

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الجيلالي بونعاما - خميس مليانة
Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre
Département des Sciences Agronomiques
Spécialité : Aménagement Hydro-Agricole

MEMOIRE

de fin d'études présenté pour l'obtention du diplôme de *Master*

Thème

Etude comparative des méthodes de délimitation des périmètres de protection - Application à la nappe alluviale du Haut Cheliff

Présenté par :

BOUDJEMANE Lamia

MESSAOUDI Aouali

Déposé pour évaluation le 19/09/2022, devant le jury composé de :

| | | |
|-----------------------------|----------------|---------------------|
| Mme BOUAICHI Ilhem | MAA Présidente | UDB- Khemis Miliana |
| Mme MATENE Chahrazed Naziha | MAA Promotrice | UDB- Khemis Miliana |
| M. RATIAT Abdelkader | MCB Examineur | UDB- Khemis Miliana |

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Tout d'abord, nous remercierons Dieu de nous avoir donné le courage, la force et la patience de finaliser ce travail de fin d'études.

Avec nos sentiments chargés de gratitude, nous adressons nos remerciements à notre enseignante **Mme MATENE Chahrazed Naziha** qui nous a encadré ainsi que pour la qualité d'encadrement, ses conseils, ses encouragements et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.

Nous souhaitons vivement remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Toute notre reconnaissance aux enseignants du département des sciences Agronomique de Khemis-Miliana qui ont assuré et contribué à notre formation durant ces cinq années.

Nous remercions également monsieur le directeur de l'agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH)

Enfin, un travail de mémoire n'est pas un accomplissement individuel, il est le résultat de soutien d'un certain nombre de personnes dont chacune a apporté sa pierre à l'édifice. Par conséquent, il est de notre devoir d'exprimer nos remerciements les plus sincères à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin, et qui nous ont consacré une grande partie de leur temps

Dédicace

Avant tout, je remercie Allah le Tout Puissant de nous avoir donné la force et le courage

A ma chère mère

A mon cher Père, Que Dieu ait son âme

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs

A Mes chères sœurs : Faiza, Hala et cher mon frère Azzedine

Je dédie également ce travail aux familles BOUDJEMANE , CHOUATI et je remercie mon oncle Chouati Mohamed et mon oncle Boudjemane Abdenour pour leur soutien et leur aide dans la mise en place de ce travail.

A Ma chère binôme et collègue Aouali Messouadi

*A ma promotrice **Mme MATEN Chahrazed Naziha**, pour avoir accepté de nous encadrer, pour ses encouragements et sa patience*

Mes amis et collègues notamment qui m'ont encouragée : Sabrina, Bouchra, Saida, Wassila, Aouali,

Et tous mes camarades de promo pour les bons moments qui ont contribué à rendre ces années inoubliables.

LAMIA

Dédicace

Avant tout, je remercie Allah le tout puissant de nous avoir donné la force, le courage, la santé et la patience pour pouvoir accomplir ce modeste travail

Je dédie ce travail à ceux qui m'ont donné sans limites, à ceux qui m'ont encouragée et soutenue dans mes moments les plus difficiles

A mes chers parents, qui sont à l'origine de mon existence, qui Dieu les protège

A Mon frère Aboubaker et Mes sœurs Samia Imane Latifa et Amina

A ma promotrice Mme MATEN Chahrazed Naziha, pour avoir accepté de nous encadrer, pour ses encouragements et sa patience

A Mon binôme et ma chère collègue, Boudjemane Lamia pour sa foi durant toutes les périodes de réalisation de ce projet

A mes amies Saida et Wassila

AOUALI

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 le Haut Cheliff a connu ces dernières années une grande détérioration à cause des rejets industriels et l'utilisation intensive des pesticides et des engrais chimiques. Cette étude concerne les méthodes adoptées dans la délimitation des périmètres de protection autour des zones de captage de l'eau destinée à la consommation humaine. Plusieurs méthodes de traitement ont été utilisées à l'aide de logiciels dédiés pour le calcul de la surface et du rayon des périmètres de protection rapprochée et éloignée. Les méthodes appliquées, à savoir Wissling, Rehse et celle du Cylindre ont donné des résultats de périmètres de protection rapprochée variant entre 0,27ha et 192,28ha en considérant les temps de transfert de 50, 100 et 365 jrs. Cependant une méthode appliquée pour le périmètre de la protection éloignée (Rehse) a donné des résultats d'épuration est complète.

Mots-clés : eaux souterraines, protection du périmètre, pollution, Haut Cheliff, Algérie

Abstract

Water, a source of life, can become source of disease when its quality worsens. The groundwater quality in the Upper Cheliff has deteriorated in recent years due to industrial discharges and the intensive use of pesticides and chemical fertilizers. This study concerns the methods adopted in the delimitation of the protection areas for wells dedicated to human consumption. Several processing methods were used with the help of dedicated software for the calculation of the area and radius of the close and distant protection perimeters. The applied methods, i. e. Wissling, Rehse and the Cylindre method, gave results of wellhead protection areas varying between 0,27ha and 192,28ha considering transfer times of 50, 100 and 365 days. However, the Rehse method gave results of complete purification.

Keywords: groundwater, wellhead protection area, pollution. Upper Cheliff; Algeria.

ملخص

يمكن أن تصبح المياه، وهي مصدر للحياة، مصدرًا للأمراض عندما تزداد جودتها سوءًا. تدهورت نوعية المياه الجوفية في الشليف الأعلى في السنوات الأخيرة بسبب التصريفات الصناعية والاستخدام المكثف لمبيدات الآفات والأسمدة الكيميائية. وتتلق هذه الدراسة بالأساليب المعتمدة في تحديد مناطق حماية الآبار المخصصة للاستهلاك البشري. تم استخدام العديد من طرق المعالجة بمساعدة البرمجيات المخصصة لحساب المنطقة ونصف قطر محيط الحماية القريب والبعيد. أعطت الأساليب المطبقة، أي Wissling و Rehse وطريقة Cylindre، نتائج مناطق حماية رأس الآبار التي تتراوح بين ha0.27 و ha192.28 بالنظر إلى أوقات النقل من 50 و 100 و 365 يومًا. ومع ذلك، أعطت طريقة Rehse نتائج التنقية الكاملة.

الكلمات المفتاحية : محيط الحماية , التلوث , المياه الجوفية , الشلف العلوي, الجزائر

Sommaire

| | |
|---|----|
| Remerciements | 2 |
| Resumé | 3 |
| Liste des figures..... | 9 |
| Listes des tableaux | 10 |
| Introduction Générale | 1 |
| 1. Eaux souterraines | 3 |
| 1.1. Types des eaux souterraines | 3 |
| 1.2. Captages d’eaux | 3 |
| 1.2.1. Puits..... | 3 |
| 1.2.2. Forage :..... | 4 |
| 1.2.3. Sources | 5 |
| 1.3. Les nappes souterraines | 6 |
| 1.3.1. Nappe libre | 6 |
| 1.3.2. Nappe captive..... | 6 |
| 1.3.3. Nappe semi-captive | 6 |
| 1.4. Aquifères | 7 |
| 2. Pollution des eaux souterraines | 8 |
| 2.1. Définition de la pollution | 8 |
| 2.2. Types de polluants..... | 8 |
| <i>Polluants physiques</i> | 8 |
| <i>Polluants chimiques</i> | 8 |
| <i>Polluants microbiologiques</i> | 8 |
| 2.3. Différents types de pollution | 8 |
| 2.3.1. Pollution temporaire et chronique : | 8 |
| 2.3.2. Pollution diffuse..... | 8 |
| 2.3.3. Pollution linéaire :..... | 9 |
| 2.4. Origine de la pollution par les nitrates | 9 |
| 2.4.1. Pollution domestique | 9 |
| 2.4.2. Pollution agricole :..... | 9 |
| 2.4.3. Pollution industrielle :..... | 9 |
| 3. Notions de Périmètre de protection..... | 10 |
| 3.1. Types de Périmètre de protection | 10 |
| 3.1.1. Périmètre de protection immédiat (PPI)..... | 10 |
| 3.1.2. Périmètre de protection rapprochée (PPR) | 10 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1.3. | Périmètre de protection éloignée (PPE) | 11 |
| 3.2. | Critères de délimitation des zones de protection | 11 |
| 3.2.1. | Le pouvoir épurateur | 12 |
| 3.2.2. | Rabattement | 12 |
| 3.2.3. | Temps de transfert | 12 |
| 3.2.4. | Limites d'écoulement | 13 |
| 4. | Méthodes de délimitation des périmètres de protection des captages d'eaux souterraines. | 13 |
| 4.1. | Approche Cartographique | 13 |
| 4.2. | Approche empirique | 14 |
| 4.2.1. | Méthode de Rehse | 14 |
| 4.2.2. | Méthode géométrique | 16 |
| 4.3. | Approche graphique | 16 |
| 4.3.1. | Méthode d'Albinet et al (1972) | 16 |
| 4.4. | Approche hydrodynamique | 17 |
| 4.4.1. | Méthodes volumiques | 17 |
| 4.4.2. | Méthodes analytiques | 18 |
| 4.4.3. | Méthodes numériques | 19 |
| 4.5. | Approche mixte | 20 |
| 4.5.1. | Méthode 3A2E | 20 |
| 4.6. | Approche par modélisation | 21 |
| 4.6.1. | WhAEM 2000 | 21 |
| 4.6.2. | MODFLOW / MODPATH | 22 |
| 5. | Protection de l'eau | 22 |
| 5.1.1. | Protection de l'eau en Algérie | 22 |
| 5.1.2. | Réglementation en Europe | 23 |
| 1. | Situation géographique de la zone d'étude | 29 |
| 2. | Contexte hydro-climatique | 30 |
| 2.1. | Réseau hydrographique | 30 |
| 2.2. | Précipitation | 31 |
| 2.2.1. | Précipitation moyennes annuelles : | 31 |
| 2.3. | Températures | 31 |
| 2.3.1. | Températures moyennes mensuelles | 31 |
| 2.4. | Vent | 34 |
| 2.5. | Evaporation : | 34 |
| 2.6. | Evapotranspiration | 35 |
| 2.7. | Ruissellement | 36 |

| | |
|--|----|
| 2.8. Infiltration..... | 36 |
| 3. Contexte pédologique..... | 37 |
| 4. Contexte géologique..... | 38 |
| 5. Géologie général | 39 |
| 6. Contexte hydrogéologique..... | 41 |
| 6.1. Les formations aquifères | 41 |
| 6.2. Etude Piézométrique | 42 |
| 7. Contexte Hydrogéochimique..... | 44 |
| 1. Méthodologie de travail | 46 |
| 2. Méthode de Wissling..... | 47 |
| 3. Méthode du cylindre | 50 |
| 4. Methode de Rehse | 50 |
| 1. Détermination les isochrones par la méthode Wissling | 53 |
| 1.1. Délimitation de zone d'appel..... | 53 |
| 1.2. Délimitation des isochrones | 53 |
| 2. Détermination des rayons des périmètres de protection par la méthode du cylindre..... | 57 |
| 3. Détermination le pouvoir épurateur par la méthode Rehse | 58 |
| <i>Conclusion générale et recommandations</i> | 64 |
| <i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i> | 67 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1. Captage par puits classique | 4 |
| Figure 2. Vue en coupe d'un forage équipé | 5 |
| Figure 3. Captage d'une source | 6 |
| Figure 4. Types de nappes | 7 |
| Figure 5. Types d'aquifère | 7 |
| Figure 6. Pollution ponctuelle et diffuse des eaux souterraines | 9 |
| Figure 7. type de périmètre de protection | 11 |
| Figure 8. Zone d'appel, zone d'influence et zone d'alimentation d'un captage | 13 |
| Figure 9. Cheminement d'un polluant depuis la surface jusqu'au captage | 16 |
| Figure 10. Réseau hydrographique de la plaine du Haut Cheliff (Sahraoui, 2015) | 30 |
| Figure 11. Températures maximales, minimales et moyennes - Station de Harreza | 32 |
| Figure 12. Diagrammes Ombrothermiques - station de Harreza(2013-2021) | 33 |
| Figure 13. carte pédologique du Haut Cheliff(Boulaine1957,modifiée par Bouhini et Beghdadi,2017) | 38 |
| Figure 14. Carte géologique de la plaine du Haut Cheliff (Modifiée par Sahraoui, 2015) | 39 |
| Figure 15. Carte piézométrique de la nappe alluviale du Haut-Chéiff (Période des hautes eaux, Avril 2016) | 43 |
| Figure 16. Diagrammes de Piper | 44 |
| Figure 18. Dimensionnement des périmètres de protection selon la méthode de Wyssling | 49 |
| Figure 19. Exemple d'isochrones à 2, 5 et 25 ans de temps de transfert (Source : Google image) | 49 |
| Figure 20. Délimitation des isochrones pour le captage C1 | 55 |
| Figure 21. Délimitation des isochrones pour le captage C2 | 56 |
| Figure 22. Délimitation des isochrones pour le captage C3 | 57 |

Listes des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Principaux outils de protection des captages AEP | 26 |
| Tableau 2. Précipitations moyennes annuelles (2011-2020)..... | 31 |
| Tableau 3. Température à la station de Harreza (2012-2021) | 32 |
| Tableau 4. Température et précipitation à la station Harraza..... | 32 |
| Tableau 5. vitesse du vent (2003-2013)..... | 34 |
| Tableau 6. évaporation mensuelle à la station de Harraza (2019-2020)..... | 34 |
| Tableau 7. Comportement hydrogéologique des différentes formations de la plaine du Haut Cheliff (Ikhlef ,2005) | 41 |
| Tableau 9. Résultats de délimitation de zone d'appel..... | 53 |
| Tableau 10. Calcul des isochrones à 50 jours | 53 |
| Tableau 11. Calcul des isochrones à 100 jours | 54 |
| Tableau 12. Calcul des isochrones à 365 jours | 54 |
| Tableau 13. Méthode du cylindre (t=50jrs) | 58 |
| Tableau 14. Méthode du cylindre (t=100 jrs) | 58 |
| Tableau 15. Méthode du cylindre (t=365 jrs) | 58 |
| Tableau 16. Pouvoir épurateur dans la couverture (sol + zone non saturée) – C1 | 59 |
| Tableau 17. Pouvoir épurateur dans la couverture (sol + zone non saturée) – C2 | 60 |
| Tableau 18. Pouvoir épurateur dans la couverture (sol + zone non saturée) – C3 | 60 |

Introduction Générale

L'eau fait partie intégrante de l'environnement naturel, sa gestion nécessite une utilisation rigoureuse et rationnelle pour la protection. Les eaux souterraines, constituent la ressource la plus utilisée dans la région du Cheliff. Au cours des dernières années, l'utilisation irrationnelle des ressources en eaux souterraines dans le bassin versant du Haut Cheliff a entraîné des pénuries d'eau, surexploitation des eaux souterraines et une détérioration progressive de point de vue qualitative et quantitative. Les pénuries d'eau dans la région ont été exacerbées par les dernières décennies de sécheresse qui ont affectés la région. Pour cela, l'établissement des périmètres de protection autour des captages d'eaux est indispensable pour la préservation des ressources d'eaux contre la pollution.

L'objectif générale de cette étude est comment protection l'eaux souterraine de région haut Cheliff et comparaison entre les méthodes qui nous avons choisi.

Notre travail s'articulera autour des chapitres suivants :

- Le premier chapitre consistera une étude bibliographique générale sur l'eau souterraines et le périmètre de protection et leur méthode et aussi législation dans Algérie et le monde,
- Le second chapitre consacré à la zone d'étude "Haut Cheliff" et leurs contextes (géologiques, hydrologique, géographique,)
- Le troisième chapitre, nous présenterons la méthodologie de notre travail et l'application des méthodes qui nous avons choisi
- Dans le dernier chapitre, on exposera les résultats obtenus et la comparaison entre les résultats des méthodes que nous avons utilisées.

Chapitre I

Notions

bibliographiques

L'eau est une ressource indispensable à la vie. L'eau souterraines représente l'eau stockée en profondeur qu'elle s'infiltra dans le sous-sol et descend jusqu'à être retenue dans une couche imperméable. L'eau souterraine, bien qu'elle soit cachée et invisible, est fragile et souvent vulnérable aux nombreuses des activités humaines. Pour cette raison, il faut protéger les ressources en eau par les périmètres de protection (Renald,2003)

1. Eaux souterraines

1.1. Types des eaux souterraines

Sous l'aspect hydrogéologique, une roche contient de l'eau sous différentes formes :

- Eau de constitution entrant dans la structure cristalline des minéraux (le gypse par exemple a pour formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
- Eau adsorbée à la surface des minéraux par des interactions électrostatiques.
- Eau non-libre située dans les pores fermés et inclusions fluides.
- Eau libre circulant dans les pores et les fissures.

