

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJIMOKHTAR-ANNABAUNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Année 2018

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

**Les périmètres de protection des captages d'eau souterraine
dans un milieu vulnérable : la nappe des graviers de la
région de Boumaiza (Skikda, Nord-Est Algérie)**

Option: Hydrogéologie

Par

BOURBIA Hani

Directeur de Thèse : CHAFFAI Hicham

Co-Directeur de Thèse : HANI Azzedine

Professeur (U.B.M. Annaba)

Professeur (U.B.M. Annaba)

DEVANT LE JURY

M^r : DJABRI Larbi

M^r : BAALI Fethi

M^r : GOUAIDIA Layachi

M^r : MAOUI Ammar

Professeur (U.B.M. Annaba)

Professeur (Univ. Tébessa)

Professeur (Univ. Tébessa)

Professeur (Univ. Guelma)

Président

Examineur

Examineur

Examineur

محيط حماية مستجمعات المياه الجوفية في بيئة معرضة لخطر التلوث : خزان المياه الجوفية الحصوي لمنطقة بومعيزة (سكيكدة , شمال شرق الجزائر)

ملخص

إن خزان المياه الجوفية الحصوي في بومعيزة (أقصى شمال شرق الجزائر) , هو المورد الرئيسي للمياه لتوفير مياه الشرب لسكان المنطقة , وتلبية احتياجات الزراعة و الصناعة توازيا مع التطور الاجتماعي و الاقتصادي الاستثنائي للمنطقة.

و يمكن أن يؤدي هذا التطور الاجتماعي و الاقتصادي المصحوب بطلب متزايد على المياه إلى تدهور هذا المورد , إذا تعرض للاستغلال المفرط بصورة مزمنة تعرض كذلك لمصادر مختلفة للتلوث الزراعي أو الصناعي. بعد النتائج التي تم الحصول عليها من طريقتين لتحديد قابلية التعرض للتلوث DRASTIC و GOD عن طريق ArcGIS 10.3 استنادا الى نظام المعلومات الجغرافية , تتميز هذه الطبقة بخاصيتها الكبيرة لقابلية التلوث.

لهذه الغاية , و من اجل الحفاظ على الموارد المائية و تجنب استخدام نقل المياه , اصبح حفظ نقاط المياه المتواجدة في سهل بومعيزة , عن طريق وضع مجالات حماية فورية , مقربة و بعيدة ضرورة لا غنى عنها.

الترسيم النظري لمناطق الحماية الثلاث , تأسس باستخدام العديد من الطرق (الخرائط الهيدروجيولوجية و wissling)

وقد ابرز الانشاء الفعلي لهذه المناطق من خلال الإسقاط على خارطة مساحية , سبعة قطاعات يجب حمايتها.

في النهاية , أظهرت دراسة عن مخاطر التلوث في تلك القطاعات , وجود نوعين من التلوث (موضعي و منتشر) , تليها عدة حلول و توصيات و التي تم اقتراحها لتجنب تلوث المياه الجوفية من قبل هذه الملوثات , والحصول على مياه عالية الجودة على المدى الطويل.

الكلمات المفتاحية : بومعيزة , خزان المياه الجوفية , مستجمعات المياه , قابلية التعرض للتلوث , محيط الحماية.

Protection perimeters of groundwater catchments in a vulnerable environment: the gravel aquifer in Boumaiza's region (Skikda, North-East Algeria)

Abstract

The Boumaiza's gravel aquifer (Extreme Northeastern of Algeria), is the main water resource for supplying people with drinking water, and insures the agriculture and industry satisfaction, with reference to the remarkable socio-economic development of Boumaiza's region.

This socio-economic development accompanied by an increasing demand for water, can lead to the degradation of this resource, if it is chronically overexploited and exposed to different sources of agricultural or industrial pollution.

The results obtained by the two methods of vulnerability determination (GOD and DRASTIC), carried out by ArcGIS 10.3, based on the geographic information system (GIS), made known that this aquifer is generally characterized by a high vulnerability.

To this end, and with the aim of perpetuating this water resource, and avoiding the use of water transfers, the preservation of catchments established in the Boumaiza's plain, by setting up the perimeters of immediate, close and remote has become indispensable.

The theoretical delimitation of the three perimeters was established using several methods (Wyssling, cylinder, hydrogeological mapping and infiltration). The real establishment of these perimeters, by projection on a cadastral plan, has highlighted seven sectors that must be protected in the studied region.

