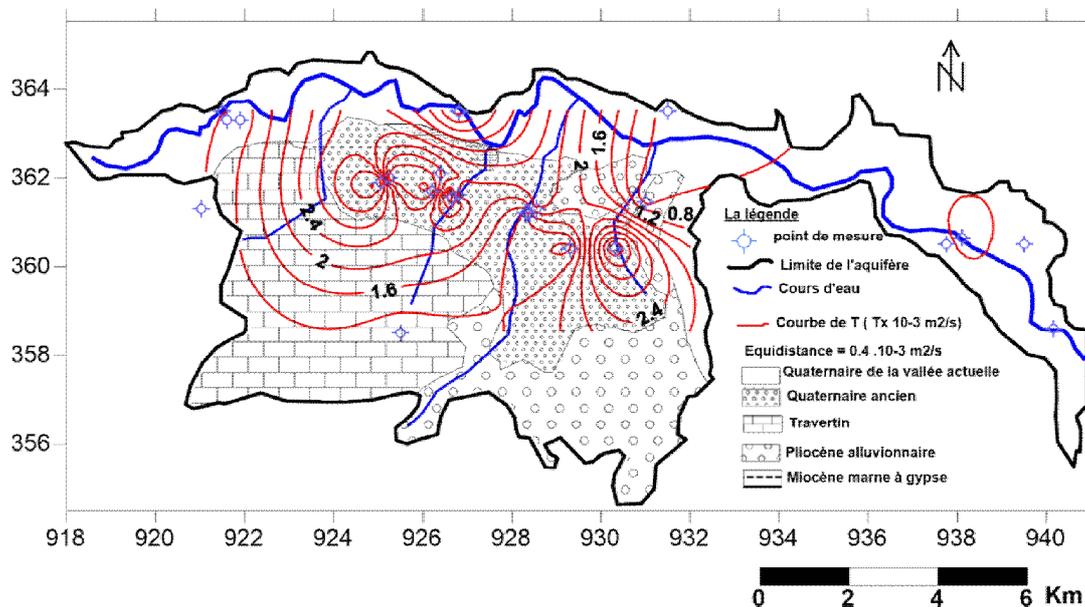


Fig.17. Carte de transmissivité de la nappe alluviale de Guelma. (inMoussa 2017)

3.2. Piézométrie de l'aquifère alluvionnaire de Guelma

L'établissement de carte piézométrique est une étape importante dans l'étude hydrogéologique. La carte piézométrique permet de visualiser la morphologie de la surface piézométrique (la forme et l'espacement des isopièzes), définit le sens de l'écoulement et déduit les zones d'alimentation et de sortie des eaux de la nappe souterraine dans la plaine [5]. Elle permet aussi d'étudier la nappe d'eau souterraine en tenant compte de ses paramètres hydrodynamiques, l'évolution des niveaux piézométriques, les gradients hydrauliques et les axes de drainages.

Les travaux d'exploitations et les études hydrogéologiques précédentes sur la plaine de Guelma ont montré la présence des aquifères alluvionnaires d'âge plio-quaternaires occupant la plaine de Guelma.

D'après la carte piézométrique établie sur la base des données recensées durant décembre 2013 (figure 18) 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 Oued Seybouse. Ce qui se traduit par l'émergence de l'Ouest vers l'Est de plusieurs sources à l'exutoire de la nappe des hautes terrasses à savoir : source Juredon, Guettich, Zouaniz, Hamma...etc.

- La profondeur de l'eau est moins de 10 m au centre et plus de 30 m aux bordures.

- L'écoulement des eaux souterraines est très influencé par le pompage excessif pour ne pas dire surexploitation de la nappe et de la recharge à travers les eaux d'irrigation.

- L'arrangement des courbes piézométriques est parallèle à la bordure Sud traduisant une limite à flux entrant et perpendiculaire du côté Sud-Est de la plaine indiquant une limite étanche.

- Les côtes s'abaissent progressivement vers le Nord d'environ de 30 m sur une distance de 6 km, soit une perte de charge 5 m/km.

- L'existence de deux lignes de partages des eaux, de direction Sud-Nord, séparant respectivement les écoulements vers l'oued Maiz, où la nappe de la haute terrasse se fait alimentée latéralement par les travertins, et vers Oued Zimba et Oued Boussourra entre Belkheir et Boumahra.[14]

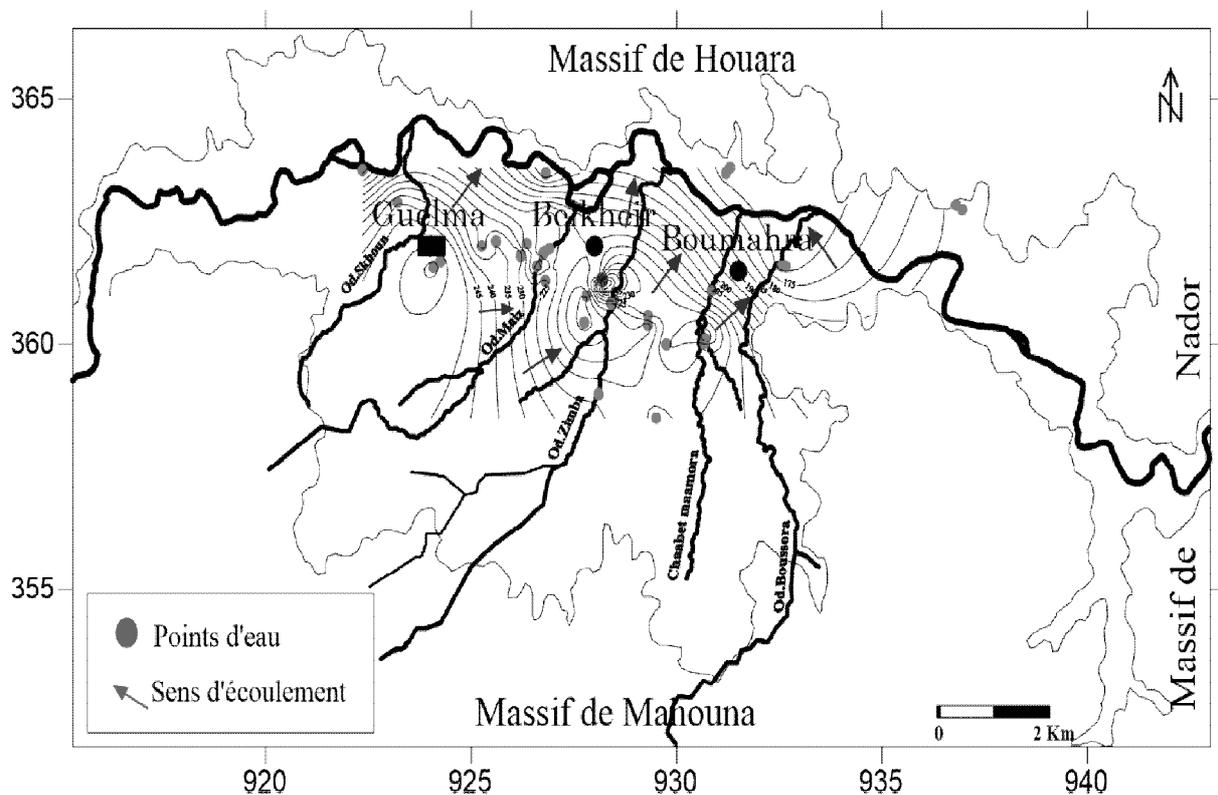


Fig.18. Carte piézométrique de la plaine de Guelma, décembre 2013 (in Latifi.S, 2017)

4- Conclusion

On peut conclure ce qui suit :

Un aquifère de type alluvionnaire constitué de trois terrasses distinctes (basse, moyenne et haute) d'altitudes différentes, contenu dans un remplissage alluvionnaire d'âge plio-quadricaire reposant sur un substratum marneux à gypses d'âge miocène.

D'après la carte piézométrique établie, l'écoulement des eaux souterraines se fait généralement du Sud vers le Nord, c'est-à-dire de la nappe vers Oued Seybouse. Les bordures

Sud et Sud-Ouest de la plaine de Guelma, formées essentiellement par des calcaires travertins constituent une limite perméable à flux imposé.

L'alimentation de la nappe alluviale se fait par les infiltrations des eaux de pluies à travers les alluvions du plio-quadricaire et latéralement par les calcaires travertins du pliocène, les grès numidiens peu perméables et la molasse.

Le toit du substratum est plus profond de 60 à 120 m d'altitude (au Nord-Est et au Sud de Boumahra). Il s'agit de plusieurs dépressions au sein même de la zone d'effondrement, comblées par des dépôts miocènes (argiles et marnes à gypses) et plio-quadricaire (alluvions hétérogènes sous forme de terrasses), constituant ainsi des bons réservoirs pour les eaux souterraines.

Les valeurs de transmissivité sont comprises entre $10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$ et $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$. Elles diminuent d'Ouest en Est et de Nord en Sud. Les valeurs de perméabilité sont de l'ordre de 10^{-5} m/s . 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. Dans la haute terrasse, les valeurs de transmissivité augmentent du Sud vers le Nord, où les alluvions deviennent plus grossières. On note les plus grandes valeurs de transmissivité ($4,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$), au niveau de Chaabet Maamora.

CHAPITRE V

VULNÉRABILITÉ À LA POLLUTION

1. Introduction

La qualité naturelle des eaux souterraines peut être altérée par l'activité anthropique. La détérioration de la qualité de l'eau peut être appréciée par mesure des paramètres physico-chimiques et bactériologiques. Dans le cas d'une détérioration jugée importante, l'eau ne sera plus considérée comme potable pour la consommation humaine. Elle pourra être utilisée telle quelle pour d'autres fins, ou devra subir un traitement approprié pour retrouver sa potabilité.

L'eau des nappes n'est donc pas à l'abri de la pollution et l'autoépuration naturelle n'est pas complète dans toutes les nappes vis à vis de certaines substances. Les techniques de décontamination des nappes polluées sont longues et coûteuses et incapables de restaurer pleinement la potabilité des eaux selon Mariotti, (1999).[24]

2. La vulnérabilité

La vulnérabilité d'une nappe à la pollution dépend du type de nappe, de l'épaisseur de la zone non saturée et de sa composition lithologique, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère. Dans l'étude de vulnérabilité, on ne doit prendre en compte que les facteurs permettant de favoriser ou de ralentir l'infiltration dans le sol et dans la zone non saturée d'une eau chargée en polluant et son entrée dans la nappe (Lallemand-Barrès et al, 1999).

Elle est liée à un niveau de risque dépendant principalement de trois facteurs :

- les caractéristiques hydrogéologiques du site (épaisseur, perméabilité, substrat et des couches géologiques en particulier)
- les activités humaines, actuelles et anciennes (les quelles par exemple liées à la proximité d'autres puits, cuves, fosses ou réseaux d'égout, friches polluées (actifs ou anciens etc.).
- certains risques naturels tels que risque sismique, coulées de boue, pénétration d'un « biseau salé » [20]

La vulnérabilité des nappes à ces diverses pollutions est conditionnée par plusieurs facteurs, parmi lesquels on cite :

- Le pouvoir filtrant du réservoir.
- L'épaisseur de la zone non saturée du réservoir.
- La vitesse d'écoulement des eaux souterraines.

- La nature du réservoir (captif ou libre).[10]

3. Les paramètres de vulnérabilité des nappes souterraines

La vulnérabilité des nappes dépend du type de nappe, libre ou captive et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère. Les nappes libres sont les plus vulnérables; les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique ; d'autre part, la fluctuation verticale saisonnière du niveau piézométrique imprègne les particules de la zone non saturée et peut entraîner les substances qui s'y trouvent vers l'aquifère.