1.2. Captages d'eaux

1.2.1. Puits

Les puits sont des ouvrages verticaux de profondeur moyenne ou faible (inférieur à 100 m) avec un gros diamètre de 1.2 m. Il contient des parois revêtues au moins partiellement de béton ou de maçonnerie

Traditionnellement, ils traversent les niveaux d'altération des formations du socle sur quelques mètres de profondeur et recourent le toit de la nappe, les débits sont alors faibles et l'exploitation de l'eau repose sur l'effet capacitif de l'ouvrage. En plus les puits sont très sensibles :

- Aux variations saisonnières (maximum de débit en hiver et minimum en automne).
- Aux variations climatiques (baisse marquée des niveaux des nappes en période de sécheresse prolongée, pouvant aller jusqu'à l'assèchement temporaire de l'ouvrage).
- À la pollution de l'eau, principalement par les nitrates et pesticides

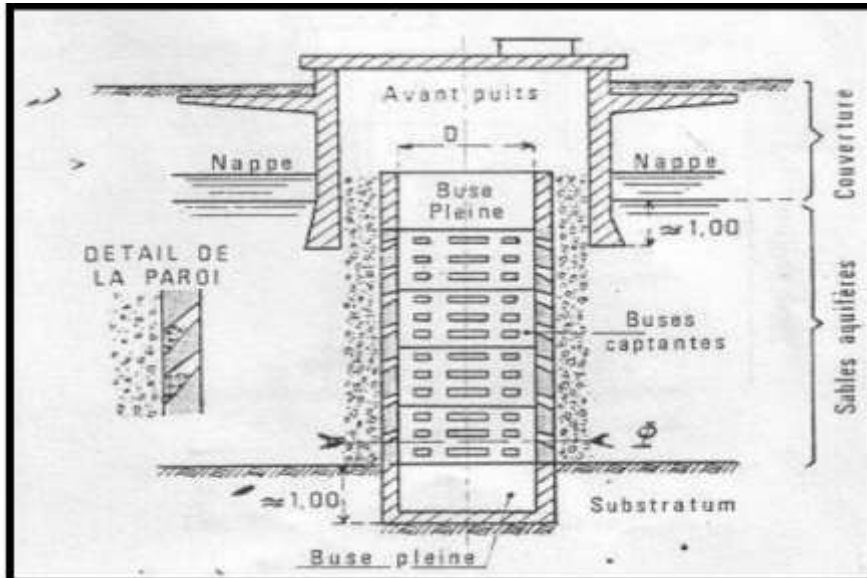


Figure 1. Captage par puits classique

1.2.2. Forage :

Le forage est une technique de captage d'eau souterraine qui permet de creuser des trous verticaux avec des grandes profondeurs qui peuvent aller jusqu'à 1000 m ou plus. Son diamètre est plus faible à celui de puits et sa paroi est protégée par un tube en métal ou une matière plastique et une cimentation entre terrain et tubage dans les premiers mètres.

La première et la plus importante étape pour la conception d'un bon forage est de réaliser la coupe de forage (détermination de la localisation exacte (profondeur)) des couches perméables (aquifères), et la localisation de toute couche imperméable dans le forage.

A partir de la coupe de forage, on peut déterminer précisément la profondeur et la longueur de la crépine ainsi que la profondeur et l'épaisseur du massif filtrant et du joint d'étanchéité sanitaire

Finalement, le forage représente l'ouvrage moderne le plus avantageux pour l'exploitation des eaux souterraines (sur tout pour la consommation humaine) pour les raisons suivantes :

- Leur débit est plus important (parce que l'extraction de l'eau se fait par le pompage).
- La possibilité de pollution est réduite, parce que l'eau du forage est purifiée par un long parcours à travers le sol.

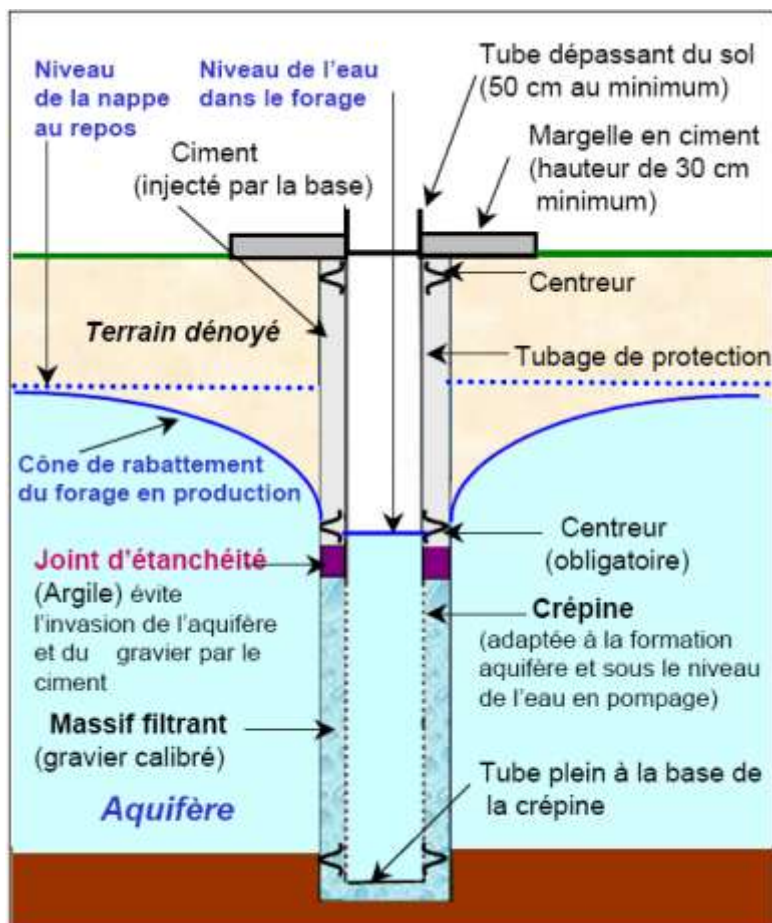


Figure 2. Vue en coupe d'un forage équipé

1.2.3. Sources

Une source est un lieu d'apparition et d'écoulement d'eau souterraine à la surface du sol, elle est toujours liée à l'existence d'une nappe et peut être située au mur ou au toit du réservoir aquifère.

Les sources présentent généralement les qualités de l'eau souterraine, tout en permettant une exploitation aisée. Leur présence est étroitement liée à la géologie du terrain

Un plancher rocheux imperméable, tel qu'un gisement d'argile est à la base d'une couche de sol ou roche saturée, alors, une source tendra à apparaître sur la pente où la couche d'argile affleure.

Les roches plutoniques sont également imperméables à l'eau, pourtant elles sont souvent fragmentées et les sources apparaissent généralement là où ces ruptures viennent en surface

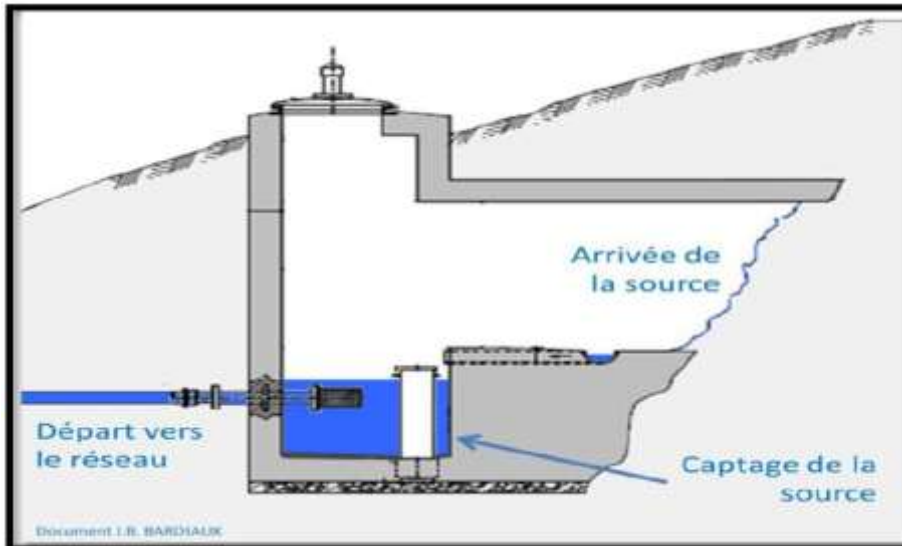


Figure 3. Captage d'une source

1.3. Les nappes souterraines

1.3.1. Nappe libre

Dans une nappe libre, la surface piézométrique peut, en fonction des conditions climatiques et de la recharge de la nappe par les précipitations, fluctuer " librement " dans la formation aquifère considérée car celle-ci s'étend au-dessus de la surface piézométrique

1.3.2. Nappe captive

Dans une nappe captive, la formation aquifère est surmontée d'une couche imperméable. Son niveau piézométrique s'équilibre systématiquement au-dessus du toit de la formation aquifère. Parfois, le niveau piézométrique est supérieur à la cote altimétrique du sol créant, si une connexion est établie (notamment par forage), un phénomène d'artésianisme.

1.3.3. Nappe semi-captive

C'est le cas intermédiaire entre les nappes libres et les nappes captives. Dans ce type d'aquifère le toit et le substratum (ou tous les deux) sont souvent constitués par une formation hydrogéologique semi perméable (peu perméable). Celle-ci permet, dans certaines conditions hydrodynamiques favorables des échanges d'eau (ou de pression) avec l'aquifère superposé ou sous-jacent, appelé drainant

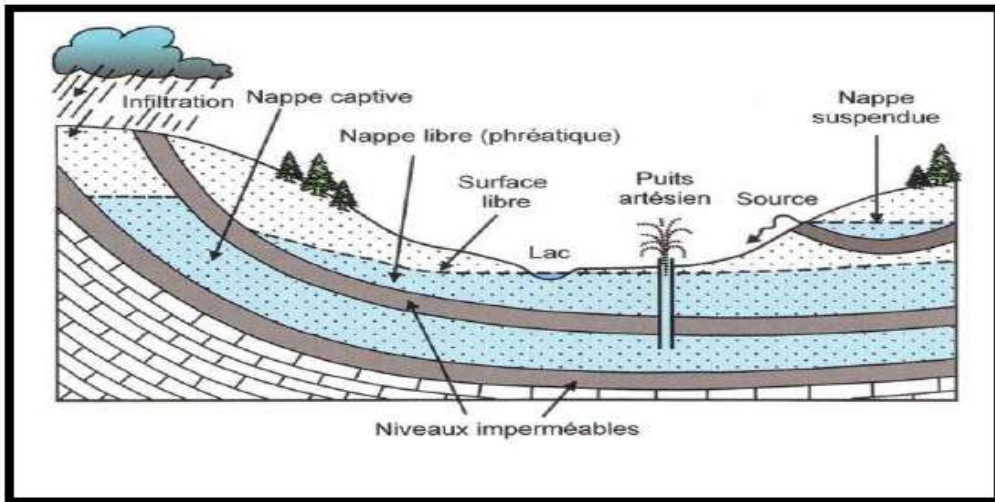


Figure 4. Types de nappes

1.4. Aquifères

L'eau souterraine exploitée par les hydrogéologues est contenue et se déplace selon les gradients d'élévation et de pression dans les formations géologiques poreuses et perméables (à des degrés divers). L'ensemble formation-eau souterraine est appelé aquifère. On appelle aquifère un corps de roche perméable comportant une zone saturée - ensemble du milieu solide et de l'eau contenue - suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre d'eau appréciables. L'écoulement significatif d'une nappes souterraine et le captage de quantités (Castany, 1998)

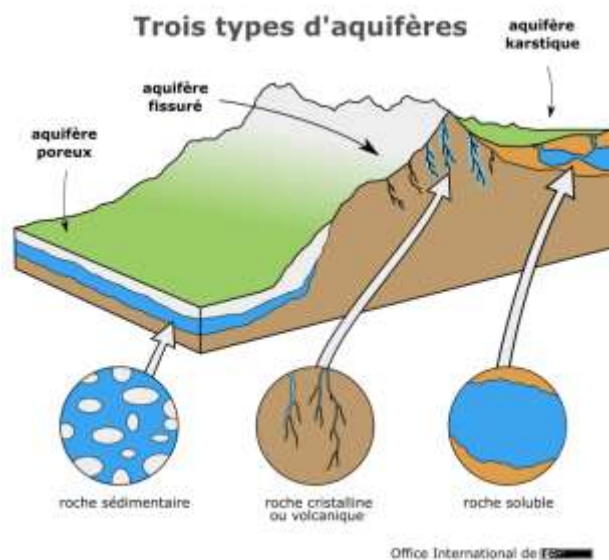


Figure 5. Types d'aquifère

2. Pollution des eaux souterraines

2.1. Définition de la pollution

On parle d'une eau polluée lorsqu'elle perd au moins une de ses fonctions (ou un de ses usages) et elle devient impropre à répondre aux normes d'utilisation comme elle peut aussi présenter un danger pour l'environnement

Le degré de pollution de l'eau est apprécié par la mesure de l'écart entre le "bruit de fond" qui est la teneur en substances minérales dissoutes d'origine naturelle (géologique) caractérisant les eaux souterraines et leurs caractéristiques physico-chimiques de l'eau

2.2. Types de polluants

Un polluant est un facteur qui entraînera, en raison d'une intensité ou d'une concentration anormale, une détérioration de la qualité de l'eau naturelle.

Les polluants de l'eau peuvent se présenter sous différentes formes, on peut distinguer trois types de polluants :

Polluants physiques

Les principaux agents physiques de la pollution sont : la chaleur (température), la radioactivité, les matières en suspension (MES) ...

Polluants chimiques

Les sels minéraux, les métaux lourds, les pesticides, les détergents, les hydrocarbures, les solvants, ...etc.

Polluants microbiologiques

Elles représentent généralement : les virus, les bactéries, les germes et les micro-organismes.

2.3. Différents types de pollution

La pollution des eaux souterraines peut être ponctuelle, diffuse, temporaire ou chronique.

2.3.1. Pollution temporaire et chronique :

L'émission exceptionnelle de matière polluante à la suite d'un incident (mauvaise manœuvre en usine, accident de la circulation...) peut entraîner un transfert à la nappe et sa pollution dont la durée dépend de son pouvoir d'autoépuration et de sa vitesse de percolation.

2.3.2. Pollution diffuse

Le nitrate émis sur une faible surface n'affectera qu'un secteur limité de la nappe, qui pourra s'étendre par diffusion. Seuls les captages à proximité de la zone polluée et en aval seront affectés et la zone polluée sera circonscrite ou diffuse à la surface ou à l'intérieur

Les nappes libres sont les plus vulnérables, les pollutions d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique de la nappe

2.3.3. Pollution linéaire :

Elle accompagne le trajet des routes, des canaux, des cours d'eau. Généralement elle est due à des rejets d'origine industrielle et domestique (BRGM.,2004)

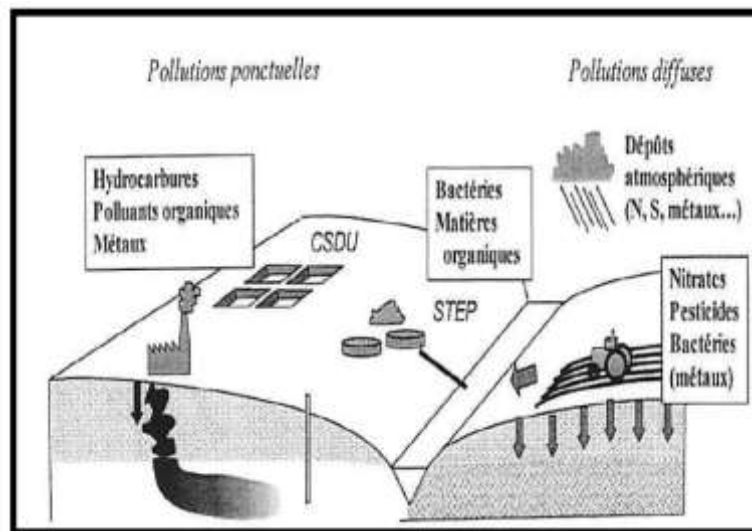


Figure 6. Pollution ponctuelle et diffuse des eaux souterraines

2.4. Origine de la pollution par les nitrates

2.4.1. Pollution domestique

Les familles utilisent l'eau pour leurs besoins ménages et leurs loisirs. Ce type de pollution regroupe; les eaux de vannes (sanitaires), les eaux de cuisines, les eaux de buanderies

2.4.2. Pollution agricole :

L'utilisation massive des engrais et l'élevage intensif emportent des apports excessifs de fertilisants à base d'azote sur le sol engendrant ainsi une pollution des eaux par les nitrates. Cet apport est l'origine principale de l'entraînement des nitrates dans les nappes souterraines, surtout si l'on sait que ces aquifères sont sous des terrains agricoles à perméabilité élevée

2.4.3. Pollution industrielle :

L'industrie agroalimentaire est caractérisée par la prédominance des composants à base d'azote qui se transforme par la suite en nitrates pouvant contribuer à la dégradation de la qualité des eaux.

3. Notions de Périmètre de protection

Le périmètre de protection est une zone particulière autour d'un captage d'eau potable (source ou forage) où des prescriptions sont établies pour limiter les risques de pollution de l'eau captée. Les périmètres de protection des champs de captage des eaux souterraines sont définis 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.

3.1. Types de Périmètre de protection

Il existe trois types de protection des eaux souterraines : immédiate, rapprochée et éloignée.

3.1.1. Périmètre de protection immédiat (PPI)

Premier niveau de protection, obligatoire, il comprend le terrain directement adjacent au point

de captage et vise à éviter les injections directes de polluants à l'intérieur ou à proximité de captage. Ce terrain doit être entièrement clôturé. Aucune activité n'est tolérée à l'intérieur, à l'exception de celles qui sont liées à l'exploitation de l'eau et la maintenance des ouvrages. D'autre part, la zone de protection immédiate englobe le point de prélèvement où les contraintes

de pollution sont fortes.

3.1.2. Périmètre de protection rapprochée (PPR)

Deuxième niveau de protection, il est obligatoire et correspond généralement à une zone plus vaste (quelques hectares) autour de l'ouvrage de captage. Ce périmètre délimite le secteur dans lequel toute pollution ponctuelle ou accidentelle est susceptible d'atteindre rapidement le captage soit par ruissellement superficiel, soit par la migration souterraine des substances polluantes.

À l'intérieur de ce périmètre, les activités interdites sont généralement comme suit :

- L'exploitation des carrières à ciel ouvert.
- Le dépôt d'ordures ménagères, détritiques et produits radioactifs et de tous produits et matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux.