Finally, a study on the risk of pollution in these sectors has shown the existence of two types of pollution (punctual and diffuse), followed by several solutions and recommendations that have been proposed to prevent contamination of the aquifer by these pollutants, and obtaining high quality water in the long term.

Key words: Boumaiza, Gravel aquifer, Water catchment, Vulnerability to pollution, Protection perimeters.

Les périmètres de protection des captages d'eau souterraine dans un milieu vulnérable : la nappe des graviers de la région de Boumaiza (Skikda, Nord-Est Algérie

Résumé

La nappe des graviers de Boumaiza (extrême Nord est de l'Algérie), constitue la principale ressource d'eau pour l'approvisionnement en eau potable de la population de la région, et répondre aux besoins de l'agriculture et de l'industrie, vis-à-vis le développement socio-économique remarquable de la région de Boumaiza.

Ce développement socio-économique accompagné par une demande croissante en eau, peut conduire à la dégradation de cette ressource, si elle est surexploitée de manière chronique et exposée à différentes sources de pollution agricole ou industrielle.

Suite aux résultats obtenus par les deux méthodes de détermination de vulnérabilité (GOD et DRASTIC), réalisé par ArcGIS 10.3, basés sur le système d'information géographique (SIG), cette nappe est caractérisée par une vulnérabilité globalement forte.

A cet effet, et dans l'objectif de pérenniser cette ressource en eau, et d'éviter le recours à des transferts d'eau, la préservation des captages implantés dans la plaine par la mise en place des périmètres de protection immédiat, rapprochée et éloignée est devenue indispensable.

La délimitation théorique des trois périmètres, a été établie à l'aide de plusieurs méthodes (Wyssling, cylindre, cartographie hydrogéologique et infiltration). L'instauration réelle de ces périmètres, par la projection sur un plan cadastral, a mis en évidence sept secteurs qui doivent être protégés dans la région étudiée.

En fin, une étude sur le risque de pollution dans ces secteurs a montré l'existence de deux types de pollution (ponctuelle et diffuse), suivie par plusieurs solutions et recommandations qui ont été proposées afin d'éviter la contamination de la nappe par ces polluants, et l'obtention d'une eau de très bon qualité à long terme.

Mots clés : Boumaiza, Nappe des graviers, Captages d'eau, Vulnérabilité à la pollution, Périmètres de protection.

Remerciements

Je tiens à remercier plusieurs personnes, sans lesquelles ce travail n'aurait pas été possible. Et je ne suis pas non plus capable de dire dans les mots qui conviennent, le rôle qu'elles ont pu jouer à mes côtés pour en arriver là.

Au terme de ce travail, et avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Dieu tout puissant qui ma aidé et donné le courage pour mener à bien ce travail.

Merci à mon directeur de thèse le Professeur Hicham CHAFFAI et mon co-directeur le professeur Azzedine HANI, qui n'ont jamais épargnés un effort à me faire profiter de leurs connaissances, leurs remarques pertinentes, et leurs précieuses orientations.

Je remercie, Pr. Larbi DJABRI, d'avoir accepté de présider le jury, je lui en suis très reconnaissant.

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury, Pr. BAALI Fethi et Pr. GOUIDIA Layachi de l'université de Tébessa, et Pr. MAOUI Ammar de l'université de Guelma, pour avoir accepté d'en faire partie et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Merci à monsieur Mohamed BEN-DAOUD, professeur Université Moulay Ismaïl, Faculté des sciences de Meknès (Maroc), d'avoir bien voulu m'aider et me diriger.

J'adresse mes remerciements à monsieur Mahmoud TOURKI, Maître assistant à l'université de Mila, qui était très généreux pendant la formation en ArcGIS, ainsi que ces orientations, et conseils concernant le SIG.