En revanche, les nappes captives sont mieux protégées par les couches qui les surmontent. Donc les sédiments meubles peuvent colmater les fissures et ralentir voire empêcher le transfert des polluants vers l'aquifère- Dans le cas contraire, les polluants s'infiltreront rapidement et réapparaissent en l'état dans les sources. Ils auront un effet accentué mais de courte durée. [6]

4. Les principaux types et origines de pollution dans la zone d'étude

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique et biologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'Homme et ses activités. Elle perturbe parfois considérablement la composition physico-chimique des eaux de surface, 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, aussi compromet-t-elle les utilisations de l'eau et l'équilibre du milieu aquatique. [10]

4.1.Pollution urbaines et domestiques

La pollution urbaine constitue une source de pollution importante, en effet toutes les agglomérations situées le long du cours d'eau 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.

Dans le cas d'assainissement, collectif ou individuel défectueux ou un contact hydraulique avec les nappes, les substances indésirables contenues dans les eaux ménagères (matières organiques, solvants, détergents micro-organismes, antibiotiques...), peuvent atteindre la nappe. Les trois décharges publiques à savoir celles situées respectivement au Nord de Guelaât Bou Sbâa, à l'Est de d'Héliopolis et au Nord de la

ville de Guelma du coté de Djebel Hallouf, contribuent eux aussi à la pollution par leur lixiviation. Notons que d'autres décharges sauvages existent également dans notre zone d'étude. [5]

Tab.11. les caractéristiques des eaux usées domestique dans la wilaya de Guelma Juillet 1993 (in Benmarce 2007)

paramètres	Valeurs moyennes	
	Oued Skhoun	Oued Maiz
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	//
Zink (Zn) mg/L	Traces	0,10

4.2.Pollution industrielle

L'essor industriel qu'a connu la région de Guelma a donné naissance à beaucoup de petites et grandes industries les rejets de ces derniers sont constitués d'eaux usées et de déchets solides et se font en général dans les oueds sans traitement préalable. Les stations de lavage et de carburants et les unités industrielles déversent également leurs déchets dans les affluents de l'oued Seybouse (O. Skhoun, O. Maiz, O. Zimba, et O. Boussora). Ces rejets

peuvent occasionner des modifications aux eaux de surface et souterraines et compromettent la santé de l'homme.[5]

Tab.12. Les caractéristiques des eaux industrielles dans la région de Guelma (Juillet 1993)in Benmarce 2007

Unité industrielle	CERAMIQUE	SOGEDIA
paramètres	Valeurs moyennes	
T°C	30	29,70
pH	7,4	7,21
Matière organique (mg/L)	19,40	560
DBO ₅	70	275
MES (mg/L)	0,05	12,15
Fer (Fe) (mg/L)	0,19	0,10
Chrome (Cr) (mg/L)	0,10	0,04
Nickel (Ni) (mg/L)	0,60	0,04
Plomb (Pb) (mg/L)	0,70	< 0,10
Zinc (Zn) (mg/L)	0,30	0,04

4.3.Pollution d'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 pesticides dans notre zone d'étude contribuent à la dégradation des eaux de surface 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. Les élevages intensifs des bovins (étables, fermes pilotes) et volailles (poulaillers), produisent une grande quantité de déjections azotées qui

a. Les types d'engrais

Les engrais sont à base de fumier, à base de produits chimiques et à base de minéraux. Une utilisation d'engrais au moment propice en utilisant des quantités adéquates peut augmenter de manière importante la croissance des plantes.

Les engrais peuvent être classés en deux catégories :

➤ Engrais Organiques

Ils sont obtenus à partir de matières vivantes d'origine animale ou végétale tels que les déchets animaux (fumier) et les résidus de culture (les feuilles, tiges) et de nombreux autres produits dérivés d'organismes vivants.

➤ Engrais Inorganiques (également appelés engrais minéraux et chimiques)

Les produits proviennent essentiellement de sources non vivantes au travers de processus artificiels. La plupart des engrais commerciaux entre dans cette catégorie.

L'appellation des engrais minéraux est normalisée, par la référence à leurs trois éléments de base: azote (N), phosphore (P), potassium (K). On parle ainsi : d'engrais simples (N,P, K), d'engrais binaires (NP, NK, PK), et d'engrais ternaires (NPK) si les trois éléments sont associés ensemble. Les engrais ternaires et binaires sont désignés par des chiffres correspondant à leur teneur en éléments fertilisants. Des éléments secondaires, calcium (Ca), soufre (S), magnésium (Mg) et des oligoéléments tels que fer (Fe), manganèse (Mn), molybdène (Mo), cuivre (Cu), bore (B), zinc (Zn), chlore (Cl), sodium (Na), cobalt (Co), vanadium (V) et silicium (Si).

b. Les engrais les plus utilisés dans la zone d'étude

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.

- **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 à 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 P_2O_5)**, 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 dont l'impact sur la culture est visible. [14]

5. Vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Guelma

Compte tenu du taux élevé de pollution par les nitrates remarqué surtout dans l'axe Guelma – Belkheir, Boumahra, les eaux souterraines de la nappe alluvionnaire de Guelma risquent de recevoir aussi, indirectement tous les autres polluants présents dans les eaux de l'Oued Seybouse et ses affluents (Oued Skhoun, Oued Maiz, Oued Zimba et Oued Boussora) par le biais de l'irrigation. [6]

Une carte de vulnérabilité à la pollution établie par Sabah.L en 2017 à partir des données de Forages en utilisant la méthode de GOD basée sur la combinaison de trois paramètres :

- Type de nappe (Groundwater occurrence) ;
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Over all aquifer class) ;

- Profondeur de la nappe (Depth to Groundwater table).

La détermination de ces facteurs aboutira à l'élaboration d'une carte de vulnérabilité. 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.[16]

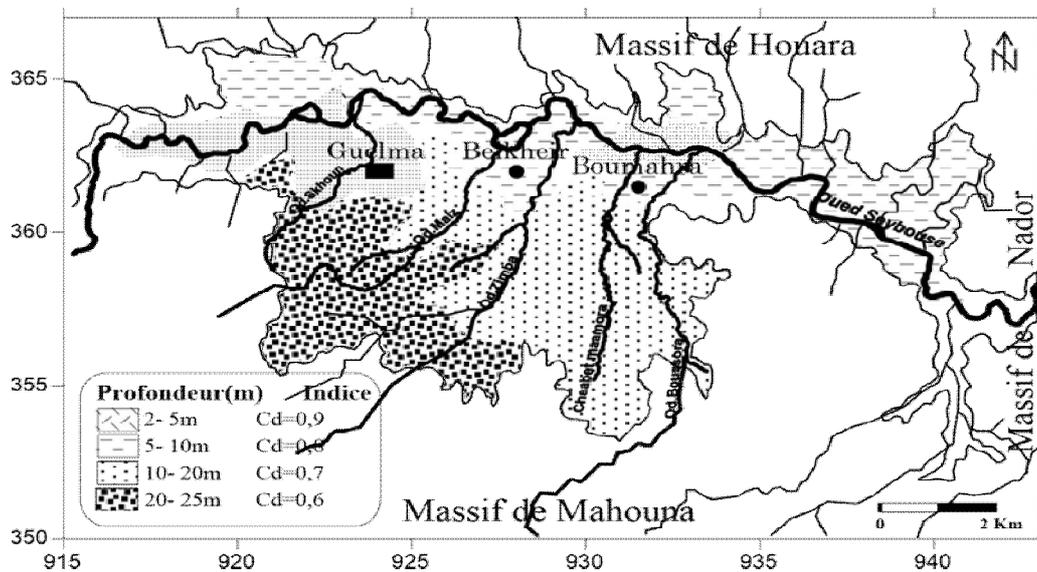


Fig.20. Carte des valeurs d'indice de la profondeur de la nappe aquifère de la plaine de Guelma (Latifi.S, 2017)

Le calcul des indices globaux aboutit à la carte de vulnérabilité. L'observation de cette dernière montre trois classes de vulnérabilité d'inégales extensions.

b. La nature de la zone non saturée

La nature de la zone non saturée joue également un grand rôle dans la protection de la nappe. Pour les formations imperméables la vulnérabilité est faible, à l'inverse pour les formations perméables la vulnérabilité est forte, et pour les formations à perméabilité intermédiaire la vulnérabilité est moyenne. En cas de zone non saturée hétérogène il faut considérer le cas le plus favorable si la formation imperméable est suffisamment épaisse (supérieure à une quinzaine de mètres, ce qui est suffisant pour jouer un bon rôle d'écran imperméable).

c. Le type de nappe

Une nappe captive est protégée des infiltrations superficielles pour des raisons de pression c'est-à-dire la vulnérabilité est faible, contrairement pour la nappe libre. Il peut exister des nappes semi-captives en cas de limite supérieure semi-perméable pour ce critère la vulnérabilité est moyenne.

d. La perméabilité de l'aquifère

Plus la formation aquifère est perméable, plus la vitesse de circulation de l'eau est forte et plus la nappe vulnérable.

e. La relation avec le réseau hydrographique

Les cours d'eau et plans d'eau peuvent facilement transporter des pollutions aux nappes avec lesquelles ils sont en relation hydraulique.

Si l'épaisseur de la zone non saturée est supérieure à 60 m, la vulnérabilité est faible, on ne considère pas les autres critères.

Dans le cas contraire, on calcule une note sur 20 qui permet de ranger la vulnérabilité en trois classes (faible, moyenne, forte). Pour chacun des 5 critères listés ci-dessus. On distingue 3 classes auxquelles on affecte la note 0, 1 ou 2 (0 pour la vulnérabilité la plus faible, 2 pour la plus forte, 1 pour la vulnérabilité intermédiaire). On applique ensuite une pondération sur les critères pour tenir compte de leur importance relative : les critères prépondérants (épaisseur ZNS et perméabilité de l'aquifère) ont été affectés d'un poids de 3, les critères importants d'un poids de 2 (nature ZNS) et les autres critères d'un poids de 1 (type de nappe, relation avec réseau hydrographique).

Le type de nappe, bien que très important, n'a été affecté que d'un poids de 1 car d'autres critères rentrent déjà en compte pour une nappe captive (la nature de la zone non saturée est une formation imperméable, il n'y a pas de relation avec le réseau hydrographique et bien souvent l'épaisseur de la zone non saturée sera forte).

Le tableau suivant précise les classes pour chacun des critères et présente les notes déjà pondérées (ainsi pour les critères avec un poids de 3 on aura les notes 0, 3 et 6 ; pour un poids de 2 : 0,2 et 4 ; pour un poids de 1 : 0,1 et 2). [22]

Tab.13.critères de vulnérabilité avec leurs notes pondérées

Estimation détaillée de la vulnérabilité			
Epaisseur de la zone non-saturée	< 15 m V1=6	de 15 à 30 m V1= 3	de 30 à 60m V1= 0
Nature de la zone non-saturée	Formations perméables (sables moyens à grossiers, graviers) V2=4	Formations à perméabilité intermédiaire (sables argileux, argiles sableuse) V2= 2	Formations imperméables ou très peu perméables (argiles, socle non fissuré) V2=0
Type de nappe	Libre V3=2	Semi-captive V3= 1	Captive V3= 0
Perméabilité K de la formation aquifère	Forte : $K > 10^{-3}$ m/s ou aquifère composé de calcaires, sables grossiers, graviers V4= 6	Moyenne : K compris entre 10^{-5} et 10^{-3} m/s ou aquifère composé de sables fins à moyens V4=3	Faible : K inférieur à 10^{-5} m/s ou aquifère composé de sables argileux ou de formations peu perméables V4= 0

Relation avec le réseau hydrographique	Oui V5= 2	Inconnue ou incertaine V5= 1	Non V5=0
--	---------------------	--	--------------------

En additionnant les notes pondérées de chacun des critères, on aboutit à une note $V = V1+V2+V3+V4+V5$ comprise entre 0 (vulnérabilité la plus faible possible) et 20 (Vulnérabilité la plus forte possible). Le tableau suivant indique à quelle classe de vulnérabilité correspond chaque intervalle de notes :

Tab14. Correspondance entre la note pondérée et la classe de vulnérabilité

$V = V1+V2+V3+V4+V5$ (note pondérée /20)	de 0 à 6	de 7 à 12	de 13 à 20
Classe de vulnérabilité	faible	Moyenne	Forte

Nous avons essayé d'appliquer cette méthode sur les forages de la région d'étude, où on a abouti aux résultats de vulnérabilité suivants :

Tab.15. les critères de vulnérabilité des forages étudiés dans la plaine alluviale de Guelma (voir annexe)

Forage	Epaisseur de la zone non-saturée	Nature de la zone non saturée	Type de nappe	Perméabilité (m/s)	Relation avec réseau hydrographique
BK1	15	perméable	Libre	$0,01.10^{-3}$	Oui
BA3	25	impermeable	Libre	$0,01.10^{-3}$	Oui
Oued Maiz Rail	20	perméable	Libre	$0,01.10^{-3}$	Oui
GU 6 bis	15	impermeable	Libre	$0,01.10^{-3}$	Oui
BA2	42	Semi-perméable (argile, gravier)	Libre	$0,01.10^{-3}$	Oui

Tab.16. les valeurs de vulnérabilité des forages étudiés dans la plaine de Guelma

Forage	V1	V2	V3	V4	V5	V
BK1	3	4	2	0	2	11
BA3	3	0	2	0	2	7
Oued Maiz Rail	3	4	2	0	2	11
GU 6 bis	3	0	2	0	2	7
BA2	0	2	2	0	2	6

D'après le tableau ci-dessus les forages BK1, BA3, Oued Maiz Rail, GU 6 bis présentent une moyenne vulnérabilité, et le forage BA2 présente une faible vulnérabilité.