- L'épandage de fumier, d'engrais et de pesticides.
- L'installation d'équipements servant le stockage et le transport des hydrocarbures.
- L'installation des canalisations d'eaux usées

3.1.3. Périmètre de protection éloignée (PPE)

Ce périmètre est facultatif (non obligatoire), Il correspond le plus souvent à toute la zone où l'aire d'alimentation de l'ouvrage, il est essentiellement destiné à attirer l'attention sur la présence d'une ressource captée pour l'alimentation en eau potable et donc sur l'obligation de vigilance afin que les activités existantes et de futures ne nuisent pas à la qualité des eaux souterraines captées. D'autre part, l'objectif de ce périmètre est la protection contre toute pollution ponctuelle ou diffuse qui pourrait affecter la qualité des eaux souterraines sur des longues distances comme les substances chimiques ou peu dégradables ainsi que les substances radioactives

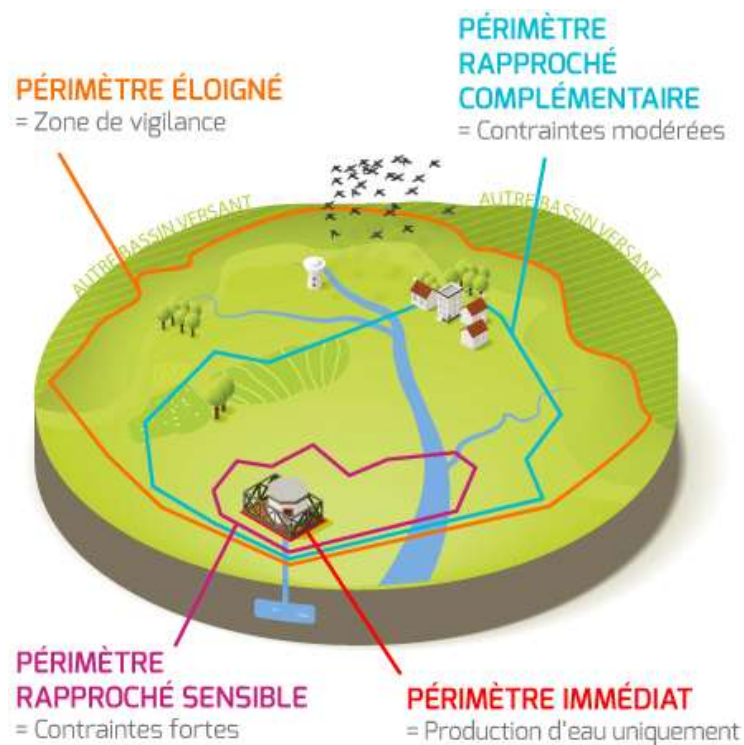


Figure 7. type de périmètre de protection

3.2. Critères de délimitation des zones de protection

Les critères utilisés pour délimiter les zones de protection sont le pouvoir épurateur, le rabattement, le temps de transfert et les limites d'écoulement.

3.2.1. Le pouvoir épurateur

Le pouvoir épurateur du sol, puis de la zone non saturée joue un rôle très important pour éviter

la propagation d'une pollution en direction des nappes. Donc, La concentration du polluant peut

avoir considérablement diminué à son entrée dans la nappe, si le pouvoir épurateur du sol et de

zone non saturée est efficace

3.2.2. Rabattement

Il y a rabattement lorsque l'eau souterraine est retirée d'un aquifère par pompage, L'abaissement du niveau d'eau dans le puits crée un gradient qui entraîne l'eau vers le point de décharge. Ainsi, il se crée un cône de rabattement au voisinage du puits. La vitesse d'écoulement de l'eau souterraine augmente à mesure que l'on s'approche du puits, ce qui a pour effet de diminuer le temps d'arrivée d'un contaminant au puits.

- La **zone d'influence** est la distance à partir du puits où les changements du niveau de la nappe peuvent être attribués au pompage. Dans un aquifère isotrope, homogène et sans gradient hydraulique appréciable, la zone d'influence est circulaire.
- La **Zone d'appel** est la zone où l'ensemble des lignes de courant se dirigent vers le captage. La détermination graphique de cette zone suppose la connaissance de la piézométrie avant et après la réalisation d'un essai de pompage. Elle consiste à tracer les courbes d'égal rabattement autour du forage ou puits en fonction du débit choisi. À partir des valeurs de charge hydraulique on construit la surface piézométrique rabattue par le pompage et le tracé des lignes de courant qui en sera déduit, la zone d'appel du captage est définie.

3.2.3. Temps de transfert

Le temps de transfert est un critère basé sur le temps qu'il faut à un polluant pour se déplacer du point d'entrée dans la nappe jusqu'à l'arrivée au captage. Il faut également tenir compte du transfert en zone non saturée. À l'intérieur de la zone ou l'aire d'alimentation du captage, on définit alors des courbes d'égal temps de transfert (les isochrones). Ce critère inclut plus de processus physiques que les autres critères, il comprend en effet la convection, la dispersion et l'interaction solide-soluté

3.2.4. Limites d'écoulement

La détermination des périmètres de protection est basée sur ce critère consiste à utiliser les caractéristiques géomorphologiques, géologiques, hydrologiques et géochimiques de l'aquifère. Ce critère permet de définir la zone de contribution ou l'aire d'alimentation d'un ouvrage de captage. Le volume d'eau contenu à l'intérieur de la zone de contribution correspond à la quantité d'eau disponible pour l'ouvrage de captage. Il s'agit de la protection maximale attribuable à un captage.

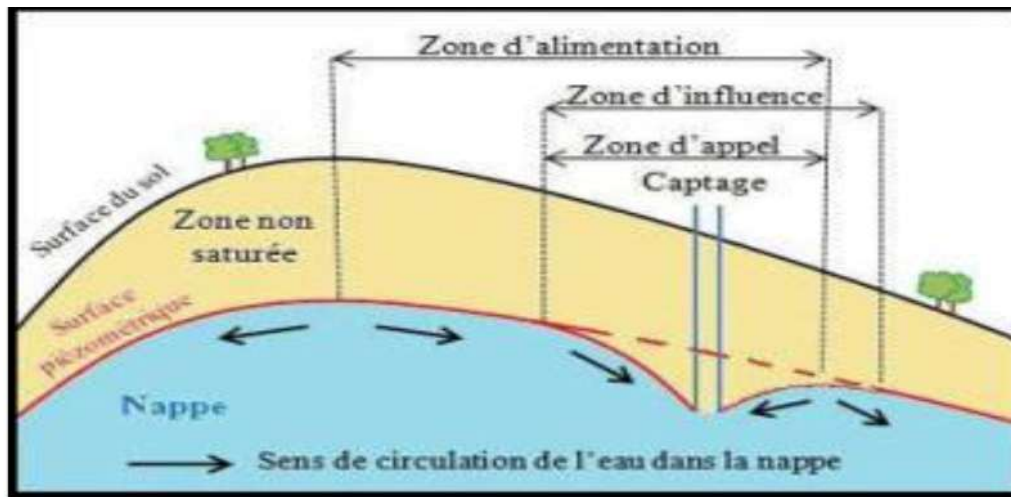


Figure 8. Zone d'appel, zone d'influence et zone d'alimentation d'un captage

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

4.1. Approche Cartographique

Dans bon nombre d'aquifères, les limites d'écoulement et le temps de transport peuvent être cartographiés par l'étude de la géologie, par des mesures piézométriques par l'application de méthodes géophysiques et par des essais de traceurs. Les limites d'écoulement peuvent être de type géologique ou hydraulique. Les limites géologiques sont définies par des variations de lithologie ou des contrastes de perméabilité à l'intérieur de l'aquifère tandis que les limites hydrauliques sont définies par l'écoulement de l'eau souterraine. La méthode de cartographie hydrogéologique requiert généralement beaucoup de données et d'expertises techniques. Pour ces raisons, il est invraisemblable qu'une petite communauté avec des moyens financiers limités puisse l'utiliser. Par ailleurs, lorsque des fonds sont disponibles pour l'obtention des données nécessaires et d'expertise technique, la cartographie hydrogéologique est

recommandée. Cette méthode est particulièrement très utile lorsqu'elle est combinée avec une méthode analytique ou numérique.

La piézométrie comme méthode de cartographie hydrogéologique consiste à définir les limites d'écoulement hydraulique à partir de la carte piézométrique d'un aquifère. Dans les aquifères granulaires à nappe libre peu profonde, la définition de l'écoulement peut être très précise à cause de la facilité à mettre en place des puits d'observation et à obtenir un grand nombre de mesures de niveau d'eau. Cette méthode permet de définir la zone de contribution d'un ouvrage de captage.

4.2. Approche empirique

4.2.1. Méthode de Rehse

Pour ce faire, les sols qui peuvent être rencontrés sont classés en fonction de la granulométrie. Chaque catégorie de matériau est affectée d'un index qui permet de calculer le pouvoir épuratoire de ce matériau :

$$I = \frac{1}{H} \quad \text{où } H = \text{épaisseur en mètre sur la tranche vertical}$$

$$I = \frac{1}{L} \quad \text{où } L = \text{longueur en mètre du trajet horizontal dans la nappe}$$

Le pouvoir épurateur des terrains est calculé par :

$$M_x = \frac{M_d}{M_r}$$

Avec : M_x : pouvoir épurateur sur la totalité du transfert

M_d : pouvoir épurateur sur le trajet vertical.

M_r : pouvoir épurateur sur la distance horizontale

L'épuration est complète si : $M_x = 1$. Sur le trajet vertical, le pouvoir épurateur est égal à :

$$M_d = h_1 I_1 + h_2 I_2 + h_3 I_3 + \dots + h_n I_n = \sum_{i=1}^n h_i I_i$$

Cette relation s'applique pour le trajet vertical des terrains multicouches.

- Si $M_x \ll 1$, cela signifie que l'épuration est totale dans les couches de couverture. Selon **Rehse**, la délimitation d'un périmètre rapproché n'est pas nécessaire dans ce cas.
- Si $M_x \ll 1$, la dépollution n'est pas totale. Elle doit se poursuivre dans la roche aquifère lors du transfert horizontal. Soit $M_r \ll 1 \ll M_d$, pouvoir épurateur horizontal dans l'aquifère

La distance L à parcourir horizontalement pour une épuration totale sera donc :

$$L \approx \frac{M_r}{I_a}$$

(Avec I_a = index correspondant aux matériaux aquifère)

L correspond dans ce cas à la limite de la zone de protection rapprochée. S'il n'y a pas de couverture, toute l'épuration doit se faire horizontalement.

M_r doit être égal à 1, et on aura alors :

$$L \approx \frac{1}{I_a}$$

Et L = limite de la zone de protection rapprochée est calculée par la formule :

$$L_{\min} = \sqrt{\frac{Q_{50}}{bn\pi}}$$

min \ll Avec Q_{50} le débit à la source en m³ pour 50 jours
b: Épaisseur de l'aquifère

n : Porosité équivalente

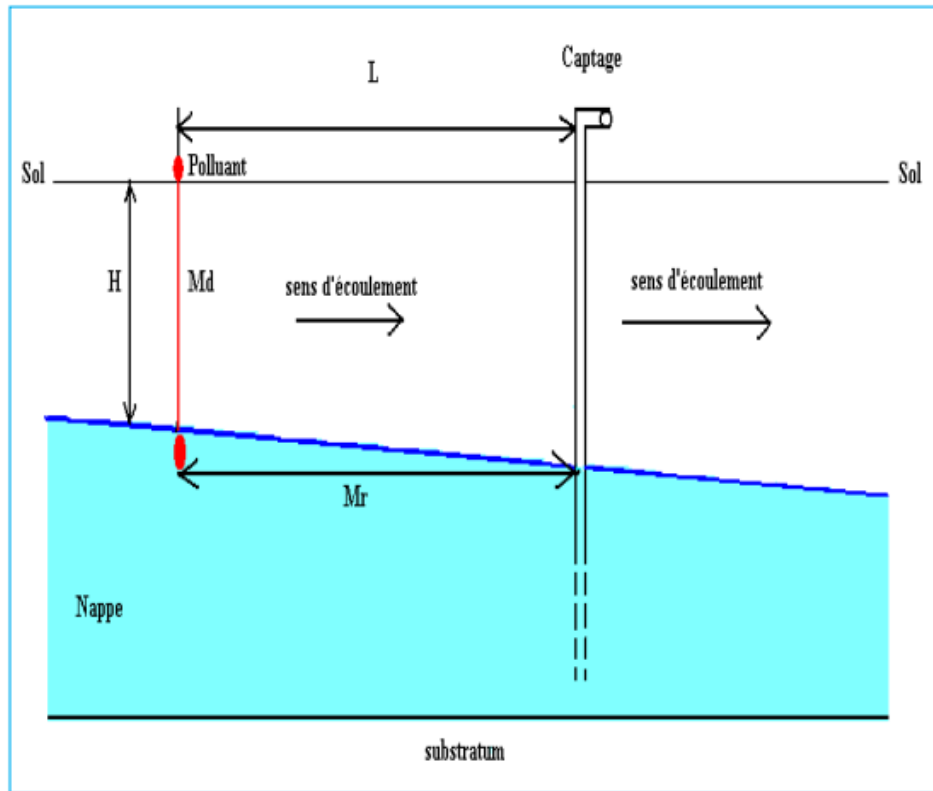


Figure 9. Cheminement d'un polluant depuis la surface jusqu'au captage

4.2.2. 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).

4.3. Approche graphique

4.3.1. 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

4.4. Approche hydrodynamique

4.4.1. Méthodes volumiques

a. Méthode d'infiltration

Cette méthode consiste à établir un bilan de masse entre le volume d'eau prélevé par un puits, 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 1 et 2 suivantes :

$$A = \frac{Q}{i} \quad \text{ou} \quad r = \frac{\sqrt{Q}}{\pi \times i}$$

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 périmètre de protection rapprochée et il est évalué par la relation suivante

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

Avec :

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

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

e : épaisseur de la nappe (m).

n_e : porosité efficace de la nappe (sans dimension)

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 hydrodynamiques : la perméabilité et le rabattement.

$$R = 3000 \times S_w \times \sqrt{k}$$

Où : K : conductivité hydraulique

S_w : rabattement au périmètre extérieur du puits

R : rayon d'action fictif (m)

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 .

Le rayon d'action fictif est calculé par la relations suivante :

$$R = 575 \times s_w \times \sqrt{k \times h}$$

Avec : R = rayon d'action fictif (m)

S_w : rabattement au périmètre extérieur du puits

K : conductivité hydraulique

H : épaisseur de l'aquifère saturé

4.4.2. Méthodes analytiques

a. 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.

b. Méthode de Wyssling

Cette méthode est largement utilisée dans le monde, elle est généralement appliquée pour la délimitation des périmètres de protection des captages d'eau souterraine en supposant que l'aquifère est homogène et illimité.

Selon Lallemand Barres (1999), la méthode consiste à calculer dans un premier temps la zone d'appel du captage, puis à chercher la distance correspondant au temps de transfert souhaité (les isochrones), dans la direction d'écoulement. Ainsi, la méthode demande un pompage d'essai et les données hydrogéologiques suivantes :

- Epaisseur de l'aquifère (b) en [m]
- Perméabilité K en [m /s]
- Gradient hydraulique **I**.
- Porosité efficace ω .
- Débit du puits Q [m³/s]

4.4.3. 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.

a) Méthode CFR (Calculated Fixed Radius) ou Méthode du Rayon Fixe Calculé

L'équation du cylindre est celle utilisée pour la détermination des périmètres de protection par cette méthode. Il est relativement simple d'usage si les données requises sont disponibles.

Cette équation est un bilan de masse entre le volume d'eau extrait par l'ouvrage de captage pendant un temps donné et le volume d'eau contenu à l'intérieur d'un cylindre équivalent de l'aquifère entourant le captage. En assimilant donc la zone de contribution de l'ouvrage à un cylindre autour du puits, cette zone peut être décrite de la manière suivante :

$$Q_t = \pi r^2 n b$$

(Volume pompé) (Volume du cylindre)

D'où
$$r = \sqrt{\frac{Q_t}{\pi \times n \times b}}$$

Avec r = rayon de la zone de captage autour du puits correspondant à un temps de transfert

Q = débit de pompage du puits (m³/j)

t = temps de transfert (j)

n = porosité de l'aquifère (sans unité)

b = épaisseur de la couche aquifère (m)

L'équation calcule le rayon du cylindre représentant le volume d'eau qui s'écoule dans le puits pendant la période de temps spécifié. La représentation surfacique de ce volume cylindrique est un cercle ayant pour centre le puits. L'utilisation de cette méthode requiert un certain nombre d'hypothèses :

- L'écoulement souterrain est inter granulaire à travers des milieux poreux ;
- Le puits pénètre toute l'aquifère et est ouvert sur toute son épaisseur mouillée ;
- L'épaisseur mouillée est spatialement constante ;
- L'écoulement vertical est négligeable ;
- Le débit de pompage reste constant au cours du temps

4.5. Approche mixte

4.5.1. 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) :

- ✓ **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.

4.6. Approche par modélisation

4.6.1. WhAEM 2000

Le modèle WhAEM 2000 est un modèle d'écoulement des eaux souterraines du domaine public conçu pour faciliter la délimitation et la cartographie des zones de capture en appui aux programmes de protection des têtes de puits et de planification des sources d'eau aux États-Unis. , WhAEM2000 fournit un environnement informatique interactif pour la conception de zones de protection basées sur des méthodes de rayon, des solutions de flux uniformes et des méthodes de modélisation hydrogéologique. Les zones de protection sont conçues et superposées au graphe numérique du US Geological Survey ou à d'autres cartes de base électroniques. Les cartes de base d'un projet peuvent être sélectionnées à partir d'une carte d'index graphique pour l'État. La modélisation hydrogéologique des puits de pompage

permanent, y compris l'influence des limites hydrologiques, telles que les rivières, la recharge et les contacts sans écoulement, est réalisée à l'aide de la méthode de l'élément analytique.