Je remercie tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce travail directement ou indirectement, par leur amitié et leur sympathie, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Enfin, tout le mérite revient à ma très chère petite et grande famille et mes proches amis qui m'ont bien soutenu et qui n'ont pas cessé de m'apporter un précieux soutien moral. Que ce travail soit le témoignage de ma profonde reconnaissance.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX	X
LISTE DES FIGURES	XII
CHAPITRE I	1

GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

1. Situation géographique.....	4
2. Aperçu Socio-économique	4
2.1. L'agriculture.....	5
2.2. L'élevage.....	5
2.2. L'industrie.....	5
3. Le réseau hydrographique	5
4. Aperçu morphologique.....	6
5. Climat et végétation	6
6. Etude de la surface topographique.....	8
7. La population	8

CHAPITRE II

CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES

1. Introduction.....	9
2. Aperçu géologique de l'Algérie	9
2.1. Les chaînes littorales kabyles	9
2.2. Les chaînes telliennes.....	10
2.3. Les Hauts plateaux et les Hautes plaines	11
2.4. L'Atlas Saharien.....	11
3. La géologie régionale	11
3.1. Le socle cristallophyllien.....	11
3.1.1. L'unité gneissique de la base.....	11
3.1.2. L'unité intermédiaire.....	12
3.1.3. L'unité supérieure ou série des alternances	12
3.2 Les unités épimétamorphiques du massif de l'Edough.....	12
3.2.1. Les formations pélitiques de Boumaiza	12
3.2.2. Les formations épimétamorphiques de Berrahal.....	12
4. Géologie de la région de Boumaiza.....	13
4.1. La lithologie	13
4.1. Roches métamorphiques.....	13
4.2. Les roches magmatiques.....	14
4.3. Les roches sédimentaires	14

5. Géologie locale.....	15
6. Tectonique.....	15
7. Conclusion	16

CHAPITRE III

HYDROCLIMATOLOGIE

1. Introduction.....	17
2. Analyse des données climatiques	17
2.1. Analyse des précipitations	17
2.1.1. Calcul de la lame d'eau moyenne précipitée.....	19
2.1.2. Variations des précipitations dans le temps	20
2.1.2.1. Variations annuelles	20
2.1.2.2. Variations moyennes mensuelles.....	20
2.1.2.2.1 Calcul des valeurs caractéristiques	22
2.1.2.3. Variations des précipitations saisonnières	23
2.2. Les températures	24
2.2.1. Les températures moyennes mensuelles	24
2.2.2. Diagrammes Ombro-thermique	25
2.3. Humidité relative.....	27
2.5. Détermination du type du climat (Indice de Martonne E. De)	27
3. Bilan hydrologique	28
3.1. Estimation des paramètres du bilan	29
3.1.1. Evapotranspiration.....	29
3.1.1.1. Evapotranspiration potentiel ETP (methode de Thornthwaite)	30
3.1.1.2. L'évapotranspiration réel ETR (Formule de Turc)	31
3.1.2. Le ruissellement	32
3.1.3. L'infiltration	32
3.1.4 Interprétation du bilan hydrique	36
4. Conclusion	36

CHAPITRE IV

HYDROGEOLOGIE

1. Introduction.....	39
2. Géométrie de l'aquifère.....	39
2.1. Interprétation des résultats.....	39
2.1.1. Les alluvions	41
2.1.2. Le substratum	41
3. Etude du remplissage Plio-quaternaire de la vallée de l'oued Kébir par les sondages mécaniques ..	42

3.1. Forage 1 (Boumaiza)	42
3.2. Forage de Hadjar Soud	42
3.3. Forage de la cimenterie	42
4. Piézométrie.....	44
4.1. Inventaire des points d'eau	44
4.1.1 Les puits	44
4.1.2 Les forages	44
4.2. Interprétation des cartes piézométriques.....	44
4.2.1. Carte du mois d'Avril 2017	44
4.2.2 Carte du mois Janvier 2018	48
4.3. Fluctuation des profondeurs d'eau.....	48
5. Conditions aux limites.....	51
6. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe	51
6.1. Définition des caractéristiques hydrodynamiques	52
6.1.1. La perméabilité "k".....	52
6.1.2. La transmissivité "T"	52
6.1.3. Le coefficient d'emmagasinement "S"	52
6.2. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques	52
6.2.1. Méthode de THEIS.....	52
6.2.2. Méthode de SHOW	54
6.2.3. Méthode de la remontée de THEIS.....	54
6.3. Discussion des résultats	55
7. Estimation de la réserve en eau	56
8. Exploitation actuelle.....	56
9. Conclusion	57