7. Conclusion

La nappe alluviale de Guelma se trouve menacée par de nombreux foyers de pollution. Selon une carte de vulnérabilité on distingue trois zones vulnérables à la pollution : les zones de moyenne vulnérabilité 30%, les zones de forte vulnérabilité 45%, les zones de faible vulnérabilité qui présentent 25% de la surface totale.

L'estimation de la vulnérabilité à la pollution dans la zone des forages, basée sur des critères hydrogéologiques tirés des logs stratigraphiques des forages en utilisant des notes et des pondérations, a montré que les forages BK1, BA3, Oued Maiz Rail, GU 6 bis présentent un risque moyen de vulnérabilité à la pollution, par contre pour le forage BA2 le risque de vulnérabilité à la pollution est faible.

CHAPITRE VI

PÉRIMÈTRES DE PROTECTION

1- Introduction

Les eaux souterraines représentent environ la majorité de la quantité d'eau mobilisée pour l'approvisionnement en eau potable. Elles offrent en général l'avantage de ne pas nécessiter des traitements poussés avant leur mise à disposition pour la distribution.

Lapénétration de cette ressource nécessite la mise en place de périmètres de protection destinés à éviter les pollutions diverses pouvant altérer la qualité des nappes phréatiques.

La qualité des ressources en eau de la nappe alluviale de Guelma connaît une dégradation croissante ces dernières années sous l'effet de la présence de foyers de pollution engendrés par des activités anthropiques. Il est devenu, de ce fait, nécessaire de mettre en place des mécanismes et des actions visant la préservation et la sauvegarde de ces ressources. La prévention de la contamination à l'échelle locale prévoit l'établissement de périmètres de protection autour des ouvrages de captages.[20]

2. Méthodes de délimitation des périmètres de protection des captages d'eaux souterraines

Cette partie concerne la plupart des méthodes de délimitation des périmètres de protection des captages d'eau citées dans la littérature internationale.

2.1.Approche Cartographique

Cette approche qualitative est basée sur l'analyse des faciès lithologiques des terrains de la couverture (sol et zone non saturée), de la forme de la surface piézométrique de la nappe, des conditions aux limites naturelles de l'aquifère capté (zones de recharge, limites d'alimentation, limites étanches, exutoires, etc.) pour la délimitation des zones de protection du captage, notamment sa zone d'alimentation. Les secteurs à protéger sont constitués en priorité par les zones principales de recharge de la nappe.[15]

2.2.Approche empirique

2.2.1. Méthode de Rehse

Cette méthode consiste à estimer le pouvoir épurateur de la couverture (sol et zone non saturée) et celui de la zone saturée (la nappe) vis-à-vis d'une pollution lors de son transfert depuis la surface du sol jusqu'au captage à protéger. Cette capacité de filtration (atténuation de la concentration de la pollution) dépend du faciès lithologique et de l'épaisseur des terrains

de la couverture, des caractéristiques de la zone saturée (lithologie et texture) et de la longueur du trajet empreinte par la pollution dans la nappe.

La méthode définit, pour chaque type de faciès rencontré par le polluant, un index (I) qui dépend de son pouvoir épurateur (vis-à-vis de cette pollution):

$I = 1/H$ (H= longueur du trajet vertical dans la zone non saturée nécessaire pour avoir une épuration totale).

$I = 1/L$ (L= longueur du trajet horizontal dans la zone saturée, nécessaire pour compléter l'épuration des déformations de la couverture de la nappe).

Le pouvoir épurateur de l'ensemble des formations (M_x) traversées par le polluant correspond à la somme du pouvoir épurateur de la couverture (M_d) et celui de la zone saturée (M_r) :

$$M_x = M_d + M_r.$$

L'épuration est considérée totale lorsque M_x devient supérieure ou égale à 1. Dans le cas contraire (épuration incomplète), M_x est inférieure à 1.[15]

2.2.2. Méthode géométrique

Cette méthode consiste à délimiter (pour chacune des zones de protection) un rayon fixe autour du captage à protéger quel que soit la nature lithologique de l'aquifère et le contexte hydrogéologique dans lequel se trouve le captage. Ce rayon est généralement de quelques dizaines de mètres pour le périmètre de protection immédiate (PPI), de quelques centaines de mètres pour le périmètre de protection rapprochée (PPR) et de quelques kilomètres pour le périmètre de protection éloignée (PPE).[15]

2.3. Approche graphique

2.3.1. Méthode d'Albinet et al (1972)

Cette méthode simple consiste à tracer la carte de la surface dynamique de la nappe, obtenue lors du pompage d'essai pratiqué dans le captage à protéger. Le tracé des lignes de courant permet de délimiter les zones d'appel et d'alimentation de ce captage.

2.4.Approche hydrodynamique

2.4.1. Méthodes volumiques

a. Méthode de l'Infiltration

Cette méthode consiste à établir un bilan de masse entre le volume d'eau prélevé par an, au niveau du captage, et le volume d'eau s'infiltrant (recharge moyenne annuelle) dans la zone d'alimentation du captage à protéger. Dans le cas d'un puits unique, la zone d'infiltration (ou de recharge) est assimilée à un cercle de superficie A et de rayon r, dont les dimensions sont données par les relations 2 et 3 suivantes :

$$A = \frac{Q}{i}$$

Ou

$$r = \sqrt{\frac{Q}{\pi \times i}}$$

Avec :

A = Superficie de la zone d'alimentation du captage (m²)

r = Rayon de l'aire de recharge de la nappe équilibrant le débit prélevé (m)

Q= Débit maximum prélevé dans le captage (m³ /an)

i = Recharge de la nappe (m/an) équilibrant le débit (Q) prélevé dans le captage.

b. Méthode du Cylindre

Cette méthode consiste à établir le bilan de masse entre le volume d'eau extrait du captage pendant la durée de pompage (t) et le volume d'eau contenu dans un cylindre traversant la nappe captée. Le rayon du cylindre est assimilé à celui du PP rapprochée et il est évalué par la relation suivante :

$$r = \sqrt{\frac{Q}{\pi \times e \times n_e}}$$

Avec :

r: rayon du cylindre (m), dont le volume permet d'équilibrer le débit prélevé dans le captage.

Qt : volume d'eau (m³) prélevé pendant la durée t de pompage (t est généralement de 50 jours).

e : épaisseur de la nappe (m).

ne : porosité efficace de la nappe (sans dimension).[15]

c. Méthode de Sichardt

Cette méthode est plus simple et moins utilisée par rapport aux autres méthodes et permet de calculer les dimensions du périmètre de protection rapprochée à l'aide de deux critères hydrodynamique : la perméabilité et le rabattement.

d. Méthode de Kusakin

Cette méthode permet de calculer les caractéristiques du périmètre de protection rapprochée, entourant le captage à protéger. Elle utilise deux critères hydrodynamiques : la transmissivité et le rabattement.

2.4.2. Méthodes analytiques

2.4.2.1.Méthode de Bear& Jacobs

Cette méthode est basée sur une résolution analytique de l'équation de l'écoulement de l'eau (en milieu poreux) dans le temps et dans l'espace. Elle permet de délimiter (dans le cas de milieux homogènes et isotropes) avec précision les périmètres de protection rapprochée et éloignée des captages d'eau potable.

2.4.2.2.Méthode de Wyssling

Cette méthode dérive de celle de Bear& Jacobs et permet de calculer les caractéristiques de la zone d'alimentation et celles du périmètre de protection rapprochée en quelques points particuliers de la nappe, entourant le captage à protéger.

2.4.2.3.Méthodes numériques

Les modèles mathématiques permettent d'approximer la résolution exacte de l'équation de l'écoulement par des méthodes numériques de différences finies ou d'éléments finis. Cette résolution revient à approximer la distribution spatiale et l'évolution temporelle des charges hydrauliques dans la nappe.[15]

2.5.Approche mixte

a. Méthode 3A2E

Cette méthode développée par D. Paradis en 2000 à l'INRS-Eau du Canada, permet de calculer les dimensions du périmètre de protection éloignée et rapprochée d'un captage d'eau souterraine en milieu poreux, par la combinaison des trois approches suivantes : cartographie hydrogéologique, empirique (cylindre et recharge) et hydrodynamique.

Son nom 3A2E est un acronyme, constitué des initiales des cinq étapes (suivantes) la constituant :

Étape 1 : consiste en la détermination des limites Avals de la zone d'alimentation et celles du périmètre de protection rapprochée et éloignée du captage. Ces limites peuvent être calculées à partir des équations de Bear&Jacobs, ou celles de Wyssling (combinée avec les méthodes de l'Infiltration et du Cylindre) ou à partir de la cartographie hydrogéologique.

Étape 2 : consiste en la détermination des limites Amont de la zone d'alimentation et du périmètre de protection rapprochée et éloignée du captage. Ces limites peuvent être calculées à partir des équations de Bear& Jacobs, ou celles de Wyssling (combinée avec les méthodes du Cylindre et de l'Infiltration de la nappe) ou à partir de la cartographie hydrogéologique.

Étape 3 : consiste à calculer les Aires totales des zones de recharge et du périmètre de protection rapprochée du captage. Les équations de l'Infiltration et du Cylindre sont utilisées respectivement pour le calcul de ces superficies.

Étape 4 : consiste en la détermination de la direction principale de l'Écoulement régional de l'eau souterraine, à partir de la carte piézométrique de la nappe.

Étape 5 : consiste à tracer une Ellipse pour chacune des zones à délimiter (périmètres de protection rapprochée et éloignée du captage), dont les superficies sont calculées dans l'étape 3 de la méthode. Les axes principaux de ces deux ellipses coïncident avec le sens de

l'écoulement principal de la nappe (déterminé à l'étape 4). Les extrémités de ces zones correspondent aux limites avale et amont calculées respectivement dans les étapes 1 et 2.[15]

3. Périmètres (ou zones) de protection

3.1.Définition et objectif

Un périmètre de protection est un espace délimité physiquement (clôture, cercle de pierres...) afin de sauvegarder et protéger l'accès à un espace qui présente un intérêt esthétique ou patrimonial, ou bien une dangerosité certaine.

Les périmètres de protection des champs de captage des eaux souterraines sont définies comme autant un outil idéal pour aviser et réduire toute cause de pollution susceptible de nuire à la qualité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable.