4.6.2. MODFLOW / MODPATH

MODFLOW-2000 (Harbaugh et autres 2000) est un programme informatique qui résout numériquement l'équation tridimensionnelle de l'écoulement souterrain pour un milieu poreux en utilisant une méthode de différences finies. (Sauf indication contraire, les références à MODFLOW font référence à la version MODFLOW-2000 du programme USGS). MODFLOW peut être chargé d'enregistrer les résultats de la simulation dans des fichiers de liste de texte et des fichiers de sortie de budget binaire cellule par cellule. MODPATH version 6 est un «modèle de post-traitement de suivi des particules qui calcule des trajets d'écoulement tridimensionnels à l'aide des simulations d'écoulement des eaux souterraines produites par MODFLOW, le modèle d'écoulement des eaux souterraines par différences finies» (Pollock 2012), les fichiers de sortie de flux cellule par cellule générés par MODFLOW fournissent la vitesse de l'eau souterraine dans chaque cellule du modèle et sont utilisés dans MODPATH pour calculer des trajets de «particules» imaginaires d'eau traversant le système d'écoulement d'eau souterraine.

Les emplacements de départ des particules peuvent être générés automatiquement par MODPATH ou définis dans un fichier d'entrée. MODPATH calcule également la longueur du chemin d'écoulement et le temps de parcours des particules se déplaçant dans le système d'écoulement. MODPATH peut être configuré pour produire des fichiers de sortie répertoriant les emplacements de départ et d'arrivée de toutes les particules, le chemin de chaque particule ainsi que la distance et le temps de trajet total de chaque particule

5. Protection de l'eau

5.1.1. Protection de l'eau en Algérie

La protection de l'eau se fait tout d'abord par l'établissement de textes législatifs qui réglementent et organisent le secteur de l'eau dans sa globalité. Ainsi des lois et des décrets sont mis en place pour protéger les ressources en eau mobilisées et destinées vers la consommation humaine. Dans ce qui suit nous passons en revue les différents textes législatifs qui ont touché le secteur de l'eau.

- Loi du 16 Juillet 1983 porte le code des eaux, définit le périmètre de protection comme contour délimitant un domaine géographique et les activités à l'intérieur sont interdites ou réglementées.
- Loi du 4 août 2005 relative à l'eau, fixe les principes et les règles applicables pour l'utilisation, la gestion et le développement durable des ressources en eau et montre la nécessité des périmètres de protection contre la pollution La protection et la préservation des ressources en eau sont assurées par :
 - Des périmètres de protection quantitative,
 - Des plans de lutte contre l'érosion hydrique,
 - Des périmètres de protection qualitative,
 - Des mesures de prévention et de protection contre les pollutions,
 - Des mesures de prévention des risques d'inondations.
- Décret du 23 décembre 2007 relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eau.
 - Le périmètre de protection immédiat
 - Le périmètre de protection rapprochée.
 - Le périmètre de protection éloignée.
- Décret du 6 février 2010 fixe les modalités de délimitation de périmètre de protection quantitative des nappes aquifères ainsi que les conditions spécifiques d'utilisation de leurs ressources en eau.
- Décret du 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine, fixe les paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine ainsi que les modalités de contrôle de conformité.
- Décret du 25 avril 2012 relatif à l'exploitation et à la protection des eaux minérales naturelles et des eaux de source par l'évaluation du périmètre de protection de la ressource.

5.1.2. Réglementation en Europe

En France, les périmètres de protection des captages avaient été instaurés par la loi de 1964 et des outils complémentaires ont ensuite été rajoutés pour protéger les captages, comme la désignation de ZSCE (« Zones soumises à Contraintes Environnementales ») de la loi LEMA

de 2006. Cette loi a également instauré la délimitation des AAC (« Aires d’Alimentation des Captages ») qui vise à identifier les zones sur lesquelles concentrer les actions (par l’établissement d’un plan d’actions) afin de lutter contre la pollution diffuse. Le terme AAC qui est utilisé uniquement en France semble correspondre au terme « Wöhler catchent » employé au RU.

En Allemagne, c’est la loi sur le régime des eaux de 1957 qui est la loi-cadre édictant les règles à respecter par chaque *länder*. Cette loi a été modifiée plusieurs fois : en 2010 pour la dernière fois, afin de transposer la DCE (directive cadre sur L’eau) dans le droit national. Concernant la protection des captages, chaque *länder* établit ensuite une loi qui lui est propre (Land Water Act), qui reprend les règles de la loi nationale sur l’eau et qui les complète éventuellement. De plus, afin de coordonner l’action de chaque land et de favoriser la collaboration dans le domaine de la protection des ressources en eau, un groupe de travail a été établi : le *Länderarbeits gemeinschaft Waser*(ou LAWA).

En Espagne, les périmètres de protection des captages étaient déjà mentionnés dans la loi sur l’eau espagnole (La Ley de Aguas) de 1985, révisée en 2001 pour transposer la DCE. Un guide officiel pour l’élaboration des périmètres de protection a été rédigé dès 1991, puis remis à jour en 2003, par l’IGME (Institut Geológico y Minero de España). En plus de la loi nationale, qui est mise en application par décrets royaux, la protection des captages AEP (alimentation en eau potable) est assurée par l’application de la législation de chacune des communautés autonomes.

Au Royaume-Uni, 3 principales lois régissent la protection des ressources en eau : l’Environmental Protection Act(1990, révisé en 1995), la Water Resources Act(1991) et la Water Act(2003). Des plans et stratégies nationales, rédigés par l’Agence de l’Environnement, sont également pertinents au niveau de chaque nation composant le Royaume-Uni : comme par exemple la stratégie pour l’Angleterre et les Pays de Galles de 2009.

Dans tous les pays étudiés, le principe de délimitation de zones de protection est basé sur la prévention de l’impact potentiel des activités humaines qui peuvent polluer les ressources en eau. Bien que le nom de ces zones de protection diffère selon le pays étudié, l’objectif reste le même. La délimitation de ces zones et/ou périmètres est généralement liée à différents degrés de protection souhaités et comporte ainsi les zones suivantes :

- une zone de protection immédiate autour de l’ouvrage de prélèvement pour éviter les pollutions directes de la source et pour protéger les ouvrages de prélèvement,

- une zone de protection basée sur le temps estimé nécessaire pour réduire la présence d'un pathogène à un degré acceptable,
- une zone de protection basée sur le temps nécessaire pour permettre une dilution ou une atténuation de la quantité de polluant avant qu'il arrive à la ressource,
- une quatrième zone plus large est parfois ajoutée pour protéger l'ensemble du bassin versant afin d'éviter une dégradation à long terme de la ressource.

Les différentes approches employées pour délimiter ces zones de protection sont fondées sur la distance, le rabattement de la nappe, le temps de transport d'un contaminant jusqu'à la ressource, le temps d'atténuation nécessaire pour réduire la quantité de polluant et les délimitations hydrogéologiques. Ainsi, selon les pays, et selon les quantités de données disponibles, la délimitation des zones se fait soit sur des critères parfois fixés arbitrairement soit sur des approches plus complexes avec des calculs et des modélisations.

Les principaux outils et initiatives de protection directe des captages sont repris dans le Tableau suivant :

Tableau 1. Principaux outils de protection des captages AEP

| Pays | Protection | Description | Objectif | Règlementation |
|--------------------|--|---|--|--|
| France | Périmètres de protection des captages, ppc | Ppi: pp immédiat quelques (2M) Ppr : pp rapproché 10 à 100ha Ppe : pp éloigné | Principalement pour lutter contre les pollutions ponctuelles et accidentelles | Obligatoire pour tous les captages Validé par un dup (déclaration d'utilité publique) |
| Allemagne | Zones de protection des captages | 3 zones (Rayon de 2km autour du captage) | Zone 1 : protection des installations Zone 2 : protection contre les pollutions bactériennes Zone 3 : protection contre les pollutions chimiques ou radioactives | Obligatoires avec compensations financières inscrites à la loi sur l'eau |
| Espagne | Zones de protection des captages | 3 zones auxquelles sont associées 3 périmètres de protection | Protéger la qualité de l'eau, contre les pollutions microbiologiques et chimiques | Obligatoires dans le périmètre de protection immédiate Obligatoires ou modulables dans les 2 autres zones |
| Royaume-Uni | Source protection zones (spz) | 3 zones concentriques spz1 (la plus proche du captage) spz2 et spz3 | Protéger contre les pollutions ponctuelles, accidentelles Sensibiliser la population à l'importance de la qualité de la ressource souterraine | Non obligatoires mais tous les captages ont au moins une spz1 |
| | Saveguard Zones (SgZ) | Autour de ressources où la pollution augmente | Délimitées autour de ressources déjà affectées par la pollution diffuse. Lutter contre la pollution diffuse. | Non obligatoires. |

Conclusion

De cette synthèse bibliographique, il en ressort les points suivants : Le périmètre de protection a pour but protégé la qualité des captages d'eau destinée à la consommation humaine et garantir la santé publique, la méthodologie d'instauration du périmètre de protection dépend en grande partie du type d'aquifère (poreux, karstique ou fissuré), la délimitation du bassin d'alimentation de captage est très difficile et complexe dans un aquifère karstique qui revient à l'hétérogénéité du terrain, les méthodes de dimensionnement des périmètres de protection des captages des Eaux souterraines ne sont pas bien définies dans les textes législatifs concernant la protection des ressources d'eau en Algérie.

Chapitre II

Présentations de la

zone d'étude

1. Situation géographique de la zone d'étude

La plaine alluviale du haut Cheliff appartient à la wilaya de Ain Defla, elle est située à 120km au sud-ouest d'Alger et 25km à l'est du chef-lieu de la wilaya sur la route nationale N4. Appartenant au sous bassin versant du Haut Cheliff d'un périmètre de 1025km et une superficie de 21035km², elle est limitée au nord par les monts du Zaccar, au sud par les contreforts de l'Ouarsenis, à l'ouest par le massif de douil et à l'est par djebel gontas (figure II.1), est comprise entre les coordonnées 36° 12' et 36° 17' de latitude nord, cestà dire entre les communes de Bir –Oued-Khalifa et de Miliana et 2° 12' et 2° 17' de longitude est, soit entre djebels doui et gontas.

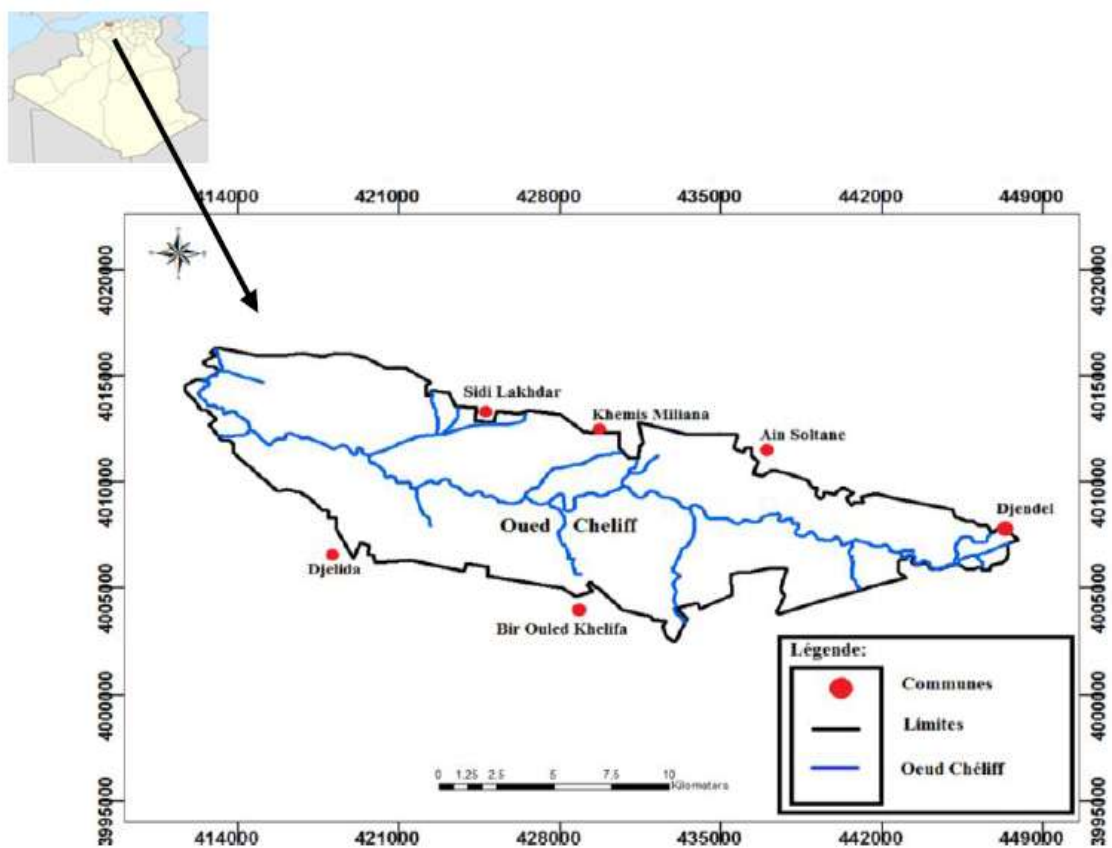


Figure II.1: Localisation de la plaine du Haut Chélif. (Halfaoui et Bouhail, 2019)

2. Contexte hydro-climatique

2.1. Réseau hydrographique

Dans la plaine du Haut Cheliff, oued Cheliff partage ce périmètre en deux rives : la rive droite couvre 11303 ha tandis que la gauche fait 9730 ha. Les principaux oueds qui convergent vers la plaine d'El Khemis sont :

- Oued souffay : qui draine le secteur Nord-est de monts du Zaccar et reçoit l'eau de la ville de Khemis.
- Oued Boutane : qui collecte des eaux provenant du secteur Nord du Zaccar, puis traverse la plaine où il présente, par endroits, des intercommunications avec la nappe alluviale avant de rejoindre l'oued Cheliff à l'ouest de la plaine.
- Oued Deurdeur : qui prend sa source dans les amonts d'Ouarsenis au sud de zone d'étude, qui traverse plusieurs kilomètres plus facilement avant de confluer avec l'oued Cheliff.
- Oued Harraza : est également un oued du sud (Ouarsenis) il est caractérisé par un débit élevé du fait de l'importance de sa surface d'impluvium, dans sa partie aval il s'écoule dans la plaine où il présente un infiltrer en relation avec la nappe alluviale et rejoint plus en aval l'oued Cheliff.

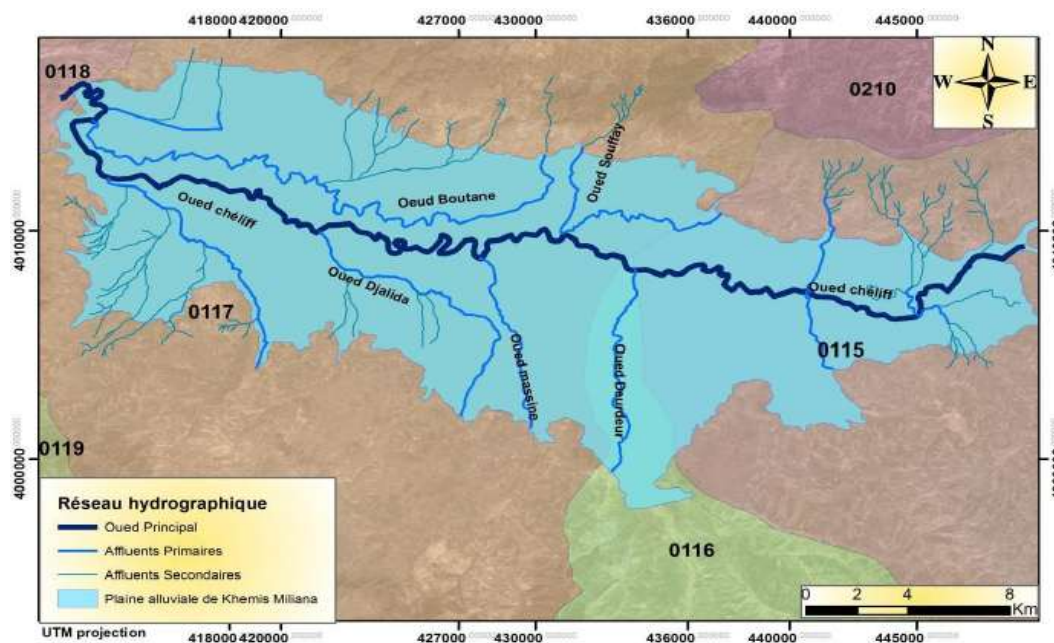


Figure 10. Réseau hydrographique de la plaine du Haut Cheliff (Sahraoui, 2015)

2.2. Précipitation

2.2.1. Précipitation moyennes annuelles :

La variation des précipitation moyennes annuelles(mm) au niveau de la station Khemis Miliana (011717) et de Ababssa(011715) et de Arib Cheliff(011702) est compilé dans le tableau suivant :

Tableau 2. Précipitations moyennes annuelles (2011-2020)

| Station | Code | X(m) | Y(m) | Z(m) | Pm(mm) |
|----------------|--------|------------|------------|------|--------|
| Khemis Miliana | 011717 | 431848.16 | 4012029.25 | 285 | 319.16 |
| Arib Cheliff | 011702 | 412561.16 | 4016440.25 | 230 | 191.59 |
| Abassa | 011715 | 4141166.16 | 4002034.5 | 320 | 154.06 |

La détermination de la lame d'eau moyenne précipitée dans la région d'étude a été effectuée par la méthode des moyennes arithmétique :

$$A_{\text{moy}} = \sum p_i / n$$

Avec : P_i : pluie moyenne au niveau de la station i

n : Nombre total des postes pluviométriques

2.3. Températures

Les données existantes sont celles de la station de Harreza avec des enregistrements durant la période (2012-2021)

2.3.1. Températures moyennes mensuelles

La variation de la température moyenne mensuelle d'une période de 10 ans (2012-2021) montre que la valeur la plus élevée est observée en été du mois de juillet avec une valeur de 23,1° tandis que la plus basse valeur est observée en mois de janvier avec une valeur de 8,38°

La température minimale est observée au mois de février avec 0° tandis que la température maximale est observée en été du mois juillet 35,7°