CHAPITRE V

VULNERABILITE A LA POLLUTION DE LA NAPPE ALLUVIALE DE BOUMAIZA

1. Introduction	57
2. Définition et historique de la vulnérabilité	57
3. Origine de la vulnérabilité des eaux souterraines	59
4. Cartographie de la vulnérabilité	59
4.1. Utilisation des SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité des nappes	60
4.2. Méthodes de cartographie de la vulnérabilité	60
4.2.1. La méthode GOD	61
4.2.2. La méthode DRASTIC	63
<i>Résultats et discussions</i>	67

5.1. Introduction	68
5.2. Evaluation de la vulnérabilité par la méthode GOD	68
5.2.1. Traitement des paramètres GOD	68
5.2.1.1. Type de nappe (G).....	68
5.2.1.2. Lithologie de la ZNS de l'aquifère (O)	68
5.2.1.3. Profondeur de la nappe (D).....	69
5.2.2. Carte de vulnérabilité GOD	70
5.3. Evaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC	73
5.3.1. Profondeur du plan d'eau	73
5.3.3. Lithologie de l'aquifère (A)	75
5.3.4. Type de sol (S)	75
5.3.5. La topographie (T).....	77
5.3.6. Nature de la zone non saturée (I)	79
5.3.7. Conductivité hydraulique (C)	80
5.4. Carte de synthèse (vulnérabilité à la pollution)	80
6. Qualité des eaux de la nappe alluviale de Boumaiza	82
6.1. Les paramètres physico-chimiques	82
6.2. Caractéristiques chimiques des eaux souterraines	83
6.3. Evolution des teneurs en nitrates dans le temps	83
6.4. Aptitude des eaux à l'irrigation	83
7. Conclusion	84

CHAPITRE VI

LES PERIMETRES DE PROTECTION

1. Introduction	82
2. Concept des périmètres de protection	83
2.1. Le périmètre de protection immédiate (PPI).....	84
2.2. Le périmètre de protection rapprochée (PPR).....	84
2.3. Le périmètre de protection éloignée (PPE)	84
3. Textes juridiques et procédures de protection Algérienne	85
4. Les périmètres de protection à travers le monde.....	86
5. Notions du bassin d'alimentation des captages et portion de nappe alimentant le captage (BAC et PNAC)	87
5.1. Bassin d'alimentation des captages (BAC).....	87
5.2. Portion de la nappe alimentant le captage (PNAC).....	89
6. Méthodes de détermination des périmètres de protection (PDP)	90
6.1. Méthodes géométriques (La Formule de cylindre ; Rayon Calculé).....	91

6.2. Méthodes analytiques	91
6.2.1. Méthode de Bear et Jacob (1965)	92
6.2.2. La méthode de Wyssling (1979) à Lallemand-Barrès et Roux (1989).....	93
6.3. Modèles numériques.....	95
6.4. Méthode hydrodynamique graphique	95
6.5. Méthodes combinées	95
7. Conclusion	97

CHAPITRE VII

LES PERIMETRES DE PROTECTION DES CAPTAGES DE LA NAPPE ALLUVIALE DE BOUMAIZA

1. Introduction	99
2. Détermination théorique des périmètres de protection	100
2.1. Périmètres de protection immédiate (PPI)	100
2.2. Périmètres de protection rapprochée (PPR)	103
2.2.1. Méthode du cylindre.....	103
2.2.2. Méthode de Wyssling	105
2.2.4. Interprétation des résultats.....	118
2.3. Périmètre de protection éloignée (PPE).....	120
2.3.1. Méthode de cartographie hydrogéologique.....	120
2.3.1. Méthode de l'infiltration.....	124
3. Instauration pratique des périmètres de protection	125
3.1. Représentation pratique des PDP.....	126
4. Risque de pollution dans les périmètres de protection	128
4.1. La pollution ponctuelle.....	129
4.1.1. Les fosses septiques.....	129
4.1.2. Liquide s'écoulant de la tomate pourrie durant la période de livraison à l'usine Amor Benamor	129
4.2. La pollution diffuse	131
4.2.1. Utilisation du système d'irrigation goutte à goutte	133
4.2.2. Remplacement des produits phytosanitaires par des méthodes d'agricultures développées.....	138
5. Conclusion	141
Conclusion générale et recommandations.....	133