La mise en place des périmètres de protection des captages d'eau destinée à la consommation et la surveillance des prescriptions associées, améliore la sécurité sanitaire en réduisant le risque de pollution microbienne ou toxique massive et brutale en contrôlant les activités susceptibles de générer des pollutions accidentelles pouvant avoir un impact sur la qualité des eaux. Trois zones de protection des ressources en eau (forages, champs captant, barrages, sources, etc.) : la zone de protection immédiate ; la zone de protection rapprochée et la zone de protection éloignée. [20]

a. Périmètre de Protection Immédiate (PPI)

La zone de protection immédiate est la zone de captage. Elle comprend les alentours immédiats d'un captage ou d'une installation de réalimentation de la nappe (un périmètre de 10 m au moins autour du captage et des drains des puits filtrants). Seules les interventions et activités en rapport avec le captage de l'eau sont autorisées dans cette zone. Toute interdiction vise à éviter des dégâts aux installations de captage ou une pollution directe de l'eau exploitée. La zone d'implantation du captage doit donc appartenir au service d'approvisionnement en eau et être clôturée.

Le périmètre de protection immédiate a donc pour fonctions d'empêcher la détérioration des ouvrages de prélèvement et d'éviter que des déversements ou des infiltrations de substances polluantes se produisent à l'intérieur ou à proximité immédiate du captage.

Compte tenu de l'accroissement général des risques de pollution, une grande surface offrira plus de garantie et permettra, en outre, une augmentation du délai d'intervention face à une pollution venant de l'extérieur de la zone intégralement protégée.

Un aménagement correct et un entretien efficace des ouvrages de captage complètent cette première mesure de protection. [20]

b. Périmètre de Protection Rapprochée (PPR)

Le périmètre de protection rapprochée a pour rôle la protection efficace du captage vis-à-vis de la migration souterraine des substances polluantes. Il présente une zone intermédiaire, qui accepte des activités sans risques pour la ressource et le captage, ou des activités diminuant le risque de pollution. Sa surface varie selon la vulnérabilité du captage et de la ressource en eau, c'est-à-dire selon les caractéristiques de l'aquifère et le débit de pompage.

Généralement le temps de transfert entre la source de pollution et le captage retenu est d'environ 50 jours, ce qui représente suivant les terrains une surface comprise entre 1 et 10 hectares. Peuvent être interdits ou réglementés toutes les activités, installations et dépôts susceptible de nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux.

La zone de protection rapprochée doit garantir qu'aucun microorganisme pathogène ne parvienne dans l'eau potable et que l'eau souterraine ne soit pas contaminée ou bloquée sur le dernier tronçon qu'elle parcourt avant le captage.[20]

c. Périmètre de Protection Eloignée (PPE)

Le périmètre de protection éloignée prolonge éventuellement le précédent pour renforcer la protection contre les pollutions permanentes ou diffuses. Il sera créé si l'on considère que l'application de la réglementation générale, même renforcée, n'est pas suffisante, en particulier s'il existe un risque potentiel de pollution que la nature des terrains traversés ne permet pas de réduire en toute sécurité, malgré l'éloignement du point de prélèvement.

La zone de protection éloignée doit garantir que l'on dispose, en cas d'accident, de suffisamment de temps et d'espace pour écarter tout danger pour l'eau potable exploitée. Les entreprises qui représentent une menace pour les eaux souterraines (les stations d'essence par exemple) ne sont donc pas admises dans la zone de protection éloignée. Il est également interdit d'y laisser s'infiltrer les eaux usées et d'y extraire du gravier.[20]

3.2.Délimitation des périmètres de protection des eaux souterraines

3.2.1. Choix de la méthode

Les périmètres de protection des eaux souterraines sont délimités de telle manière que des captages ou des installations d'alimentation artificielle puissent, en cas de besoin, être construits aux bons emplacements et être protégés par des zones de protection des eaux souterraines conformes aux prescriptions. Ce faisant, il faut tenir compte du fait que différents types de captage (par exemple puits unique, série de puits ou puits filtrant à drains horizontaux) peuvent entrer en ligne de compte et que la dimension des zones de protection variera en fonction des débits de concession.

La détermination d'un périmètre de protection des eaux souterraines implique donc d'une part que les conditions hydrogéologiques soient connues et d'autre part que les conditions d'implantation d'une installation de production d'eau potable soient respectées.

Par ailleurs, le degré de précision varie d'une méthode à l'autre, pour cela, la combinaison de plusieurs méthodes doit être privilégiée.[15]

Dans notre travail nous avons utilisé le logiciel de calcul des périmètres de protection (Periprotect) établi par des élèves ingénieurs à l'école de l'habitat et des travaux publics au Maroc dirigé par : Mohamed Sinan (Professeur hydrogéologue à l'EHTP). L'étude a concerné quelques forages implantés dans la plaine de Guelma à savoir : le forage BA2, BK1, BA3, la Rail de Oued El Maiz et GU 6 bis. Les méthodes retenues pour le calcul des périmètres de protection dans la plaine alluviale de Guelma sont : Sichardt, Kusakin, cylindre, Infiltration, 3A2E.

Tab.17. Méthodes de délimitation des PDP utilisées pour les forages de la zone d'étude

Méthode	Type de périmètre
Sichardt	Rapprochée
Kusakin	Rapprochée
Cylindre	Rapprochée
Infiltration	Eloignée
3A2E	Eloignée

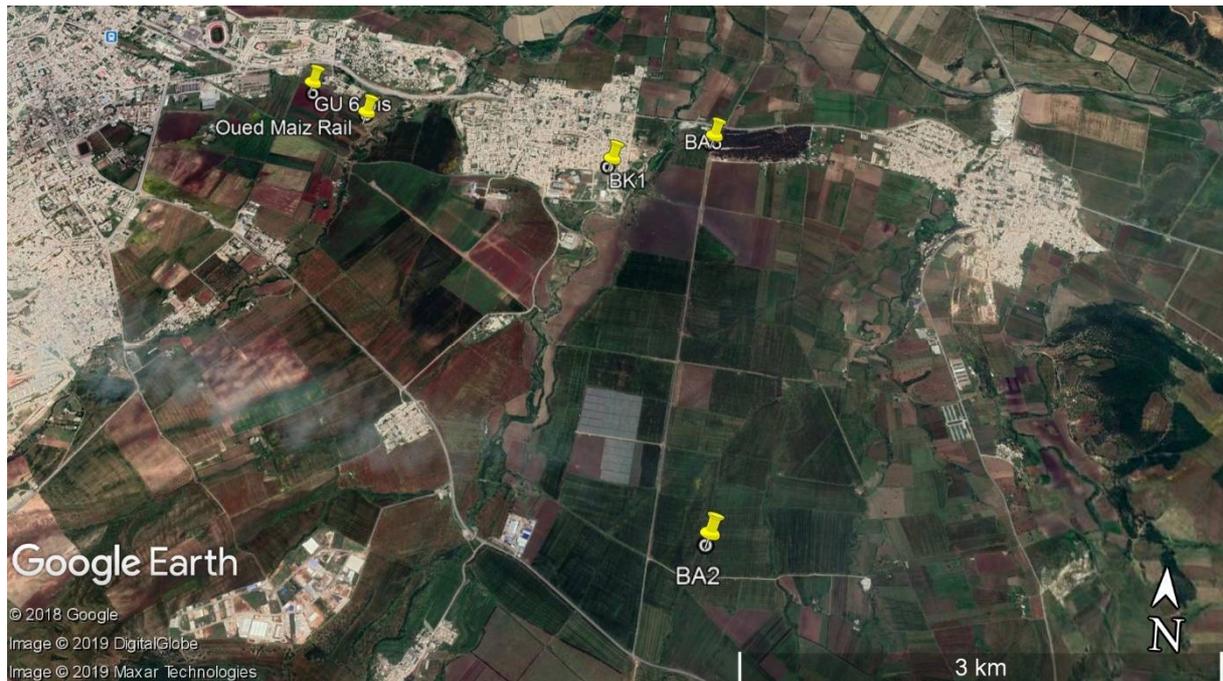


Fig.22. Carte d'emplacement des forages (Google earth, 2019)

3.2.2. Périmètres de protection rapprochée

Dans la délimitation de la protection rapprochée nous avons appliqué trois méthodes dans le logiciel Periprotect qui sont : Sichardt, Kusakin et Celle du Cylindre.

a. Méthode de Sichardt

Cette méthode est utilisée par le logiciel periprotect. La méthode de Sichardt considère deux paramètres fondamentaux : le rabattement et la conductivité hydraulique. Elle est utilisée pour déterminer le périmètre de protection rapprochée sous forme d'un cercle.

Le tableau 18 présente l'information minimale nécessaire à l'application de la méthode de Sichardt pour les forages de la zone d'étude.

Tab.18. les paramètres utilisés par la méthode de Sichardt et les résultats obtenus

Forage	Paramètres utilisés		Résultats obtenus	
	Rabattement (m)	Perméabilité (m/s)	Rayon (m)	Superficie (ha)
BK1	4,5	$0,01.10^{-3}$	42,7	0,6
BA3	14	$0,01.10^{-3}$	132,8	5,5
Oued Maiz (Rail)	3,48	$0,01.10^{-3}$	33	0,3
GU 6 bis	3,8	$0,01.10^{-3}$	36	0,4
BA2	19,9	$0,01.10^{-3}$	188,8	11,2

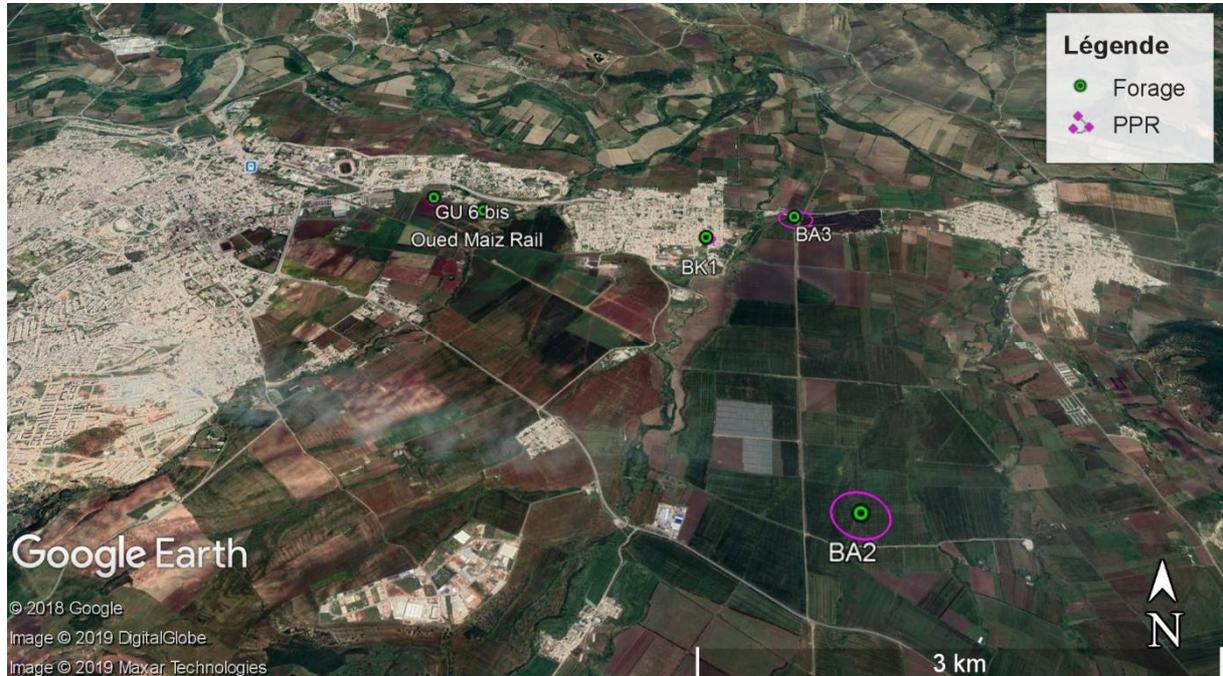


Fig23. Représentation des superficies des PPR selon la méthode Sichardt

b. Méthode de Kusakin

Cette méthode aussi utilisée par le logiciel Periprotect, est basée sur deux critères : le rabattement et la transmissivité. Elle est utilisée pour la détermination de périmètre de protection rapprochée sous forme de cercle. Les résultats de cette méthode sont établis dans le tableau 19.