Tableau 3. Température à la station de Harreza (2012-2021)

| Mois | sep | oct | Nov | Dèc | Jan | Fèv | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Aout |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tmin | 11,6 | 6,02 | 3,4 | 2,7 | 0,03 | 0,03 | 1,8 | 4,4 | 6,4 | 11,2 | 13,3 | 4,2 |
| Tmoy | 19,2 | 15,8 | 12,2 | 8,4 | 8,3 | 9,3 | 11,2 | 14 | 17,8 | 22,2 | 23,1 | 7.37 |
| Tmax | 32,3 | 29,6 | 23,9 | 18,5 | 17,8 | 19,4 | 23,3 | 29,1 | 31,0 | 35,7 | 29,8 | 10,9 |

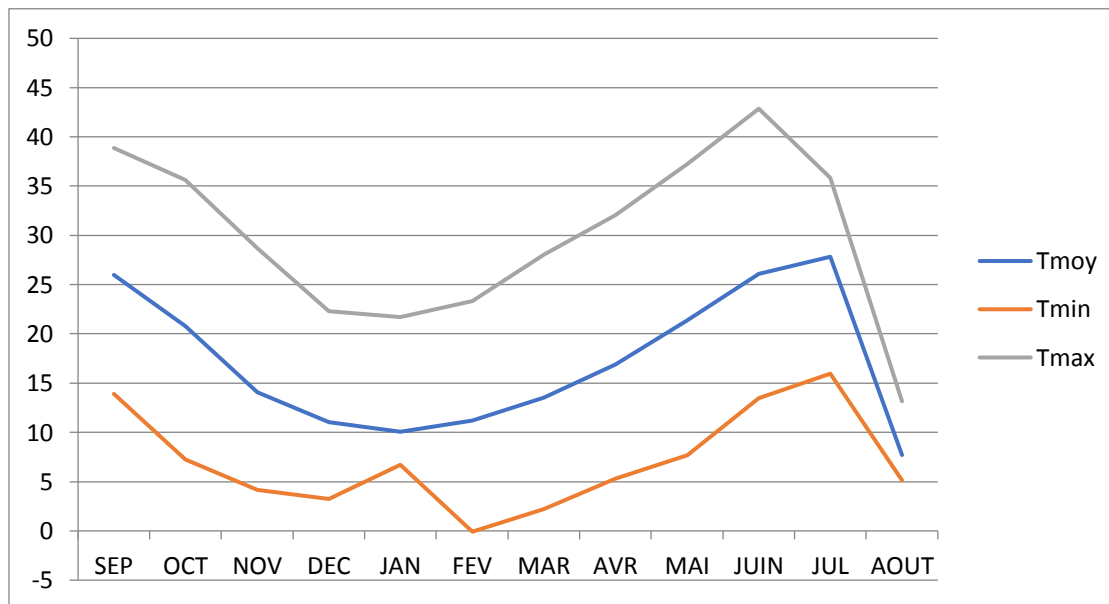


Figure 11. Températures maximales, minimales et moyennes - Station de Harreza

Selon Bagnoles et Gausson(1953), il est dit d'être un mois sec si la pluie mensuelle « totale, exprimée en millimètres est égale ou inférieure à la température moyenne ,exprimée en degrés ou en centigrades » cette formule ($P \leq 2T$) permet de construire des diagrammes ombrothermiques qui traduit la durée de la saison sèche d'après les intersections des deux courbes.

Tableau 4. Température et précipitation à la station Harraza

| Mois | P(mm) | T |
|-----------|-------|-------|
| Septembre | 21.88 | 25.61 |
| Octobre | 19.32 | 20.91 |
| Novembre | 43.3 | 14.68 |
| Décembre | 37.9 | 11.1 |
| Janvier | 55.06 | 10.16 |
| Février | 31.27 | 11.72 |

| | | |
|---------|-------|-------|
| Mars | 54.11 | 13.58 |
| Avril | 35.63 | 17.1 |
| Mai | 18.35 | 21.31 |
| Juin | 12.86 | 26.36 |
| Juillet | 1.31 | 27.5 |
| Aout | 1.15 | 9.83 |

Source ANRH

Le tracé les diagrammes ombrothermiques pour de la stations Harreza des valeurs de température et des données de précipitations pour la zone d'étude.

A partir de ces diagrammes, nous pouvons voir une saison des pluies en octobre et se termine au mois de mai. En outre, la saison de la sécheresse vient de mai jusqu' au mois de septembre. Ces observations estiment que la direction des précipitations est liée à la température de la zone d'étude

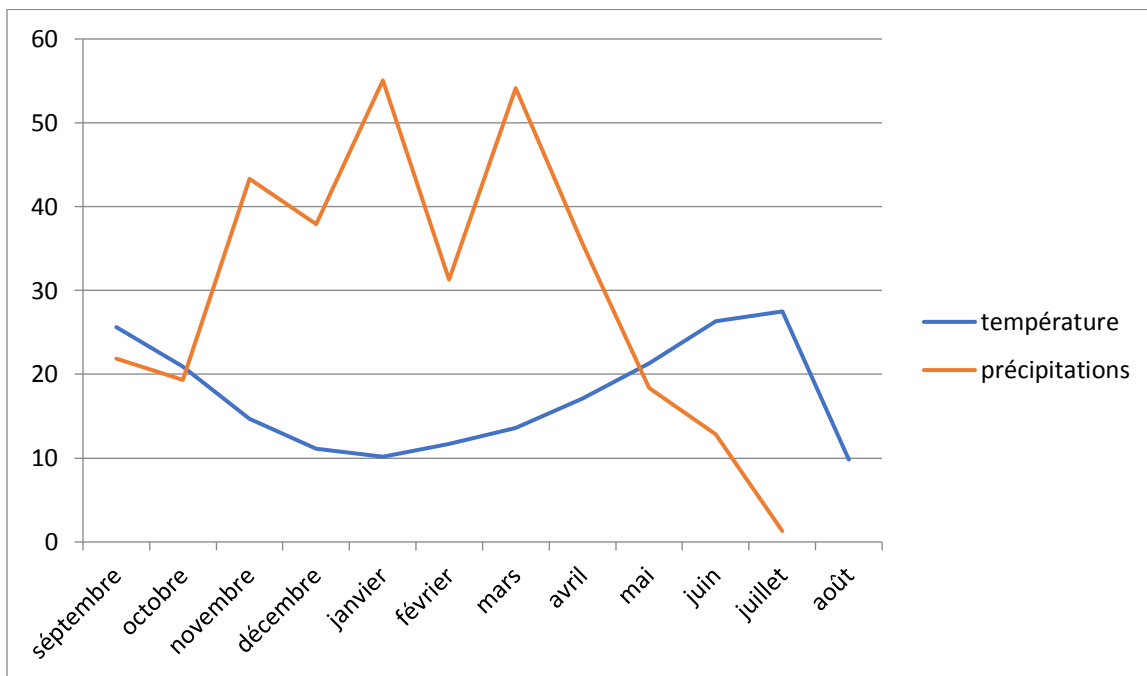


Figure 12. Diagrammes Ombrothermiques - station de Harreza(2013-2021)

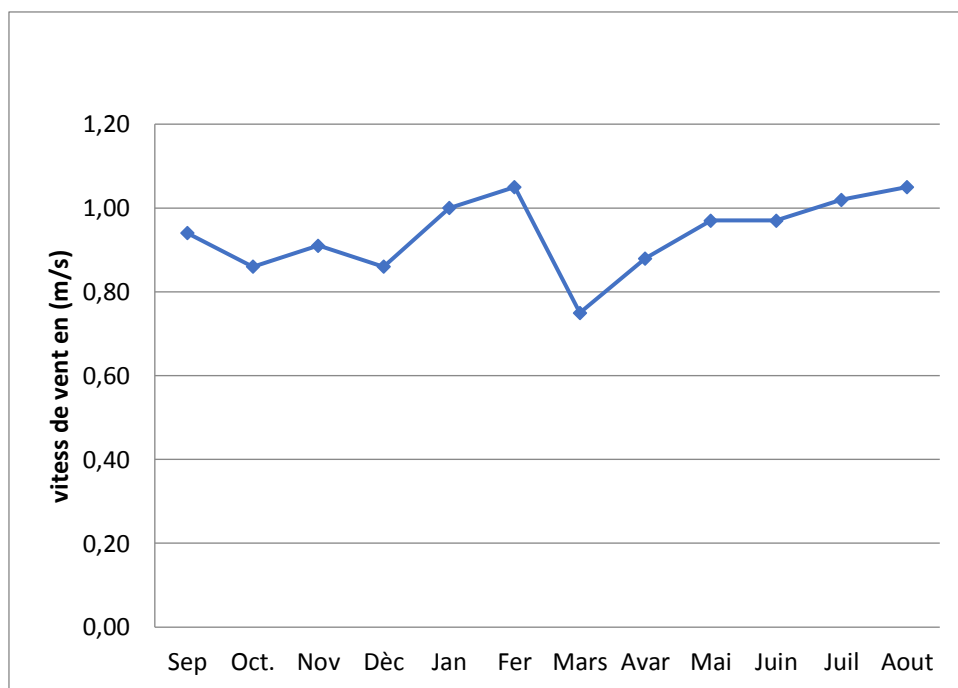
2.4. Vent

Les vents de la région du Hut Cheliff sont très fréquents avec une vitesse qui varie entre 0.7 à 1.1 m/s et des directions selon les saisons, En hiver les vents dominants sont de direction ouest, en été les vents dominants sont de direction est.

Tableau 5. vitesse du vent (2003-2013)

| Mois | Sep | Oct. | Nov | Dèc | Jan | Fer | Mars | Avar | Mai | Juin | Juil | Aout |
|--------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| V(m/s) | 0.94 | 0.86 | 0.91 | 0.86 | 1 | 1.05 | 0.75 | 0.88 | 0.97 | 0.97 | 1.02 | 1.05 |

Source : ANRH



2.5. Evaporation :

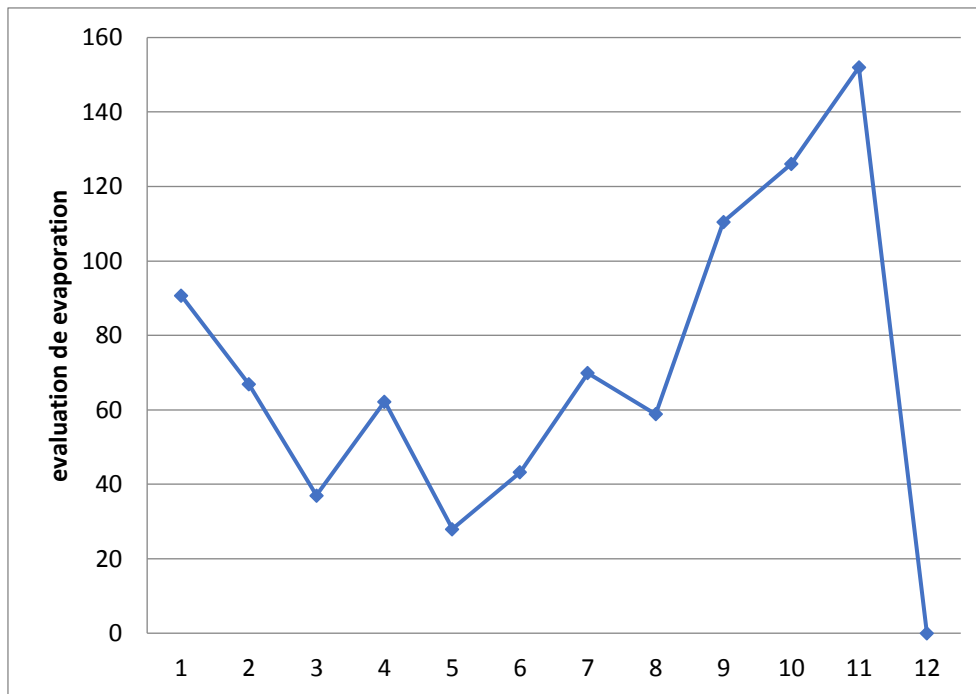
L'évaporation est le processus par lequel de l'eau passe de l'état liquide ou solide, à l'état gazeux par un transfert d'énergie thermique

Les données de l'évaporation enregistrée dans la station de Harreza sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 6. évaporation mensuelle à la station de Harraza (2019-2020)

| Mois | Sep | Oct. | Nov | Dec | jan | Fer | Mars | Avril | Mai | Juin | juil | Aou |
|-------------|------|-------|-----|-------|-----|------|------|-------|-------|--------|------|-----|
| Evaporation | 90.7 | 66.95 | 37 | 62.25 | 28 | 43.2 | 69.9 | 58.85 | 110.5 | 126.05 | 152 | / |

Source : ANRH



2.6. Evapotranspiration

L'évapotranspiration correspond à la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes

L'évapotranspiration potentielle (ETp) constitue la quantité d'eau qui pourrait être évapotranspirée si le sol est constamment saturé en eau. Thornthwaite classe ensuite les climats en humide ou sec selon que la pluie moyenne annuelle est supérieure ou inférieure à l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (Ludovic, 2004)

La formule de Thornthwaite permet d'estimer l'évapotranspiration potentielle à l'échelle mensuelle en un lieu fonction des températures moyennes mensuelles et de la latitude de ce lieu. La formule de Thornthwaite s'écrit :

$$ETp \text{ (mm)} = 16 \times (10 \times T)^a \times k$$

Avec : ETp : Evapotranspiration potentielle (mm)

T : Température moyenne annuelle (°C)

K : coefficient thermique

I : indice thermique annuel

$$a : 0.016I + 0.5$$

$$I = \sum i(m)$$

L'évapotranspiration réelle (ET_p) représente la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée, elle est inférieure ou maximum égale à ETP. Elle se fait à l'aide de plusieurs formules dans notre cas LETR est estimée par la formule de Turc :

$$ETR = P / (0.9 + p^2/L^2)$$

Ou :

P : précipitation moyenne annuelle

T : Température moyenne annuelle

$$L : 300 + 25T + 0.05T^3$$

2.7. Ruissellement

Se produit lorsque la lame d'eau précipitée est supérieure à l'infiltration et que le sol récepteur des eaux météoritiques aura atteint la saturation, il est estimé à partir de la formule Tixeront Berkloff suivante :

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

Avec : R : Ruissellement (mm)

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)

I : Infiltration (mm)

2.8. Infiltration

Après avoir calculé l'évapotranspiration et le ruissellement, on peut déduire l'infiltration selon la formule du bilan hydrologique :

$$P = ETR + R + I \pm \Delta s$$

D'après ces résultats, on constate que la région d'étude présente deux périodes à savoir :

a. la période sèche :

Cette période débute du mois d'avril et s'étale jusqu'au mois d'octobre dans laquelle se présente un déficit agricole, avec un maximum observé en juillet, d'où L ETp est supérieur par rapport aux valeurs des précipitations, ce déficit manifeste essentiellement en été.

b. la période humide :

Cette période débute en novembre jusqu'au mois de mars, durant laquelle on note un excédent pluviométrique, dans cette période commence l'épisode du lessivage des terrains, ce phénomène pose aussi un grand risque de pollution pour l'environnement surtout sur les terrains agricoles recevant de la sur-fertilisation et garde toujours des reliquats d'engrais pouvant après des épisodes de ruissellement migrer vers les profondeurs et contaminer les eaux de la nappe alluviale du Haut Cheliff

3. Contexte pédologique

Selon la carte des sols établie par Boulaine (1957) et celle établie par McDonald et le BNEDER (bureau national d'étude pour le développement rural) (1990), deux grandes divisions des sols peuvent être distinguées :

• Les sols des bordures des plaines

Ces sols sont formés par des associations suivantes :

- Association des sols à carapace calcaires.
- Association des sols décalcifiés et des sols jeunes formés sur les roches perméables et calcaire.
- Association des sols jeunes formés sur les grès et les marnes et de ces roches-mères.
- Association des sols formés sur les calcaires massifs et de ces roches-mères.
- Association des sols formés sur roches-mères siliceuses.
- Association des sols formés sur roches-mères schisteuses.
- Association des sols jeunes des glacis d'accumulation récents.

• Les sols de la plaine proprement dite

D'après la carte de Boulaine (Fig. 2.4), huit classes ont été décrites : Les sols alluviaux non évolués, les sols engorgés par l'eau (appelés aussi sols hydromorphes), les sols calciques, les sols alluviaux évolués, les sols colluviaux et sols alluviaux des affluents mineurs, les sols très évolués (qui sont divisés en sols partiellement décalcifiés et sols décalcifiés lessivés) et mélange de sol.