Bibliographie

Annexes

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Log stratigraphique du forage Boumaiza 1 (AEP Annaba)	15
Tableau 2 : Les coordonnées Lambert des stations pluviométriques	17
Tableau 3 : Coefficient pluviométrique des stations de Skikda, Ain Charchar et Azzaba (1980/2015)	18
Tableau 4 : Précipitations moyennes annuelles en mm (1980/2015).....	21
Tableau 5 : Précipitations moyennes mensuelles en mm (1980/2015)	21
Tableau 6 : Valeurs caractéristiques des séries pluviométriques	22
Tableau 7 : Les irrégularités interannuelles des précipitations	23
Tableau 8 : Répartition saisonnière des précipitations en (mm)	23
Tableau 9 : Températures moyennes mensuelles (1980-2015).....	24
Tableau 10 : Moyennes mensuelles d’humidités relatives en (%) à la station de Skikda (1980-2013).....	27
Tableau 11 : Indice d'aridité annuelle (D'après la formule DE.MARTONNE)	28
Tableau 12 : L'évapotranspiration réelle selon la formule de Turc.....	31
Tableau 13 : Le ruissellement selon la formule de Turc.....	32
Tableau 14 : Détermination des paramètres de la formule du bilan hydrique.....	33
Tableau 15 : Bilan hydrologique pour la station d’Ain Charchar d’après la méthode de C.W. Thornthwaite	33
Tableau 16 : Bilan hydrologique pour la station de Skikda d’après la méthode de C.W. Thornthwaite	34
Tableau 17 : Bilan hydrologique pour la station d’Azzaba d’après la méthode de C.W. Thornthwaite	35
Tableau 17 : Résistivités et signification lithologique des sondages électriques dans la plaine de Hadjar Essoud	40
Tableau 18 : Coordonnées des forages.....	46
Tableau 20 : Caractéristiques hydrodynamiques selon la méthode de THEIS.....	53
Tableau 21 : Caractéristiques hydrodynamique selon la méthode de SHOW.....	54
Tableau 22 : Transmissivité selon la méthode de la remontée.....	55
Tableau 23 : Valeurs de transmissivité calculée par différentes méthodes	55
Tableau 24 : Cotes accordées aux paramètres de la méthode GOD.....	62
Tableau 25 : Poids attribués aux paramètres DRASTIC (Aller et al, 1987)	64
Tableau 26 : Classes et notes des sept paramètres (Lallemand- Barès 1994).....	65
Tableau 27 : Intervalles des valeurs de l’Indice GOD et classes correspondantes.....	71
Tableau 28 : Notation et pondération de la nature du sol	75
Tableau 29 : Différentes classes de pente et leurs indices DRASTIC	77
Tableau 30 : Critères d’évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC	80

Tableau 31 : Les paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe alluvial de Boumaiza	82
Tableau 32 : Les périmètres de protection (Amérique du Nord et Europe) d'après Bussard, 2005	87
Tableau 33 : Avantages et inconvénients des différentes méthodes pour détermination des PDP	97
Tableau 34 : Détermination des PPR par la méthode du cylindre	104
Tableau 35 : Détermination des PPR par la méthode de Wyssling	106
Tableau 36 : Détermination des PPR par la méthode de Wyssling	107
Tableau 37 : Les PPR par les méthodes du cylindre et Wyssling	118
Tableau 38 : Détermination des PPR par la méthode d'infiltration	125
Tableau 39 : Les différents pesticides utilisés par les agriculteurs de la région de Boumaiza	132
Tableau 40 : Influence du débit pompé sur le PPR (méthode du cylindre).....	135
Tableau 41 : Influence du débit pompé sur le PPR (méthode du Wyssling).....	137