Tab.19. Les paramètres utilisés par la méthode Kusakin et les résultats obtenus

Forage	Paramètres utilisés		Résultats obtenus	
	Rabattement (m)	Transmissivité (m ² /s)	Rayon (m)	Superficie (ha)
BK1	4,5	1,2.10 ⁻³	86,6	2,5
BA3	14	1,5.10 ⁻³	311,8	30,5
Oued Maiz (Rail)	3,48	0,7.10 ⁻³	52,9	0,9
GU 6 bis	3,8	0,9.10 ⁻³	65,6	1, 3
BA2	19 ,9	1,4.10 ⁻³	428,1	57,6

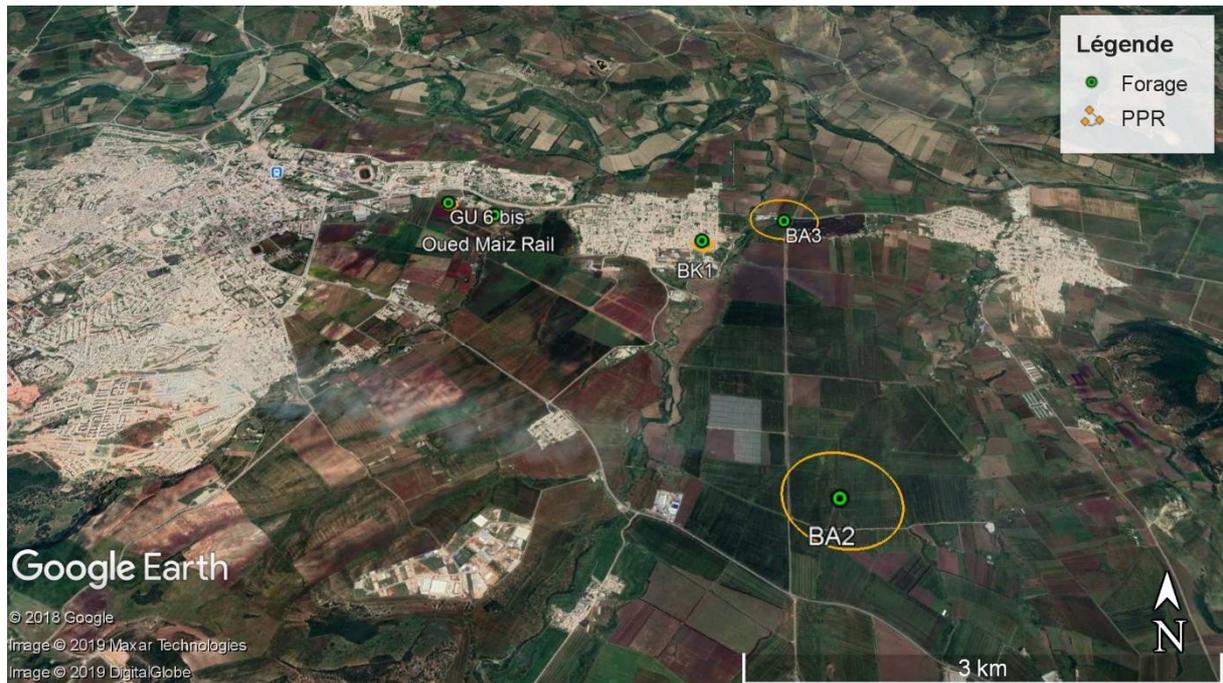


Fig24. Représentation des superficies des PPR selon la méthode Kusakin

c. Méthode de cylindre

Cette méthode établie à l'aide de quatre critères : débit d'exploitation, épaisseur de la nappe, temps de transfert, porosité efficace. Le périmètre de protection rapprochée est représenté sous forme d'un cercle. (Tableau 20).

Tab.20. les paramètres utilisés par la méthode cylindre et les résultats obtenus

Forage	Paramètres utilisés				Résultats obtenus	
	Q (m ³ /s)	Epaisseur de La nappe (m)	Porosité efficace	Temps de transfert	Rayon (m)	Superficie (ha)
BK1	0,01	16	19	50	69,5	1,5
BA3	0,008	16	17,30	50	65,1	1,3
Oued Maiz Rail	0,005	16	13	50	59,4	1,1
Gu 6 bis	0,004	16	12,90	50	53,3	0,9
BA2	0,007	16	16,7	50	60	1,1



Fig25. Représentation des superficies des PPR selon la méthode Cylindre

Enfin de l'application de différentes méthodes pour la délimitation des périmètres de protection rapprochée, nous avons constaté que ces méthodes qui utilisent des critères et des paramètres différents ont donné durésultat des rayons et superficies variables d'un forage à l'autre.

Le tableau suivant récapitule ces résultats.

Tab.21. les valeurs minimale et maximale des rayons et superficies pour les trois méthodes

Méthodes	Rayon (m)		Superficie (ha)	
	R. minimal	R. maximal	S. minimale	S. maximale
Cylindre	53,3(GU 6 bis)	69,5 (BK1)	0,9 (GU 6 bis)	1,5 (BK1)
Sichardt	33 (Oued Maiz Rail)	188,8 (BA2)	0,3 (Oued Maiz Rail)	11,2 (BA2)
Kusakin	52,9 (Oued Maiz Rail)	428,1 (BA2)	0,9 (Oued Maiz Rail)	57,6 (BA2)

Les trois méthodes utilisées pour la délimitation des périmètres de protection rapprochée sont basées sur des critères différents.

On observe que la méthode Kusakin est beaucoup trop large de rayon minimal 52,9m et de superficie minimale 0,9 ha pour le forage Oued Maiz Rail et de rayon maximal 428,1 met la superficie maximal 57 ,6 ha pour le forage BA2. Cependant ce périmètre donne une bonne estimation de la zone à protéger, donc nous avons vu que dans tous les cas étudiés, la méthode Kusakin représente de façon réaliste les périmètres de protection.

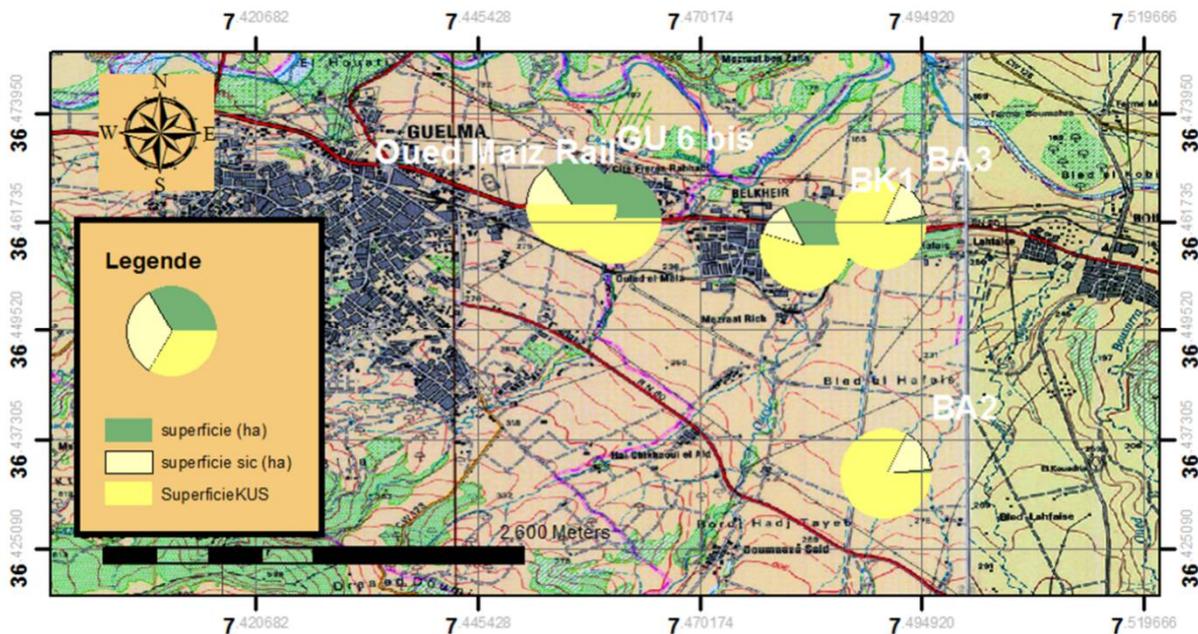


Fig.26. carte des superficies des périmètres de protection rapprochée pour les trois méthodes (cylindre, Scharadt, Kusakin)

3.2.3. Périmètre de protection éloignée

Il y a plusieurs méthodes pour le calcul des périmètres de protection éloignée mais dans notre travail on a utilisé celles du logiciel Periprotect qui contiennent deux méthodes (infiltration, 3A2E) se basant sur différents critères.

a. Méthode d'infiltration

Cette méthode concerne le périmètre de protection éloignée, elle est basée sur deux critères le débit prélevé et la recharge de la nappe, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tab.22. les paramètres utilisés par la méthode d'infiltration et les résultats obtenus

Forage	Paramètres utilisés		Résultats obtenus	
	Débit prélevé (m ³ /an)	Recharge de la nappe (m/an)	Rayon (m)	Superficie (ha)
BK1	315360	0,06	1293,5	525,6
BA3	252288	0,06	1156,9	420,5
Oued Maiz Rail	157680	0,06	914 ,6	262,8
GU 6 bis	126144	0,06	818,1	210,2
BA2	220752	0,06	1082,2	367,9

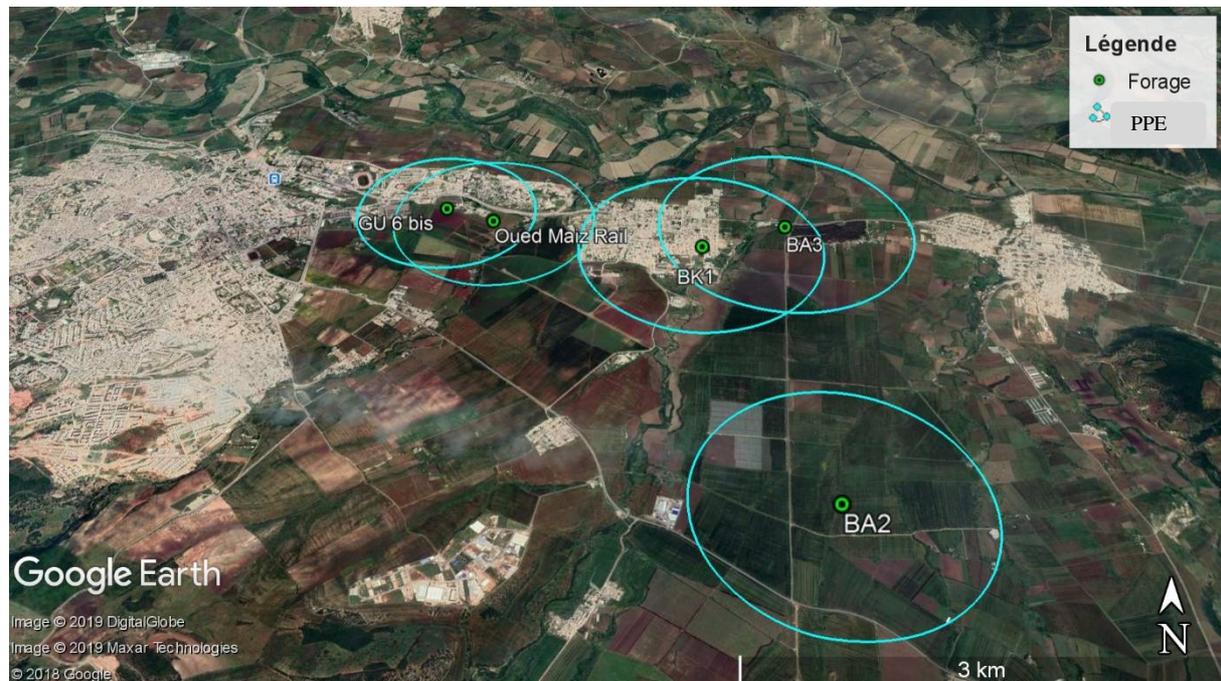


Fig27. Représentation des superficies des PPE selon la méthode d'infiltration

b. Méthode 3A2E

Pour l'application de la méthode 3A2E, la détermination de la superficie est faite par la méthode d'infiltration, les paramètres utilisés par cette méthode sont synthétisés dans le tableau 23. La forme du périmètre de protection rapprochée donnée par la méthode 3A2E est ellipsoïdale.