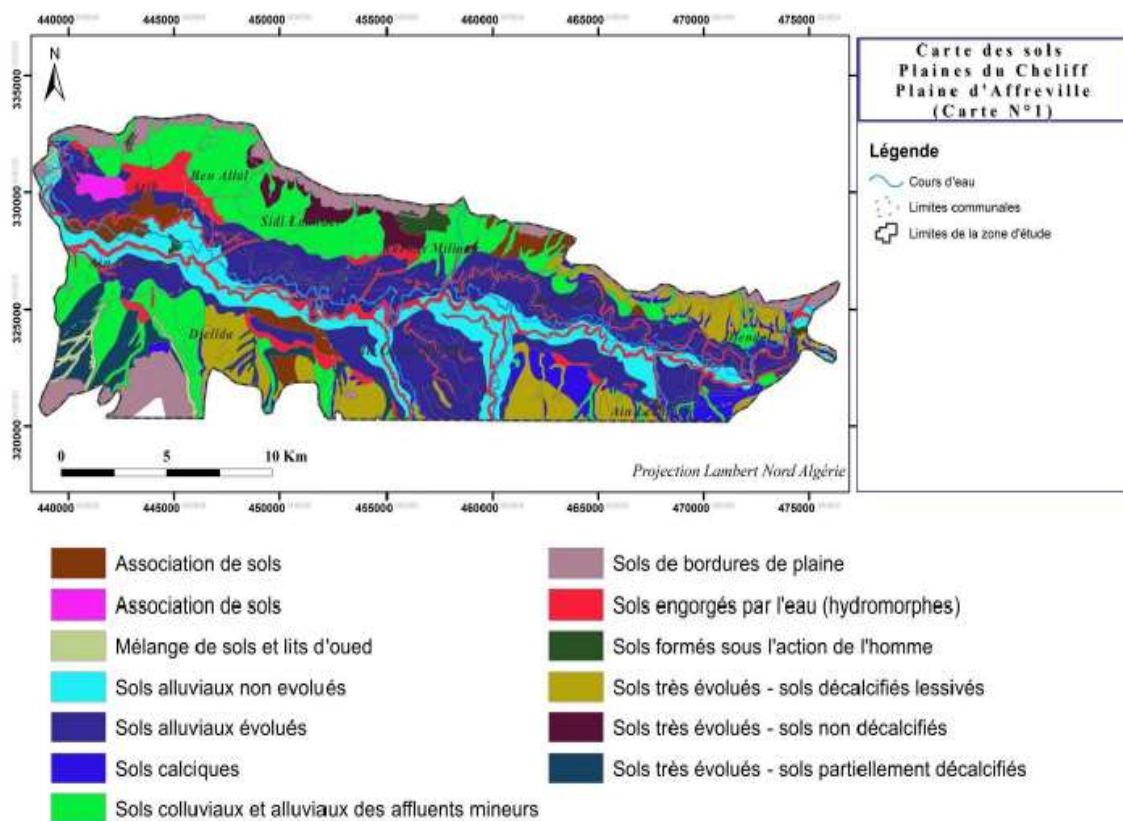


Figure 13. carte pédologique du Haut Cheliff(Boulaine1957,modifiée par Bouhini et Beghdadi,2017)

D'après la carte pédologique de la plaine du Haut Cheliff (Boulaine.1957), la majorité des sols constituant la région sont des sols limoneux argileux. Les sols sableux sont principalement représentés le long d'Oued Cheliff alors que les sols argileux sont rencontrés dans la partie Nord, les sols limoneux sont plus présents aux bordures extrêmes Nord et extrêmes Sud.

4. Contexte géologique

La plaine du haut Chélif est une dépression à remplissage alluvionnaire formée de deux compartiments

La plaine séparée par un seuil dont l'axe passe à côté d'Oued Souffay dans la partie sud-est. Ce seuil dû à une remontée du substratum crétacé traduit l'avancement des terrains crétacés vers le centre de la plaine. A l'ouest de l'Oued Dérideur, le compartiment Est appartient au bassin miocène de Médéa dans lequel les formations grés-conglomératiques du Miocène sont bien développées.

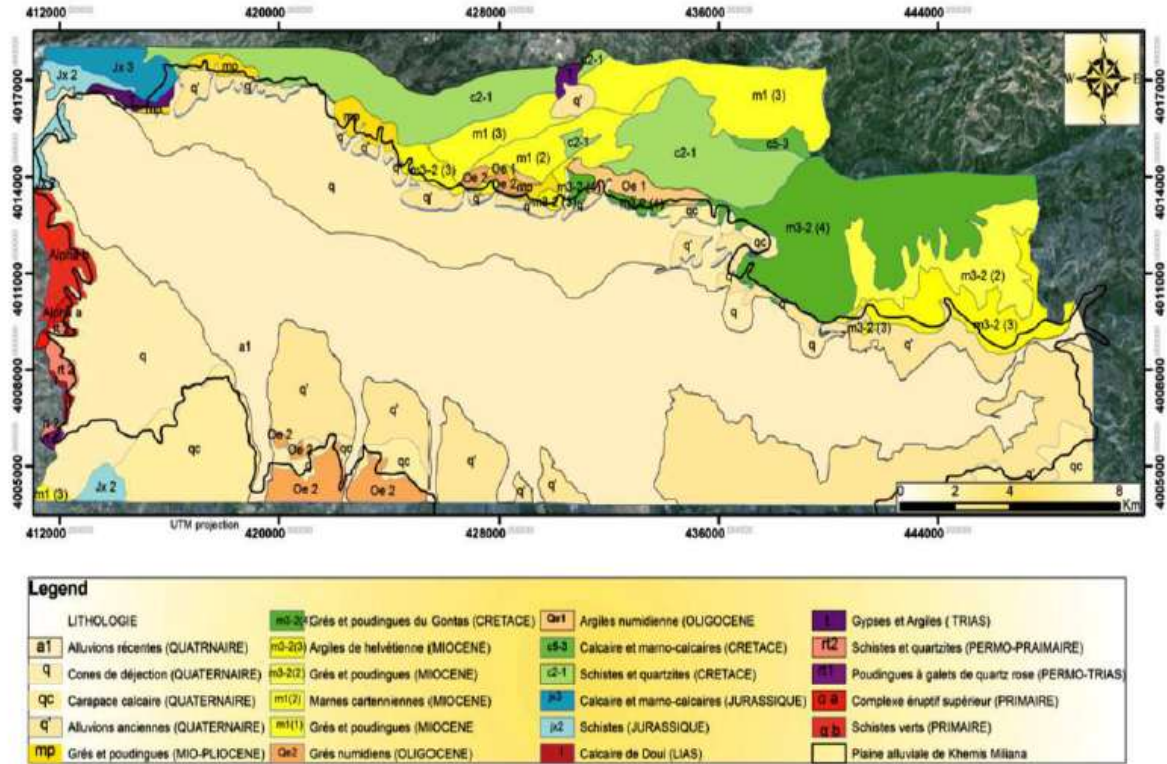


Figure 14. Carte géologique de la plaine du Haut Cheliff (Modifiée par Sahraoui, 2015)

5. Géologique général

Le primaire : le primaire afflue de l'ouest de Doui et au nord de Zeccar d'une épaisseur de 500 m Constitué d'alternances de schistes noirs, graphiteux et des bancs de quartzites (complexe éruptif).

Trias : le triasqui forme un complexe gypso-salin classique comprend également des cargneules et brèches dolomitiques. Les parties les plus rigides du Trias sont surtout représentées par des calcaires dolomitiques afflués essentiellement dans massif de Doui et Zaccar

Le Jurassique : Jurassique dans le massif de Zaccar est représenté par des roches calcaires, dolomitiques et autres roches carbonatées. Toutefois, les formations jurassiques du massif du Doui sont principalement constituées de calcaire dolomitique. L'épaisseur du jurassique peut atteindre 1000 m.

Le Crétacé : le crétacé affleure sur les frontières latérales de la plaine et ils sont principalement représentés par :

- ✓ une série élevée d
- ✓ un schiste gris alternant avec des bancs en quartzite d'Albian – Aptian 1000 m.
- ✓ calcaire jaunâtre du Sénonien

Le Miocène : le Miocène peut atteindre 300 m d'épaisseur, il est constitué de la base au sommet par :

a) **Le Miocène inférieur (Burdigalien) :** le miocène inférieur constitue à la base un conglomérat et termine par des marnes bleues et des argiles d'épaisseur environ 220 m.

b) **Miocène supérieur :** le miocène supérieur est une série qui est représentée de la base au sommet par :

- Des niveaux conglomératiques épais de 1 à 2 m, à ciment sablo-marneux, surmontés par un niveau marneux de couleur bleu, d'une épaisseur d'environ 50 m.
- Des marnes blanches alternant avec quelques bancs siliceux couronnés par un dépôt de grès et de sable, d'une épaisseur de 100 m environ.
- Une formation marneuse de couleur bleue, présentant un faciès argileux, parfois gypseux d'environ 90 m d'épaisseur

Pliocène : on distingue un Pliocène continental et un Pliocène marin :

a) **Le Pliocène Inférieur (Pliocène marin) :** il est représenté par une série marneuse qui débute par des niveaux détritiques gréseux ou sableux et parfois conglomératiques, ensuite on a un passage progressif dans la partie supérieure à des marnes sableuses et sables argileux, formant tous les termes de passage aux grès astiens. Les grès, avec une épaisseur d'une centaine de mètres, constituent une bande continue depuis l'Ouest d'El Abadia vers le versant sud du Dahra

b) **L'Astien :** est représenté par une série marine finement sableuse ou gréseuse de couleur jaune fauve. Les grès sont souvent à ciment calcaire et passent localement à des calcaires gréseux.

c) **Le Pliocène supérieur (Villafranchien) :** le Pliocène continental est formé de conglomérats à éléments gréseux à grésocalcaires et des sables, non consolidés. Les dépôts sableux rouges à stratifications entrecroisées qui succèdent aux conglomérats précédents appartiennent au Villafranchien. Ces dépôts reposent le plus souvent sur des limons grés. Parfois les conglomérats du Pliocène supérieur n'existent pas, et les formations rouges du Villafranchien se trouvent alors en contact avec des grès astiens ; d'ailleurs, au Sud du Cheliff sur la bordure de l'Ouarsenis, le Pliocène disparaît complètement. A ce niveau, le Quaternaire recouvre directement les grès du Miocène.

Quaternaire : Les dépôts quaternaires sont continentaux. On distingue un Quaternaire ancien et un Quaternaire récent.

- **Le Quaternaire ancien :** il est formé de deux niveau représente de bas en haut par des argiles graveleuse brunes généralement mieux cimentées que les terrains supérieurs terrassées dominant plus de 20 mètres.
- **Le Quaternaire récent :** sont formés de galets, de gravier, d'argile et de limon ayant de 10 a 20 mètre d'épaisseur recouverts d'un sol organique il sont rencontres de pied de massif de Zaccar et au sud-ouest de Doui

6. Contexte hydrogéologique

La plaine alluviale du Haut Cheliff est un remplissage alluvionnaire d'âge Mio-Plio-Quaternaire, représenté par des dépôts alluvionnaires comme du quaternaire et des grés de Mio- Plio- Quaternaire d'une épaisseur de 50 m à 100 m au niveau d'Oued Cheliff et d'une résistivité de 100 ohm. m. Les marnes constituent le substratum de cet horizon aquifère.

L'alimentation de cette nappe est assurée par les eaux d'infiltration des :

- Précipitation tombée sur la plaine.
- Eaux de ruissellement des Oueds (Deurdeur, Cheliff, Souffay, Boutane).
- Eaux d'irrigation excédentaire.

Tableau 7. Comportement hydrogéologique des déférentes formations de la plaine du Haut Cheliff (Ikhlef, 2005)

| Formations | Epaisseur (m) | Age géologique | Comportement hydrogéologique | Type de nappe |
|---------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------------|---|
| Limons | 6-20 | Quaternaire | Imperméable | Peuvent rendre la nappe des alluvions captive |
| Alluvions Grossière | 50-150 | Quaternaire | Perméable (Porosité d'interstices) | Captive a semi - captive (parfois libre) |
| Marnes | 200 | Pliocène | Imperméable | / |
| Grés et Poudings | 100-200 | Miocène | Perméable (Porosité d'interstices) | Nappe captive à semi-captive |

6.1. Les formations aquifères

La plaine alluviale du Haut Cheliff est un remplissage alluvionnaire d'âge mio-plio-quadernaire, représenté par des dépôts alluvionnaires du Quaternaire et des grés et poudingues du Mio-Pliocène d'une épaisseur de 50 à 100 m au niveau de l'oued Cheliff. Les marnes constituent le substratum de cet aquifère. L'alimentation de cette nappe est assurée par infiltration des :

- Précipitations tombant sur la plaine.
- Eaux de ruissellement des oueds (Cheliff, Deurdeur, Harreza, etc ...)
- Eaux d'irrigation excédentaires.

Les différentes formations à intérêt hydrogéologique sont représentées essentiellement par :

- **Les calcaires jurassiques.** Les calcaires jurassiques constituent un important réservoir qui se particularise par la présence des fissures représentatives d'un milieu approprié pour le stockage de l'eau souterraine. Toutefois, la densité de répartition mal connue de ses fissures pose d'énormes problèmes pour l'implantation des puits. Au massif de Zaccar, les calcaires n'affleurent que dans les parties élevées, on les rencontre au-dessous de la cote 750m
- **Les grés mio-pliocènes.** Ils sont observés à l'Est de la plaine sur Djebel Gantas, les grés pliocènes peuvent atteindre 200m d'épaisseur au Nord, en rive gauche ils sont inexistantes puisque les alluvions quaternaires sont discordantes sur le Mio-cène marneux
- **Les alluvions quaternaires.** La nappe alluvionnaire constitue le plus important aquifère, elle est caractérisée essentiellement par des alluvions grossières et galets au centre de la vallée avec une épaisseur de 50 et 145m, une couche d'argile et de limon recouvre les alluvions grossières au Sud-Ouest avec une épaisseur de 7 et 20m. Cette nappe alluvionnaire est disposée sur un substratum d'argile parfois graveleux ou de marnes . Nous signalons que les deux aquifères (alluvions quaternaires et gés miocènes) sont séparés par un niveau imperméable.

6.2. Etude Piézométrique

Dans le but d'étudier le comportement hydrodynamique de l'aquifère quaternaire du haut Cheliff, nous avons exploité des mesures piézométriques de l'ANRH effectuées en 2016.

L'inventaire réalisé par l'ANRH recense un réseau moyennement dense réparti sur toute la plaine du Haut Chélif. Il comporte 16 puits et 02 piézomètres.

Le suivi de l'évolution piézométrique de la nappe dans le temps et dans l'espace permet de reconnaître d'une part, la direction générale de l'écoulement des eaux souterraines, les zones d'alimentation et de dépressions, et permet d'avoir aussi une idée sur le temps de séjour des eaux d'infiltration dans la couche aquifère.

L'analyse de la carte piézométrique de la période des hautes eaux (Avril 2016) montre que la circulation des eaux souterraines dans la nappe alluviale de Khemis-Miliana se fait d'Est vers l'Ouest. Les courbes hydro-isohypses se resserrent à l'amont avec un gradient hydraulique important de l'ordre de 0,09 près de la ville de Djendel due à la remontée du substratum et montre aussi une alimentation de cette nappe dans cette zone. Alors que dans la partie sud-est, dans la région de Djelida, un gradient hydraulique de l'ordre de 0,08 a été observé, il est expliqué par la remontée du substratum et de faible épaisseur de l'aquifère. Dans la partie centrale les courbes isopièzes sont espacées avec un gradient hydraulique de 0,008 il est expliqué par la faible pente du substratum et aussi par l'importante épaisseur de l'aquifère. Cette carte, ne montre pas une nette relation entre les deux plans d'eau (souterraine et de surface).

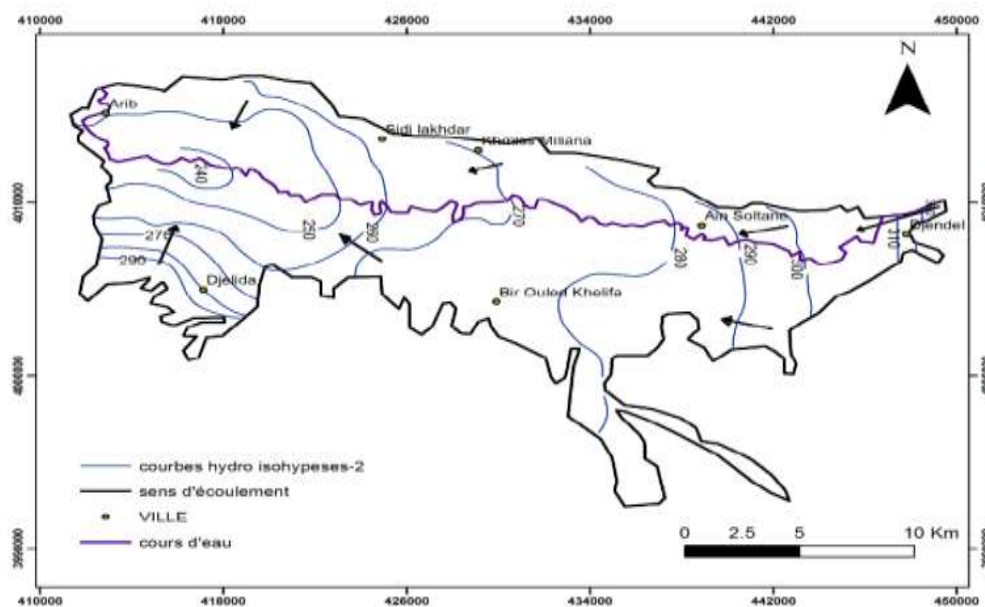


Figure 15. Carte piézométrique de la nappe alluviale du Haut-Chélif (Période des hautes eaux, Avril 2016)

La carte piézométrique de la période des basses eaux (Octobre 2016) montre les mêmes conclusions que celle faite sur la carte précédente (période des hautes eaux), avec la même morphologie. Néanmoins, une diminution de niveau d'eau dans l'ensemble de la nappe a été observée, et cela est due à l'influence de l'exploitation qui s'accompagne avec l'absence recharge durant de l'été, de Mai à Septembre.