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de situation géographique.....	4
Figure 2 : Les différentes unités industrielles de Boumaiza.....	6
Figure 3 : Carte des bassins versant des côtiers constantinois et réseau hydrographique de la zone d'étude (ABH Constantine, 2000).....	7
Figure 4 : Carte géologique de la région d'étude (d'après J.M. Vila, 1980).....	10
Figure 5 : Cadre structural schématisé de l'Algérie.....	16
Figure 6 : Variations des précipitations moyennes annuelles pour les stations de Skikda, Ain Charchar et Azzaba (1980-2015).....	20
Figure 7 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles aux stations de Skikda, Ain Charchar et Azzaba (1980/2015).....	21
Figure 8 : Variations moyennes saisonnières des précipitations aux stations de Skikda, Ain Charchar et Azzaba.....	24
Figure 9 : Variations moyennes mensuelles des températures en (°C) aux stations de Skikda, Ain Charchar et Azzaba (1980-2015).....	25
Figure 10 : Diagramme Ombro-thermique de la station de Skikda.....	26
Figure 11 : Diagramme Ombro-thermique de la station d'Azzaba.....	26
Figure 12 : Diagramme Ombro-thermique de la station d'Ain Charchar.....	26
Figure 13 : Bilan d'eau (Station d'Ain Charchar 1980-2015).....	34
Figure 14 : Bilan d'eau (Station de Skikda 1980-2015).....	35
Figure 15 : Bilan d'eau (Station d'Azzaba 1980-2015).....	36
Figure 16 : Carte des résistivités dans la plaine de l'oued Kébir Ouest (Khammar, 1981).....	40
Figure 17 : Carte des épaisseurs des alluvions dans la plaine de l'oued Kébir Ouest (Khammar, 1981).....	41
Figure 18 : Coupes géo-électriques au travers de la plaine alluviale de l'oued kébir Ouest.....	43
Figure 21 : Carte piézométrique de la nappe des graviers de Boumaiza (Avril 2017).....	47
Figure 22 : Carte piézométrique de la nappe des graviers de Boumaiza (Janvier 2018).....	49
Figure 23 : Carte de battement de la nappe (Avril 2017 - Janvier 2018).....	50
Figure 24 : Modèle «origine – écoulements – cible» -modifié- (action COST620, 2004 in Cazaux, 2007).....	59
Figure 25 : Elaboration des cartes de vulnérabilité par la méthode DRASTIC et GOD.....	61
Figure 26 : Distribution spatiale des coefficients GOD selon la ZNS de l'aquifère.....	69
Figure 27 : Distribution spatiale des coefficients GOD selon la profondeur du plan d'eau.....	70
Figure 28 : Carte de vulnérabilité de l'aquifère de la plaine alluviale de Boumaiza par la méthode GOD.....	72
Figure 29 : Carte de répartition spatiale de l'indice DRASTIC pour les profondeurs du plan d'eau....	74

Figure 30 : Carte de répartition spatiale de l'indice DRASTIC pour la nature de sol	76
Figure 31 : Carte de répartition spatiale de l'indice DRASTIC pour la pente	78
Figure 32 : Carte de répartition spatiale de l'indice DRASTIC pour zone non saturée de l'aquifère ...	79
Figure 33 : Carte de répartition spatiale de l'indice DRASTIC.....	81
Figure 34 : Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe alluviale de Boumaiza avec la méthode DRASTIC	81
Figure 35 : Schéma représentatif des périmètres de protection.....	83
Figure 36 : Le BAC et le PNAC.....	88
Figure 37 : Bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage (BAC).....	88
Figure 38 : Distinction entre aire d'alimentation, zone d'influence et zone d'appel (Vernoux, 2007).....	90
Figure 39 : Méthode de Bear et Jacob (1965).....	93
Figure 40 : Détermination des isochrones (méthode de Wyssling).....	94
Figure 41 : Détermination d'un périmètre de protection par la méthode 3A2E.....	96
Figure 42 : Le PPI pour les forages implantés dans la nappe alluviale de Boumaiza	101
Figure 43 : PPI du forage Azzaba 1.....	101
Figure 44 : Forages d'AEP implantés dans des parcelles d'agricultures sans PPI.....	102
Figure 45 : Forages privés implantés au centre des parcelles agricoles sans PPI.....	102
Figure 46 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage AEP Annaba 1	108
Figure 47 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage AEP Annaba 2	108
Figure 48 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage AEP Annaba 3	108
Figure 49 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage AEP Azzaba 1	109
Figure 50 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage AEP Azzaba 2	109
Figure 51 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage AEP Boumaiza	109
Figure 52 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage Bona 1	110
Figure 53 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage Bona 2	110
Figure 54 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage station services	110
Figure 55 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage Ferme Dahoui 1	111
Figure 56 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage Ferme Dahoui 2.....	111
Figure 57 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage Ferme privée.....	111
Figure 58 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 1	112
Figure 59 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 2	112
Figure 60 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 3	112
Figure 61 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 4	113
Figure 62 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 5	113
Figure 63 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 6	113
Figure 64 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 7	114