Tab.23. les paramètres utilisé par la méthode 3A2E et les résultats obtenus

Forage	Paramètres utilisés						Résultats obtenus		
	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /an)	R (m/an)	K (m/s)	b (m)	i(‰)	So (m)	Su(m)	S (ha)
BK1	0,01	315360	0,06	0,01.10 ⁻³	16	30	2880,7	331,6	525,6
BA3	0,008	252288	0,06	0,01.10 ⁻³	16	42	4307,7	189,5	420,5
Oued Maiz Rail	0,005	157680	0,06	0,01.10 ⁻³	16	20	1892,8	248,7	262,8
GU 6 bis	0,004	126144	0,06	0,01.10 ⁻³	16	25	2517,7	159,2	210,2
BA2	0,007	220752	0,06	0,01.10 ⁻³	16	43	4442,3	161,9	367,9

Avec :

Q : débit d'exploitation (m³/s)

b : épaisseur de la nappe

Q :débit prélevé (m³/an)

i : gradient hydraulique (‰)

r : recharge de la nappe (m/an)

So : limite amont (m)

K : perméabilité (m/s)

Su : limite aval (m)

Tab.24. les valeurs des superficies pour des périmètres de protection éloignée.

Méthode	Superficie (ha)	
	Superficie minimale	Superficie Maximale
Infiltration	210,2 (GU 6 bis)	525,6 (BK1)
3A2E	210,2 (GU 6 bis)	525,6 (BK1)

Le tableau 24 synthétise les résultats obtenue par les deux méthodes (infiltration, 3A2E) on observe que la superficie minimale est de 210,2 ha et la superficie maximal est de 525,6 ha pour les deux méthodes. Malgré chaque méthode se base sur des paramètres différents mais on obtient la même valeur de superficie. La méthode 3A2E est très précise parce qu'elle détermine l'intégration des limites aval et amont.

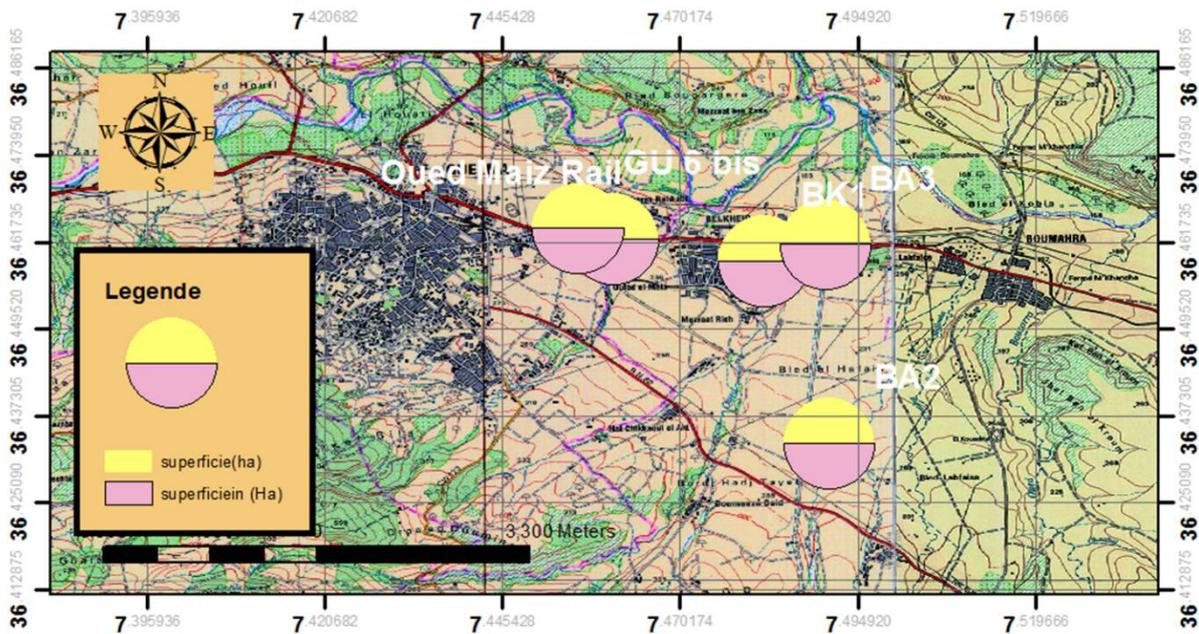


Fig.28.carte des superficies des périmètres de protection éloignée selon la méthode d'infiltration et 3A2E.

4. Représentation des périmètres de protection des ouvrages de captage de la zone d'étude

La combinaison des résultats graphiques de deux méthodes de détermination de périmètres de protection rapprochée et éloignée qui sont la méthode du Cylindre (PPR) et celle du 3A2E (PPE) a donné les représentations ci-dessous

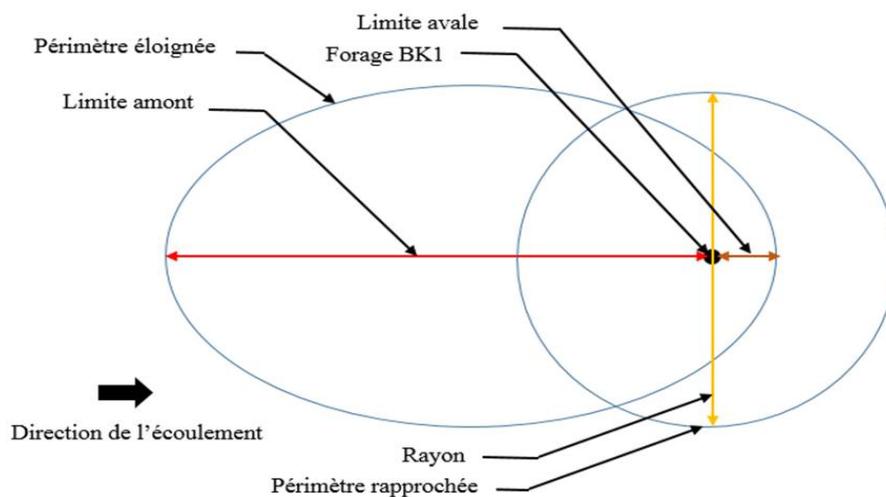


Fig.29.schéma des périmètres de protection du forage BK1

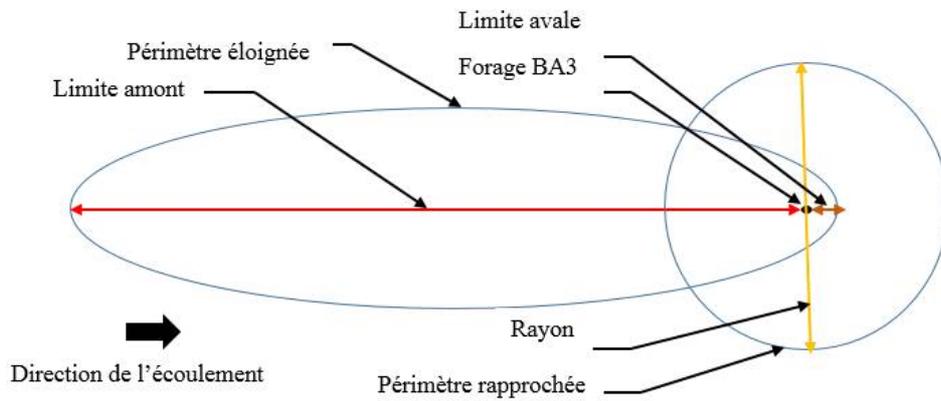


Fig.30.schéma des périmètres de protection du forage BA3

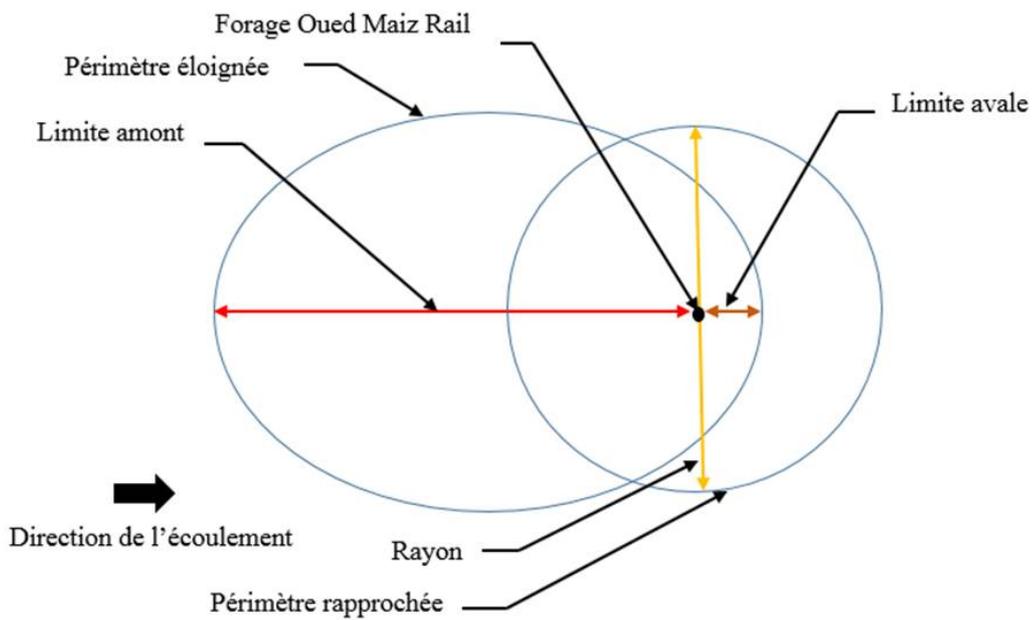


Fig.31.schéma des périmètres de protection du forage Oued Maiz (Rail)