7. Contexte Hydrogéochimique

L'analyse Physico-chimique est réalisée par les méthodes classiques. Les études hydrogéochimiques basées sur les analyses réalisées par l'ANRH ont montré que la composition chimique des eaux souterraines de la région de Khemis Miliana ont une tendance calcique pour les cations, alors que les anions montrent une dominance Chloruré. Le diagramme global fait ressortir les faciès : Chlorurée et sulfatée calcique et sodique en plus de Bicarbonaté Calcique

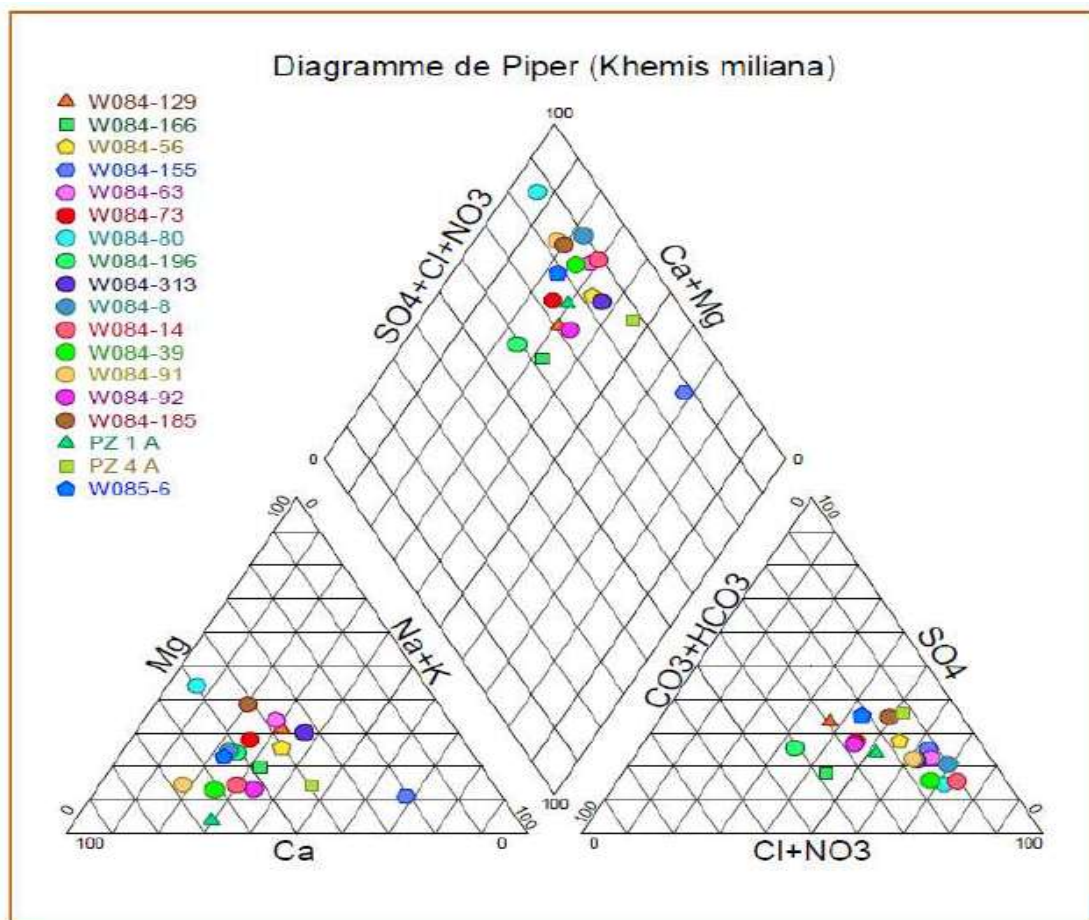


Figure 16. Diagrammes de Piper

Chapitre III

Matériel et méthodes

Après avoir présenté une synthèse bibliographique des différentes notions et approches utilisées dans la détermination des périmètres de protection ainsi que les caractéristiques de la plaine du Haut Cheliff, dans ce chapitre nous proposons une comparaison des méthodes de délimitation des périmètres de protection appliquées à quelques forages de la plaine.

Ce travail sera scindé en deux parties : La première partie dans laquelle nous avons choisi les méthodes pour délimitation de périmètre de protection celui de prédilection et justifié la raison de notre choix. Une seconde partie dans laquelle nous avons sélectionné quelques forages appartenant au champ captant de la nappe alluviale du Haut Cheliff en vue de délimiter les périmètres de protection immédiate, rapprochée et éloignée

1. Méthodologie de travail

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.

Ainsi, parmi les nombreuses méthodes exposées dans le premier chapitre nous avons sélectionné les méthodes de Wissling, du cylindre et de Rehse car elles sont les plus utilisées dans le monde, les données nécessaires à leur application sont disponibles et aussi pour la simplicité d'utilisation.

Donc les formules mathématiques en appliquant repose sur les données suivantes : l'épaisseur de l'aquifère, la perméabilité de l'aquifère, le gradient hydraulique (i), la porosité efficace et le débit du captage (Q), ces valeurs elle nécessaire pour calcules les dimensions de zone de protection.

Les méthodes ont été appliquées à trois captages sélectionnées sur la base des données disponibles (débit, log de forage, ..etc) mais également sur la base de travaux antérieurs impliquant la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine du Haut Cheliff. (Bouhini & Beghdadi, 2017). Nous avons sélectionné 03 captages pour lesquels nous avons appliqué les méthodes pour délimiter les périmètres de protection rapprochée et éloignée. La sélection de ces points s'est faite selon les conditions suivantes :

- Le captage est situé dans une zone à vulnérabilité élevée ou très élevée ;
- Le captage se situe dans une zone à forte contamination par les nitrates (> 50 mg/l) ;
- L'année de mise en service du captage ;
- Captage destiné à l'alimentation en eau potable

Le premier captage C1 est situé dans la commune de Arib, la vulnérabilité dans cette région est faible. Le deuxième forage C2 est situé dans la commune de Ben Allal dans une zone à vulnérabilité moyenne. Enfin, le dernier forage C3 est situé dans la commune de Djendel dans une zone de vulnérabilité très élevée et où les concentrations en nitrates dans les eaux souterraines dépassent les 75mg/L (figure 16)

2. Méthode de Wisling

A travers une formule mathématique, délimiter les isochrones nécessaires pour la définition des périmètres de protection. L'application de la méthode repose sur les données suivantes : l'épaisseur de l'aquifère (b), la perméabilité de l'aquifère (K), le gradient hydraulique (i), la porosité efficace (w) et le débit du captage (Q)

L'application de cette méthode se fait en deux étapes :

- Premièrement, on détermine la zone d'appel par l'utilisation de formules mathématiques. :

Pour une nappe libre, la largeur du front d'appel (B) est donnée par la relation suivante

$$B = \frac{Q}{k \cdot b \cdot i} [\text{m}].$$

La largeur du front d'appel à hauteur du captage (**B'**) correspond à la valeur de :

$$B' = \frac{Q}{2.k.b.i} \text{ (m)}$$

Le rayon d'appel (**X0**) est calculé comme suit :

$$X0 = \frac{Q}{2.\pi.k.b.i} \text{ (m)}$$

D'autre part, la vitesse effective U est calculée par l'équation suivante :

$$U = \frac{K.i}{w} \text{ [m/s]}$$

Une fois la zone d'appel déterminée, on cherche sur la direction d'écoulement la distance correspondant à un temps de transfert souhaité, par exemple 10 jours (c'est-à-dire l'isochrone 10 jours) ...etc. Cette distance est calculée par les formules suivantes

$$S_0 = \frac{L \pm \sqrt{L(L + 8.X0)}}{2}$$

$$S_u = \frac{-L \pm \sqrt{L(L + 8.X0)}}{2}$$

Avec :

S₀ : La distance en amont du captage depuis le puits jusqu'à la distance correspondant au temps de transfert t souhaité en m.

S_u : La distance en aval du captage, sur l'axe d'écoulement depuis le puits jusqu'à la distance correspondant au temps t souhaité

$$L = U \cdot t$$

Avec L : Correspond au produit de la vitesse effective U par le temps de transfert t

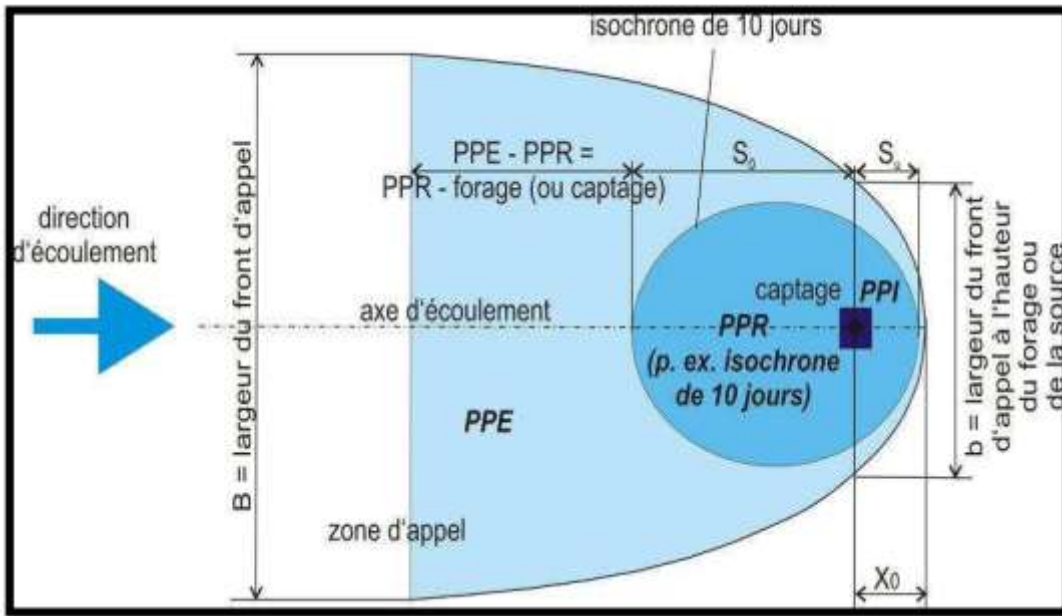


Figure 17. Dimensionnement des périmètres de protection selon la méthode de Wyssling

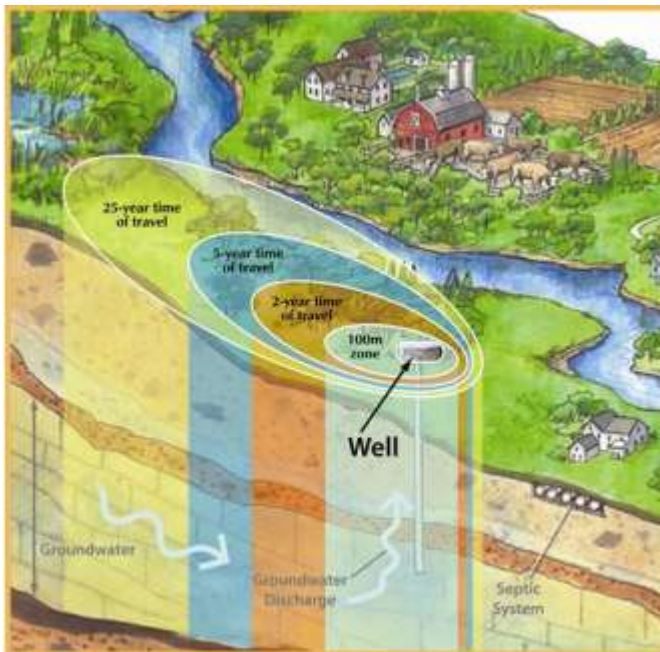


Figure 18. Exemple d'isochrones à 2, 5 et 25 ans de temps de transfert (Source : Google image)

Pour le dimensionnement du périmètre de protection immédiate (PPI), nous avons retenu la zone pour laquelle un polluant met 50jrs pour atteindre le captage (isochrone à 50 jour). Le dimensionnement du périmètre de protection rapprochée (PPR) repose sur l'isochrone à 100 jours comme référence (temps estimé nécessaire pour assurer une épuration microbiologique naturelle). Compte tenu du nombre important des forages dans la plaine et la

proximité de ceux-ci, La délimitation du périmètre de protection éloignée (PPE) a été établie pour l'ensemble du champ captant de plaine, et non pour chaque captage individuellement. Cette délimitation s'appuie principalement sur les limites de l'aire d'alimentation de la nappe

3. Méthode du 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.

Pour calculer le rayon de cercle

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

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)

4. Méthode de Rehse

Nous allons estimer le pouvoir épurateur du sol lors du transfert d'un polluant de la surface du sol jusqu'à l'aquifère et par écoulement horizontal dans l'aquifère jusqu'au captage (forage ou point de captage). Pour cela nous allons utiliser la méthode empirique de Rehse. . et pour appliquée cette méthode calculer pouvoir épurateur totalité Mx :

$I = 1/H$ où H = épaisseur en mètre sur la tranche vertical

$I = 1/L$ où L = longueur en mètre du trajet horizontal dans la nappe

$$M_x = M_d + M_r$$

Mx : pouvoir épurateur sur la totalité du transfert

Md : pouvoir épurateur sur le trajet vertical

Mr : pouvoir épurateur sur la distance horizontale

$$Md = h_1 I_1 + h_2 I_2 + h_3 I_3 \dots h_n I_n$$

- Si $1 > M_x$, cela signifie que l'épuration est totale dans les couches de couverture. Selon Rehse, la délimitation d'un périmètre rapprochée n'est pas nécessaire dans ce cas.
- Si $1 < M_x$, la dépollution n'est pas totale. Elle doit se poursuivre dans la roche aquifère lors du transfert horizontal.

$$L = Mr/I_a$$

Avec I_a = index correspondant aux matériaux aquifères

L correspond dans cas à la limite de la zone de protection rapprochée. S'il n'y a pas de couverture, toute l'épuration doit se faire horizontalement
Mr doit être égal à 1, et on aura alors : $L=1/I_a$

Chapitre IV

Résultats et

discussion

Après avoir développé les détails des méthodes utilisées pour la délimitation des périmètres de protection dans la plaine du Haut Cheliff, le présent chapitre expose les résultats obtenus pour chaque méthode et chaque captage ainsi qu'une discussion générale.

1. Détermination les isochrones par la méthode Wisling

1.1. Délimitation de zone d'appel

Par l'application numérique dans les relations (1) ; (2) ; (3) ; (4) nous avons obtenu les résultats portés dans le tableau 09

Tableau 8. Résultats de délimitation de zone d'appel

1.2. Délimitation des isochrones

Par l'application numérique avec les relations (5) et (6), nous avons obtenu les résultats suivants pour les isochrones à 50 jrs (tableau 10), à 100 jours (tableau 11) et et a 365 jours (tableau 12). La délimitation des isochrones s'est faite à l'aide du logiciel Zappel (Figures 20, 21 et 22).

Tableau 9. Calcul des isochrones à 50 jours

| T=50 jrs | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|
| | C1 | C2 | C3 |
| $s_0 = L + \sqrt{L(L+8x_0)}/2$ | 55.10 | 65.59 | 352.91 |
| $S_u = -L + \sqrt{L(L+8x_0)}/2$ | 87.36 | 19.51 | 237.71 |

Tableau 10. Calcul des isochrones à 100 jours

| T=100 jrs | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|
| | F1 | F2 | F3 |
| s0= $L + \sqrt{L(L+8x0)}/2$ | 71.21 | 85.38 | 144.24 |
| Su= $-L + \sqrt{L(L+8x0)}/2$ | 25.13 | 39.30 | 310.30 |

Tableau 11. Calcul des isochrones à 365 jours

| T=365 jrs | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|
| | F1 | F2 | F3 |
| s0= $L + \sqrt{L(L+8x0)}/2$ | 200.73 | 223.09 | 1308.85 |
| Su= $-L + \sqrt{L(L+8x0)}/2$ | 32.54 | 54.90 | 467.89 |