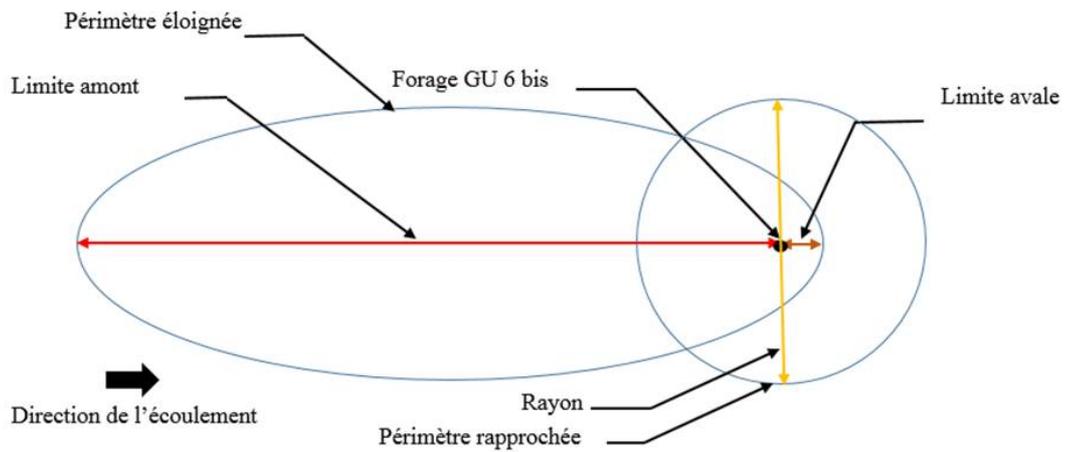


Fig.32.schéma des périmètres de protection de forage GU 6 bis

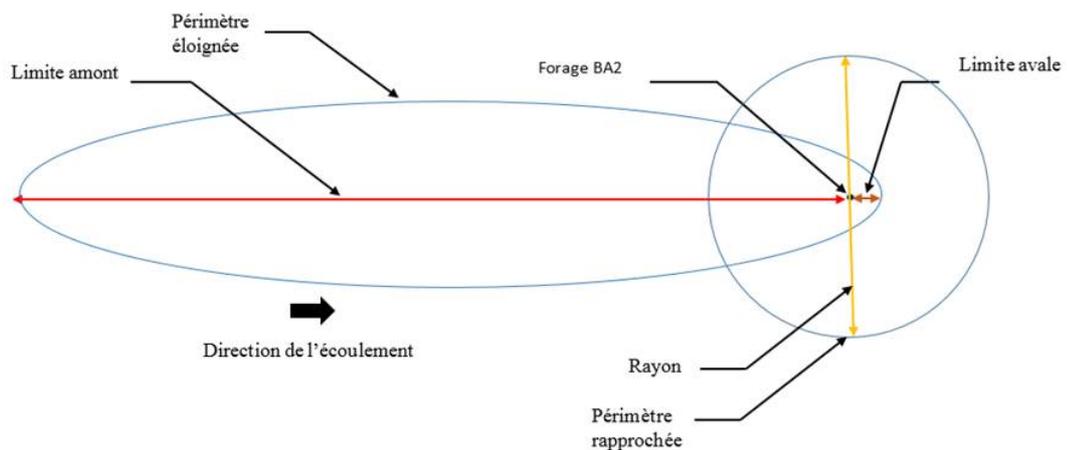


Fig.33.schéma des périmètres de protection du forage BA2

La différence des valeurs des rayons et superficies qui dépend des incertitudes de certains données hydrogéologiques tels que la transmissivité, le rabattement, la porosité efficace, la conductivité hydraulique et le gradient hydraulique, peut conduire à un large éventail de possibilité dans la forme et les dimensions des périmètres de protection.

Cette marge d'incertitude dépend de la méthode utilisée et du choix des paramètres analysés.

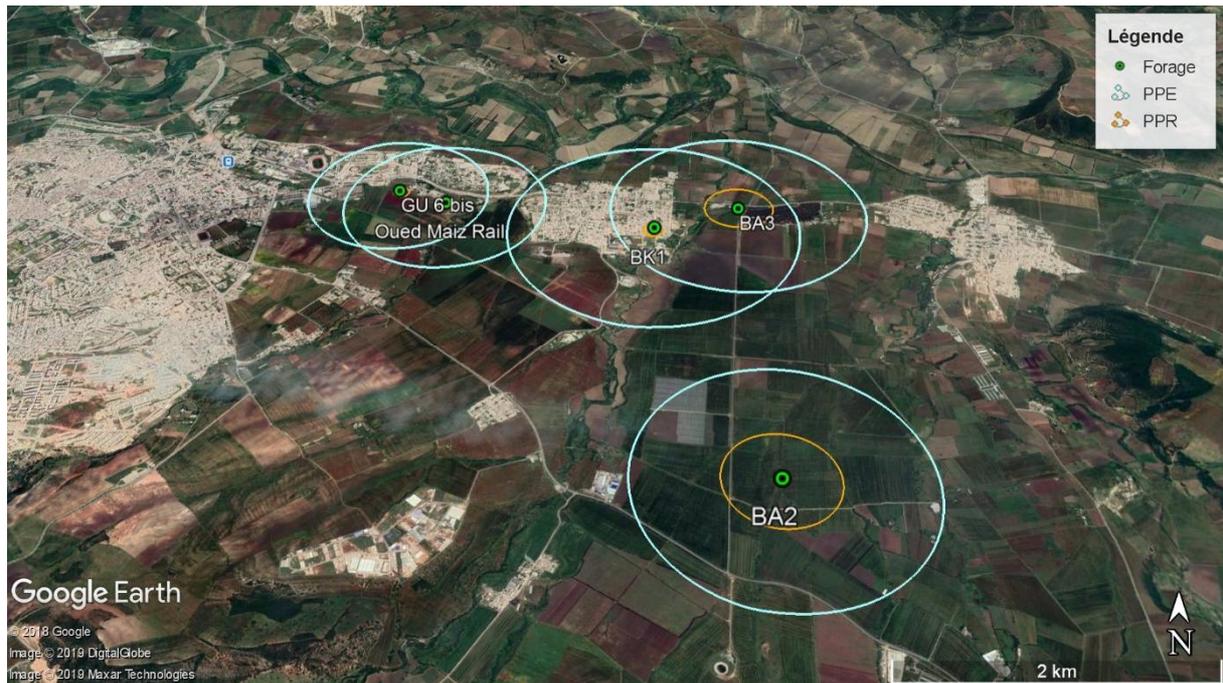


Fig34. Représentation des superficies selon la méthode Kusakin et infiltration

5. Discussions et recommandations

La détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma a été réalisée à partir de cinq méthodes basées sur des critères hydrogéologiques et hydrodynamiques en utilisant un logiciel spécifiques.

Les méthodes utilisées pour la protection rapprochée sont : Sichardt, Kusakin, et celle du Cylindre, cependant on a utilisé deux méthodes pour la détermination de la protection éloignée (infiltration et 3A2E).

L'utilisation de ces méthodes a permis de déterminer des périmètres et des surfaces de protection des forages en tenant compte de l'écoulement souterrain.

Les calculs du dimensionnement ont été faits sur la base des paramètres moyens de la nappe. Pour le périmètre de protection rapprochée en plus du résultat obtenu des calculs en fonction du temps de transfert (50 jours). D'autres critères ont été tenus compte tel que les données hydrogéologiques (conductivité hydraulique, transmissivité, perméabilité, porosité efficace...).

Les rayons des périmètres de protection rapprochée varient respectivement de 33 m à 428,1 m avec des surfaces de protection allant de 0,3 ha à 57,6 ha. Pour les périmètres de

protection éloignée, les rayons obtenus varient de 818,1 m à 1293,5 m pour la méthode d'infiltration et la superficie varient entre 210,2 et 525,6 ha pour les deux méthodes. Selon Bear et Jacobs (1965), les périmètres de protection éloignées des forages ne seraient être des cercles mais de forme ellipsoïde du fait de la prise en compte du gradient hydraulique de l'aquifère, de la zone d'appel et de l'aire d'alimentation des ouvrages.

Ces différentes valeurs des rayons des périmètres de protection des ouvrages de captages dépendent de l'incertitude d'évaluation de certains paramètres hydrogéologiques pouvant être prises en compte dans la délimitation des périmètres de protection des forages de la nappe alluviale de Guelma. Ces périmètres vont favoriser l'isolement des ouvrages et garantir une meilleure protection contre la pollution de ceux-ci.

En effet , cette étude a révélé qu'à Guelma, le risque majeur encouru par les eaux captées est essentiellement la contamination par les eaux d'irrigation, les eaux usées, aussi les effluents industriels, à proximité des ouvrages résultant des activités mécaniques d'automobiles et l'entreposage des ordures ménagères qui conduit à la production de lixiviats, seraient autant de facteurs qui pourraient occasionner la contamination des forages de la nappe alluviale de Guelma.

Pour les ouvrages de captages des eaux souterraines de Guelma, il est alors préférable d'utiliser un rayon plus important pour garantir une protection plus accrue de l'environnement immédiat à cause de l'intensification des activités anthropiques et des installations à proximité de ceux-ci.

Il convient donc de prévoir des périmètres de protection sous forme d'ellipse susceptibles de couvrir la zone fortement influencée par le périmètre de protection éloignée en vue d'assurer une prévention et une protection adéquates à long terme des eaux souterraines captées.

Cette étude nous a permis de formuler les recommandations suivantes à l'endroit des autorités :

- A l'intérieur de ces périmètres toutes activités sont interdites sauf celles en liaison directe avec l'exploitation du captage,
- Interdiction de l'installation des stations de carburants, produits chimiques ou de substances toxiques,
- Passage de véhicules motorisés en poids lourd,

- Activités industrielles,
- Les rejets domestiques, et les eaux usées,
- Transport de matière dangereuse,
- Epannage de fertilisant ou de produits phytosanitaires et élevage,
- Les dépôts d'ordures, immondices, détritiques, cadavres d'animaux et tous produits et matières susceptibles d'altérer la qualité de l'eau.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail réalisé au niveau de la plaine alluviale de Guelma, Nord-est Algérien, porte sur la délimitation des périmètres de protection de quelques ouvrages de captages destinés à la consommation humaine.

La région d'étude obéit à un climat méditerranéen, subhumide, caractérisé par deux saisons distinctes, l'une sèche et chaude et l'autre pluvieuse et froide.

Géologiquement, il s'agit d'une succession de terrains allant du trias au quaternaire. Le substratum de ce bassin est formé par des marnes et argiles du miocène. Le remplissage alluvionnaire Plio-Quaternaire renferme des matériaux détritiques divers (sables, graviers, conglomérats, argiles, limons.)

L'aquifère alluvionnaire de Guelma d'âge Mio-Plio-Quaternaire est constitué de terrasses : haute, moyenne et basses. Les terrasses sont constituées d'alluvions qui recèlent des potentialités hydriques importantes, l'aquifère est drainé par l'Oued Seybouse, qui sillonne le bassin d'Ouest en Est.

La plaine de Guelma menacée par de nombreux foyers de pollution (industrie, élevages, décharges sauvages, etc.), qui sont apparus dans la région sans aucune mesure de protection de l'environnement prévue.

Selon une carte de vulnérabilité réalisée en 2017 par Latifi.S, on peut distinguer trois zones de degrés de vulnérabilité différents :

-Les zones à forte vulnérabilité couvrent 45% de la surface totale de la nappe et se situent au Nord de Belkheir et aux alentours de Guelma.

-Les zones à moyenne vulnérabilité occupent 30% de la surface totale de la nappe et se localisent au Nord –Est de la moyenne terrasse, au centre de la nappe des hautes terrasses et également plus de Sud.

-Les zones à faible vulnérabilité présentent 25% de la surface totale de la nappe se situent au niveau de la nappe des travertins à l'Ouest.

A l'aide d'un logiciel de délimitation des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau potable, Periprotect, ce travail a été réalisé.

Les méthodes hydrodynamiques de délimitation des périmètres de protection rapprochée utilisées sont Kusakin, Sichardt et celle du Cylindre.

Les résultats obtenus donnent un rayon maximal de 400m (méthode Kusakin), un rayon minimal de 33m (méthode Sichardt), une superficie maximale de 57.6 ha (méthode Kusakin) et une superficie minimale de 0.3 ha (méthode Sichardt).

On remarque que la méthode Kusakin basée sur la transmissivité et le rabattement semble la plus adéquate et sécurisée pour une protection rapprochée.

Pour la protection éloignée, deux méthodes ont été utilisées : 3A2E, et celle de L'Infiltration.

On remarque que les deux méthodes d'infiltration et 3A2E donnent un résultat presque identique pour la superficie de protection, cependant la méthode 3A2E est très précise par rapport à celle d'infiltration car elle détermine l'intégration des limites amont et aval en utilisant plusieurs critères.

Toutes ces méthodes requièrent des données spécifiques et adéquates à chaque application. Ils dépendent des propriétés hydrogéologiques et hydrodynamiques de la zone de captage des eaux souterraines.

*RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES*

Références bibliographiques

[1] : **Abdi. A, Brinis. N, Saadi. E., (1991)** : Géophysique, Hydrogéologie, hydrochimie de lavallée de la Seybouse. Région : Guelma, Bouchegouf et Moumna. Mémoire d'ingénieur d'état en géologie. Université de Badji Mokhtar Annaba.

[2] : **A.B.H-C.S.M (Agence des Bassins Hydrographiques ; Constantinois, Seybouse, Mellègue) (2005)**. Qualité Des Eaux Souterraines Dans Le Bassin De La Seybouse, Rapport Interne.

[3] : **Abdraman, D. Messaadia, A. Mohamed, H. 2014**. Situation actuelle de la pollution azotée des eaux souterraines dans le périmètre irrigué Guelma-Boumahra. Mémoire de Master. Université de 08 Mai 1945 Guelma, Algérie.

[4]. **Aouissi Amina (2010)**. Microbiologie et physico-chimie de l'eau des puits et des sources de la région de Guelma (Nord-Est de l'Algérie). Mémoire de Magister, Université 08 Mai 1945 Guelma.

[5]. **Bechiri Naouel (2011)**. Evolution du chimisme des eaux de surface et souterraines dans le bassin versant de la seybouse (Nord-Est Algérien). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba.

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

[7] : **Benmarce K. 2015**. Caractérisation physico-chimique des eaux souterraine dans la région de Guelma, Nord-Est Algérien. Thèse de Doctorat en hydrogéologie. Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

[8] : **Brahmia A., 2009**. Etude de la structure profonde du système aquifère du fosse d'effondrement de Terraguelt, haute Seybouse. Thèse de Doctorat en géologie. Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

[9] : **Brahmia N., 2016**. Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de la moyenne Seybouse, Nord-Est, Algérien. Thèse de Doctorat en hydrogéologie. Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

[10]. **Chaoui Widad (2007)**. Impact de la pollution organique et chimique des eaux de l'oued seybouse et de l'oued Mellah sur les eaux souterraines de la nappe alluviale de Bouchegouf (Guelma). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba.

[11]. **Debieche Taha-Hocine (2002)**. Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Thèse de Doctorat, Université de Constantine.

[12]. **Emsalem R.** Climatologie Générale. Edition. I.P.E.N.A.G. Tome 1. 198 p.

Références bibliographiques

- [13].**Hocine .S et Hamouda.S (2016)**.Contribution à l'étude de la qualité physico-chimiques des eaux de surfaces de l'oued seybose. Mémoire de Master, université 08 Mai 1945, Guelma.
- [14].**Kachi N. 2015**.Impact du périmètre irrigue sur la qualité des eaux souterraines dans le bassin versant de la seybose. Thèse de Doctorat en hydrogéologie .Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
- [15] **Kachi Slimane.2007**.Vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott face aux pollutions.Thèse de Doctorat en hydrogéologie .Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
- [16].**Latifi Sabah 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 (2017)
- [17].**Mouassa Souad (2006)**.Impact du périmètre d'irrigation sur la qualité des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma et sur les sols. Mémoire de Magister, université Badji Mokhtar, Annaba.
- [18].**Mouassa S.2017**. Évaluation des ressources en eau dans le sous bassin versant de la moyenne Seybose, région de Guelma Nord-Est Algérien. Thèse de Doctorat en hydrogéologie. Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
- [19] **Mouchara Nabil., 2009**. Impacts des lâchées de barrage Hammam Debagh sur la qualité des eaux de la vallée de la Seybose dans sa partie amont (Nord-Est Algérien).Mémoire de Magistère, Université d'Annaba.
- [20].**Nassah Omdi 2011**. Les périmètres de protection des champs de captage des eaux souterraines cas des champs captant du N'Fis (Maroc). Mémoire de licence, Maroc.2011
- [21]. **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.
- [22].**République du Bénin Ministère de l'Énergie et de l'Eau Direction Générale de l'Eau(2010)**.Mise en place d'un dispositif de protection des zones de captage d'eau potable.Livre.Mai 2010.
- [23].**Saleh Saleh 2014**.Etude de la qualité physicochimique et bactériologique des eaux de forage du périmètre irrigué secteur Guelma-Boumahra.Mémoire de master, université 08 Mai 1945, Guelma.
- [24].**Zeddouri A. (2003)**. Contribution à L'étude Hydrogéologique Et Hydro-chimique De LaPlaine Alluviale De Guelma (Essai De Modélisation), Guelma, NE Algérien. Mémoire deMagister, Université Badji Mokhtar, Annaba.

ANNEXE

SONDAGE BELKHEIR

N°Fichier Forages
BK-I

N°INVENTAIRE
054

Carte: de Guinée 1/50.000

Date des travaux: Avril - Juillet 1980

Long: X 928550

Echelle de la coupe: 1/500

Lat: Y 261300 Z

Profondeurs et cotes	Tubages et Cimentation	Plans d'eau	Echec.	Coupe	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE
0					
10					Galet et Gravier, brun
20					Argile, brun
30					Galet de grés, brun
40					Argile, brun
50					Gravier et galet de grés
60					Argile, rougeâtre brun
70					Gravier, brun avec sable, gros
80					Argile, brun
90					Gravier, brun et sable
					Gravier et galet avec argile

m à jour par le

SONDAGE BOUMAHRA AHMED 013

N°Fichier Forages
BA- 3

N°INVENTAIRE
054

Carte: de Guelma 1/50.000

Date des travaux: Mars - Septembre Long: X 929 300

Echelle de la coupe: 1/500 Lat: Y 360 400 Z

Profondeurs et cotes	Tubages et Cimentation	Plans d'eau	Echant.	Coupe	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	Etage
0					Terre végétale	
					Gravier rougeâtre brun	
10					Argile, rouge	
20					Galet et gravier brun et rougeâtre brun	
30						
40					Argile, rouge	
50					Galet gravier et sable gros rouge et rougeâtre brun	
60						
70						
80					Argile, rouge	
90					Gravier et sable, rougeâtre brun	
100					Gravier, brun avec argile	

mis à jour par le

SONDAGE DE L'OUED MAIZ (Raïl)

Carte: De Guelma 1/20000 N° 054

Date des travaux: 1948-49

Echelle de la coupe: 1/500

N: Fichier Forages
503-8-

N: INVENTAIRE
054

Long: X 226430

Lat: Y 261550 Z 213

Profondeurs et cotes	Tubages et Cimentation	Plans d'eau	Ech. m.	Coupe	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	Etage
0		0,92			Terre végétale	
5					Galet et sable de grès	
10					Argile	
15					Galets de grès et Conglomérat	
20					Sable argileux avec petits galets	
25					Gros galets et sable	
30					Marne bleue violacée	
35						
40						
45						
50						
55						
60						

EX SUGCOINA

SONDAGE DE LA SUCRERIE GUG bis

N: Fichler Forages 500-8- N: INVENTAIRE 054

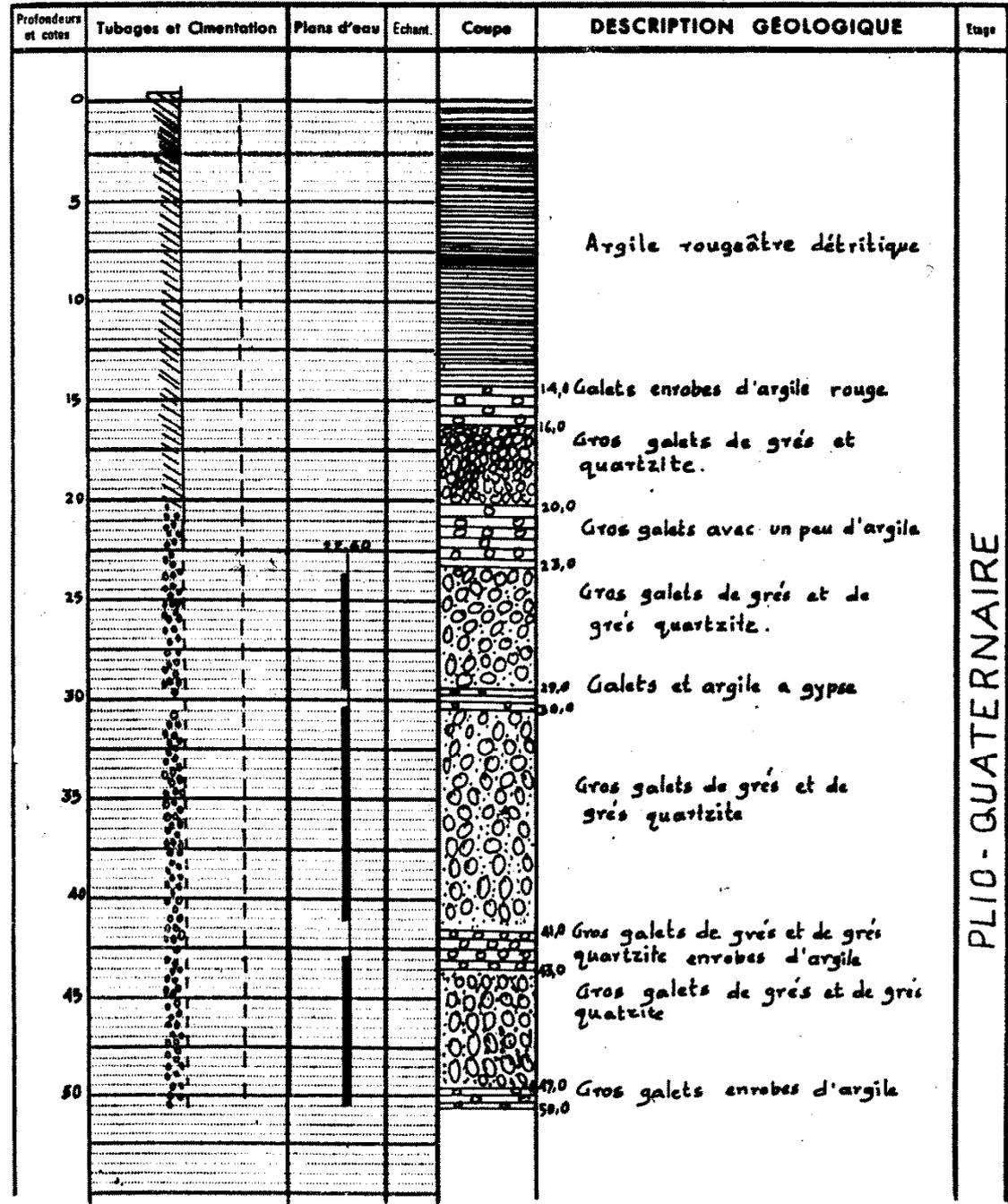
Carte: DE GUELMA 1/50.000 N° 054

Date des travaux: 09-1972

Long: X 226.200

Echelle de la coupe: 1/250

Lat: Y 261.700 Z 241.571



PLIO-QUATERNAIRE

SONDAGE DE BOUMAHARA AHMED

Carte: DE GOUNOD 1/50.000

N° Fichier Forages
B. A. - 2

N° INVENTAIRE
076

Date des travaux :

Long :

X 237.590

Echelle de la coupe :

Lat :

Z 279.00

Profondeurs et notes	Tubages et Cimentation	Plans d'axe	Echant	Coupe	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	Etage
0 m					Terre végétale	
10					Gravier et galets avec sable	
20					Argile, rouge	
30						
40					Gravier et galets avec sable	
50					Argile, rougeâtre brun	
60					Gravier et sable, rouge	
70					Argile, rougeâtre brun	
80					Gravier et sable, semi-compact	
90					Argile, dur	
100					Gravier, rouge, semi-compact avec argile	
110					Argile, brun	
120					Gravier et sable, rouge	
					Argile, brun et gris	
					Gravier et sable, semi-compact	
					Argile, dur	
					Gravier, brun, semi-compact	
					Marne	