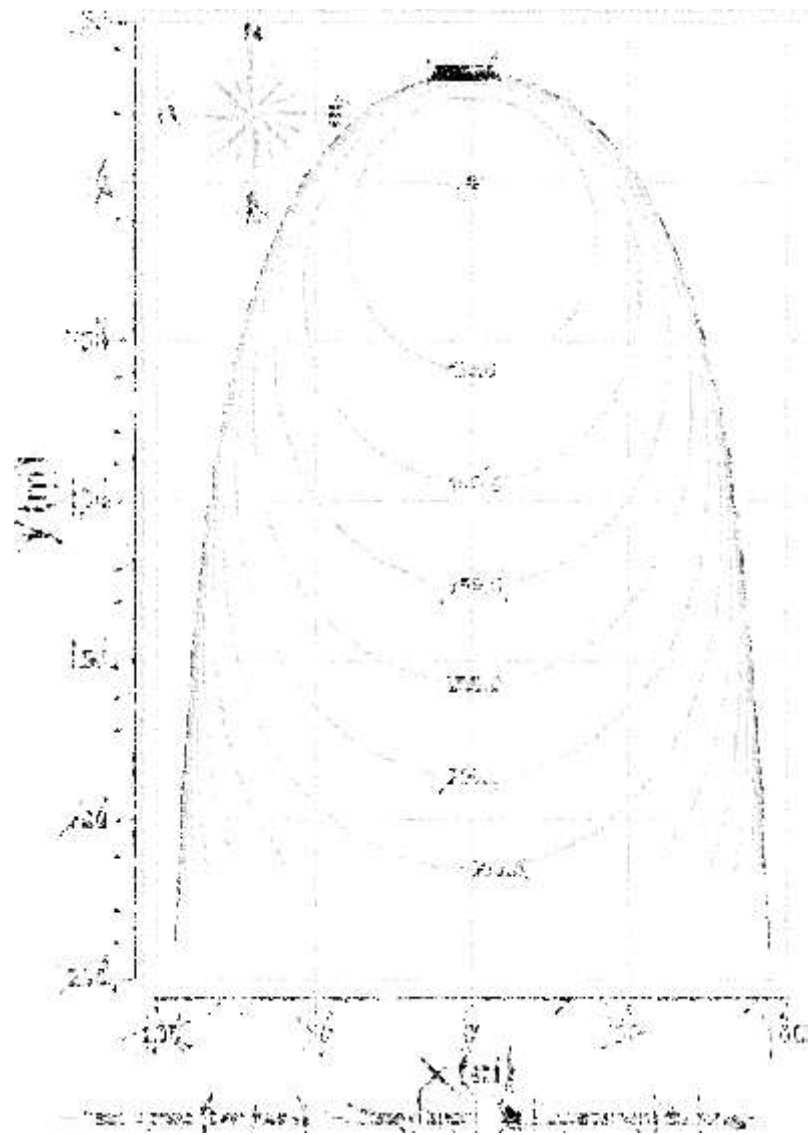


Figure 19. Délimitation des isochrones pour le captage C1

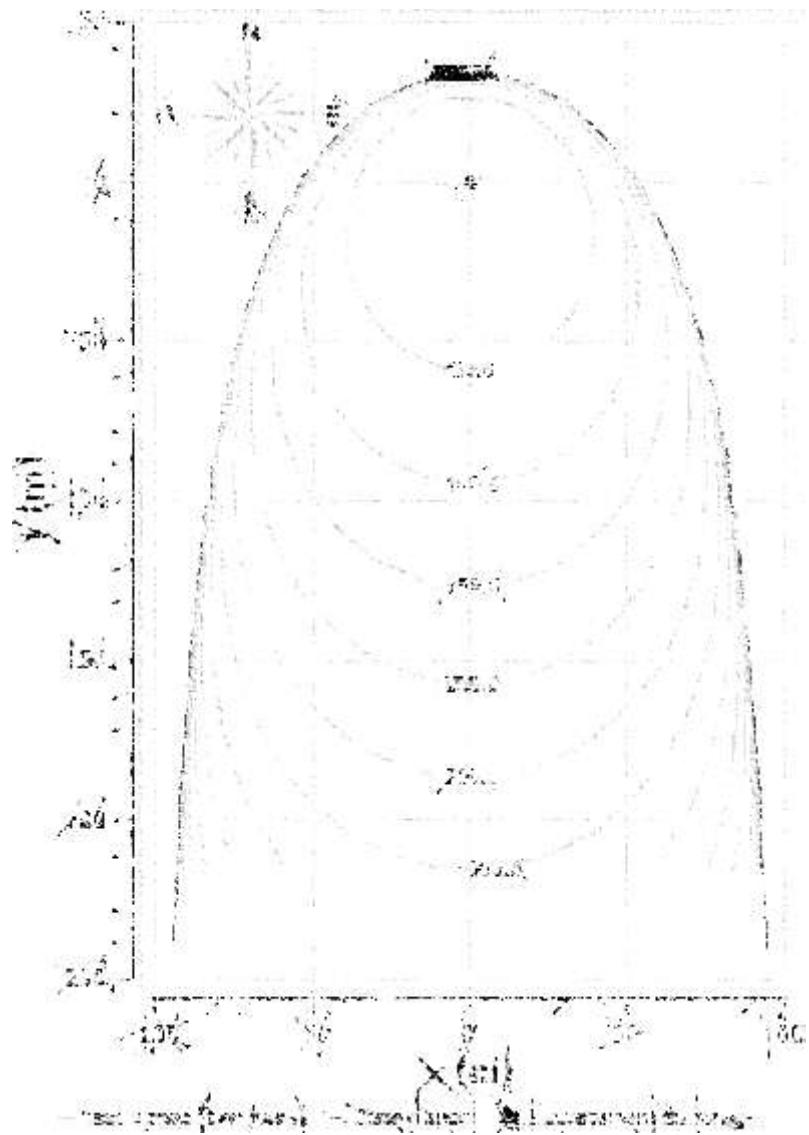


Figure 20. Délimitation des isochrones pour le captage C2

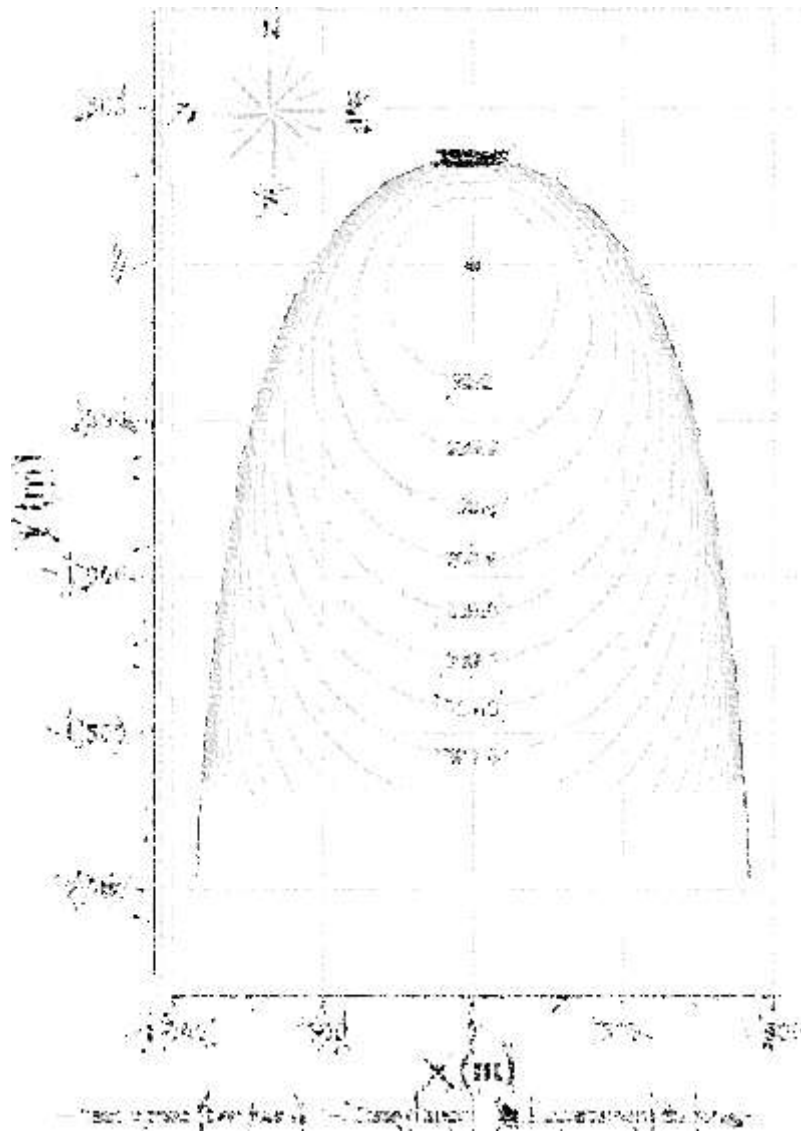


Figure 21. Délimitation des isochrones pour le captage C3

2. Détermination des rayons des périmètres de protection par la méthode du cylindre

Les rayons des PDP déterminés à partir de la méthode Cylindre en utilisant la relation

suivante :

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

Les tableaux suivants (13, 14 et 15) présentent les résultats obtenus pour les temps de transfert de 50, 100 et 365 jrs

Tableau 12. Méthode du cylindre (t=50jrs)

| | Temps de Transfert (jrs) | Rayon (m) | Superficies (ha) |
|----|--------------------------|-----------|------------------|
| C1 | 50 | 29.91 | 0.27 |
| C2 | 50 | 40.96 | 0.53 |
| C3 | 50 | 289.63 | 26.34 |

Tableau 13. Méthode du cylindre (t=100 jrs)

| | Temps de Transfert (jrs) | Rayon (m) | Superficies (ha) |
|----|--------------------------|-----------|------------------|
| C1 | 100 | 42.30 | 0.56 |
| C2 | 100 | 57.92 | 1.05 |
| C3 | 100 | 409.61 | 52.68 |

Tableau 14. Méthode du cylindre (t=365 jrs)

| | Temps de Transfers (jrs) | Rayon (m) | Superficies (ha) |
|----|--------------------------|-----------|------------------|
| C1 | 365 | 80.82 | 2.05 |
| C2 | 365 | 110.67 | 3.84 |
| C3 | 365 | 782.55 | 192.28 |

Les résultats montrent que le rayon minimal est 29. 91 m pour le captage C1 avec le temps de transfert de 50jrs et le rayon maximal est 782.55 pour le captage C3 avec le temps de transfert de 365 jrs.

3. Détermination le pouvoir épurateur par la méthode Rehse

Pour calculée le pouvoir épurateur selon la methode de Rehse :

$$M_x = M_d + M_r$$

Avec M_x : pouvoir épurateur sur la totalité du transfert ;

M_d : pouvoir épurateur sur le trajet vertical

M_r : pouvoir épurateur sur la distance horizontale

Pour procéder à la détermination du pouvoir épurateur suivant la méthode de Rehse, nous avons utilisé les logs des forages pour chacun des captages.

1^{er} Captage

Tableau 15. Pouvoir épurateur dans la couverture (sol + zone non saturée) – C1

| <i>M</i> | <i>Description des matériaux</i> | <i>H(m)</i> | <i>I=I/H</i> |
|----------|----------------------------------|-------------|--------------|
| 1 | Gravier argileux | 47 | 0.02 |
| 2 | Gravier argileux | 79 | 0.01 |
| 3 | Gravier | 85 | 0.01 |
| 4 | Gravier | 100 | 0.01 |
| 5 | Argile graveleuse | 106 | 0.009 |
| 6 | Argile | 120 | 0.008 |

$$M_x = M_d + M_r$$

$$M_d = 4.63$$

$M_d \geq 1$, cela signifie que **l'épuration est totale** dans les couches de couverture, et que la délimitation d'un périmètre de protection rapproché n'est pas nécessaire selon Rehse

$$M_r = 1 - M_d$$

$$M_r = 1 - 4.63$$

$$M_r = -3.63$$

$M_x = 1$ L'épuration est complète

2^{ème} captage

Tableau 16. Pouvoir épurateur dans la couverture (sol + zone non saturée) – C2

| M | Description des matériaux | H(m) | I=1/H |
|---|---------------------------|------|-------|
| 1 | Gravier argileux | 47 | 0.021 |
| 2 | Gravier argileux | 79 | 0.012 |
| 3 | Gravier | 85 | 0.011 |
| 4 | Gravier | 100 | 0.01 |
| 5 | Argile graveleuse | 106 | 0.009 |
| 6 | Argile | 120 | 0.008 |

$$M_d = 14.78$$

$M_d \geq 1$, cela signifie que l'épuration est totale dans les couches de couverture, et que la délimitation d'un périmètre de protection rapproché n'est pas nécessaire selon Rehse

✓ $M_r = 1 - M_d$

$$M_r = 1 - 14.78$$

$$M_r = -13.78$$

3^{ème} captage

Tableau 17. Pouvoir épurateur dans la couverture (sol + zone non saturée) – C3

| M | Description des matériaux | H(m) | I=1/H |
|---|--|------|-------|
| 1 | Terre végétale | 8 | 0.12 |
| 2 | Argile gris avec gravier | 24 | 0.04 |
| 3 | Gres calcaire avec des passages argileux | 40 | 0.02 |

| | | | |
|---|----------------------------------|------|------|
| 4 | Argile jaune | 47 | 0.02 |
| 5 | Gravier a element calcaire jaune | 49.5 | 0.02 |
| 6 | Argile jaune | 53.5 | 0.01 |

AN :

$$M_d = 53.71$$

$M_d \geq 1$, cela signifie que l'épuration est totale dans les couches de couverture, et que la délimitation d'un périmètre de protection rapproché n'est pas nécessaire selon Rehse

✓ $M_r = 1 - M_d$

$M_x = 1$ L'épuration est complète

Discussion générale

La détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage des eaux souterraines de la nappe alluviale du haut Cheliff a été réalisée à partir de 3 méthodes basées sur des critères hydrogéologiques et hydrodynamiques en utilisant un logiciel spécifique.

Les méthodes utilisées pour la protection rapprochée sont : cylindre, Wyssling , cependant on a utilisé un méthodes pour la détermination de la protection éloignée (Rehse).

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 (50,100,365 jours).

Les rayons des périmètres de protection rapprochée varient respectivement de 23,04m pour deux les forage 1et 2 Pour les périmètres de protection éloignée l'épuration est complète égale (1) pour les 3 forage en méthode Rehse. 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 de la nappe alluviale du Haut Cheliff. Ces périmètres vont favoriser l'isolement des ouvrages et garantir une meilleure protection contre la pollution de ceux-ci.

Les deux méthode utilisées pour la délimitation des périmètre de protection rapprochée sont basées sur des critères différents On observe que la méthode de wissling est

beaucoup trop de rayon minimale 23,04m en forage1 et 2 et la rayon maximale 115,2 m en forage 3 , cependant ce périmètre donne une et bonne estimation de la zone à protéger donc nous avons vu dans tous les cas étudiés la méthode wissling représente de façon réaliste les périmètre de protection

Conclusion et recommandations

Conclusion générale et recommandations

Les concepts de protection des eaux souterraines fondés sur les temps de transit n'empêchent pas toujours l'arrivée de ces substances à capturer. En revanche, dans le domaine de l'agriculture, les bonnes pratiques agricoles ne suffisent généralement pas à réduire suffisamment la concentration de polluants agricoles dans les eaux souterraines. Le but de ces zones est donc de définir les secteurs les plus vulnérables, en vue d'appliquer autant que possible des actions de protection. Ceux-ci peuvent être proposés pour l'assainissement des eaux déjà polluées, mais aussi pour prévenir de futures contaminations. Ils ne sont pas déterminés sur la base du flux de polluant à un moment donné, mais sur la circulation de l'eau. Ceux-ci conditionnent le transport de la majorité des polluants et ont un caractère durable dans le temps, ce qui permet de proposer des actions à long terme.

Ce travail s'est intéressé à la délimitation des périmètres de protection des captages d'eau souterraines et ce par l'utilisation de trois méthodes : Wyssling, Rehse et la méthode du cylindre.

La méthode de Wyssling appliquée en considérant les trois temps de transferts (50, 100 et 365 jrs) couvre des zones respectives de 168,19 ha pour les captages C1 et C2 et 841 ha pour le captage C3 situé dans la région de Djendel.

La méthode du cylindre appliquée avec les mêmes temps de transferts (50, 100 et 365 jrs) indique des rayons maximaux de 80.82, 110.67 et 782.55m correspondant aux superficies de 2.05, 3.84 et 192.28ha respectivement. La méthode de Rehse indique une épuration complète pour les 3 captages sélectionnés.

A la lumière de ces résultats, nous proposons les recommandations suivantes :

- Respect des activités sauf celles en liaison directe avec l'exploitation du captage a l'intérieur des périmètres de protection,
- Interdire toutes activités industrielles Transport de matière dangereuse
- Interdiction de l'installation des stations de carburants, produits chimiques ou de substances toxiques
- 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.

Références
Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Attafi S (2018) Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution à l'aide d'une méthode spécifique SI : application sur l'aquifère alluvial du Haut Cheliff

Bensaoula F, Adjim H, (2003). Les périmètres de protection des eaux souterraines et les difficultés d'application du code des eaux cas de la wilaya de Tlemcen (Nord –ouest algérienne)

Boukerra A, Otmani H,(2020). Analyse de la variation spatio-temporelle des nitrates à l'échelle de la nappe du haut Cheliff cas de la plaine de Khemis-Miliana

Bouzada N, (2005) Caractérisation géochimiques dans les plaines du Cheliff, thèse de doctorat, université de Chlef

DEKKICHE I, MEZAOUR A, (2019). Etude comparative de trois méthodes pour la cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère alluviale à la pollution, plaine alluviale de Khemis Miliana » Mémoire de master Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana

DJABOUTOU A. (2013) Apport des méthodes analytiques dans la détermination des périmètres de protection autour des ouvrages de captage d'eau souterraine : Application au champ de captage d'Ouèdo

Cherifi A. et Bensmain Y. (2017). Contribution à l'étude de la protection des eaux souterraines dans le groupement urbain de Tlemcen

Fellah H.S (2012). Cartographie de vulnérabilité et du risque de pollution des eaux souterraines dans le groupement urbain de Tlemcen)

Gilli, E., Mangan, C., & Mudry, J. (2012). Hydrogéologie : objets, méthodes, applications (3ème édition).

Gouaidia S., Gouaidia N., (2019). Délimitation des Périmètres de protection de quelques forages d'eau captant la nappe alluviale de Guelma (Nord-est Algérien)), **Mémoire de Master, université de Guelma**

Ikhlef S. (2006) Etude de la pollution de la nappe alluviale du haut Cheliff par les nitrates. Mémoire de Magistère, Université de Chlef

OULD GUEWAD M. (2009). Etude de mise en place de périmètre de protection autour des champs de captage d' AEP de ville D'IDINI.

Kachi S.(2007) Vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott face aux pollutions.

Lallemand-Barrès, A., & Roux, J. C. (1999). Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine : guide méthodologique et réglementaire. *Manuels et méthodes-Bureau de recherches géologiques et minières*, (33).

- Luzolo lutete (2012).** Les eaux souterraines, captage exploitation et gestion Université de Kinshasa
- Marchal JP. (2007)** Eaux destinées à la consommation humaine guide pour la protection des captages publics département du Gard et de l'Hérault
- Mattauer,M.(1958)** Etude géologique de ;Ouarsenis oriental »
- MOUSSELMAL M. (2015)** Contribution à l'étude de la recharge des nappes par procédés artificielles
- Nassah A. & Omdi B. (2011).** Les périmètre de protection des champ de captages des eaux souterraines cas du champ captant du N Fis (Maroc) p23
- Paradis D.,(2000)** Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine dans les aquifères granulaires du piémont laurentien
- REMINI.B. (2005)** Problématique de l'eau en Algerie. Collection Hydraulique ET transport solide 19p)
- Sara Vassolo (2014).** Guide National de Détermination des Périmètres de Protection des Captages d'Eau destinée à la Consommation Humaine
- SFERDJLI F. (2015)** Les périmètre de protection des ouvrages de captage des eaux souterraines. Mémoire de magistère, université de Tlemcen
- Vassolo S,Bonja p, Ryume KoM,Tiberghien C.et valley S , 2014** « guide national de détermination des périmètres de protection des captage eau destinées à la consommation humaine »
- Winschen M. (2011).** Périmètres de Protection des Captages d'eau destinée à la consommation humaine Etude préalable à l'avis de l'Hydrogéologue Agréé N° BSS : 01947X0041. Rapport de stage. Univ. Henri Poincaré
- ZIIDI ALLAL A. (2018)** Etude comparative des méthodes de délimitation périmètre de protection de forage