Figure 65 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 8	114
Figure 66 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 9	114
Figure 67 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 10	115
Figure 68 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 11	115
Figure 69 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 12	115
Figure 70 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 13	116
Figure 71 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 14	116
Figure 72 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 15	116
Figure 73 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 16	117
Figure 74 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 17	117
Figure 75 : PPR par la méthode de Wyssling sur la carte topographique du Berrahal 1/50000	118
Figure 76 : Carte de délimitation du BAC pour la période des hautes eaux (Avril 2017).....	122
Figure 77 : Représentation du BAC sur la carte topographique du Berrahal 1/50000	122
Figure 78 : Carte de délimitation du BAC pour la période des basses eaux (Janvier 2018).....	123
Figure 79 : Représentation du BAC sur la carte topographique du Berrahal 1/50000	123
Figure 80 : PPR sur un extrait du plan cadastral de la commune de Ben Azzouz échelle 1/5000.....	127
Figure 81 : l'assemblage des PPR sur un extrait du plan cadastral de la commune de Ben Azzouz, échelle 1/5000	127
Figure 82 : Les PPR réels à appliquer dans la plaine alluviale de Boumaiza.....	128
Figure 83 : Liquide de la tomate pourrie	130
Figure 84 : Les différents systèmes d'irrigation.....	134
Figure 85 : Influence du débit pompé sur le périmètre de protection rapprochée selon la méthode du cylindre	136
Figure 86 : Influence du débit pompé sur le périmètre de protection rapprochée selon la méthode du Wyssling	136
Figure 87 : Évolution des produits phytosanitaires après le traitement.....	138
Figure 88 : CIPAN et désherbage.....	139
Figure 89 : Boisement des périmètres rapprochés	140

LISTE DES ABREVIATIONS

AAC : aire d'alimentation de captage
AEP : Alimentation en Eau Potable
ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques
BAC : bassin d'alimentation de captage
BRGM : bureau de recherche géologique et minière
DA : déficit agricole
ETP : évapotranspiration potentielle
ETR : évapotranspiration réelle
Exc : excédent
i : Gradient hydraulique (pente de la nappe)
K : Perméabilité de l'aquifère
O.N.A.B. : office nationale des aliments de bétails
PDP : Périmètre de Protection
PNAC : partie de la nappe aimantant le captage
PPE : Périmètre de Protection Eloigne
PPI : Périmètre de Protection Immédiat
PPR : Périmètre de Protection Rapproche
Q : Débit d'exploitation du captage
RFU : réserve facilement utilisable
S : Coefficient d'emménagement de l'aquifère
T : Transmissivité de l'aquifère
USEPA : United States Environmental Protection Agency
ZNS : Zone Non Saturée

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'eau est l'élément le plus précieux qui assure la continuité de la vie sur la planète terre nommée la planète bleu, compte tenu l'occupation d'eau de plus de 73 % de sa superficie, ou l'eau douce accessible correspond à environ 10 % du volume total d'eau douce, soit environ 0,26 % de l'hydrosphère. L'eau souterraine représente la fraction de la ressource en eau la plus importante avec 96 %.

L'Algérie se trouve dans une région du monde la plus défavorisée en matière de disponibilité hydrique, pour cela la pénurie d'eau est devenue un problème critique vécu par toutes les sociétés. En effet, la croissance démographique, l'urbanisation, l'évolution de l'industrie et l'intensification de l'activité agricole ont eu pour corollaire une dégradation de la qualité des eaux de surface et souterraines, et une baisse très significative des réserves qui représentent parfois les seules ressources d'eau pour l'alimentation des populations.

La plaine alluviale de Boumaiza (Nord-Est Algérien), caractérisée par une nappe alluviale renferme un potentielle hydrique très important (Khammar, 1981). La préservation de cette ressource locale constitue un enjeu environnemental et économique primordial vis à vis la demande croissante en eau sous l'effet de l'afflux de population, l'évolution industrielle de la région par rapport à des années passées, et l'extension des activités agricole qui caractérise Boumaiza (région à vocation agricole). Cette préservation des nappes d'eau souterraine souvent vulnérables, peut être assurée par des périmètres de protection des ouvrages et captages d'exploitation implantés selon les besoins exprimés de la zone concernée.

Ce développement socio-économique caractérisant la région de Boumaiza ces dernières années, engendre une demande en eau sans cesse croissante, et par conséquence créé une diversité des sources de pollution, que se soit de l'industrie ou bien de l'activité agricole. La chose qui incite l'adaptation de mesures préventives visant une gestion durable et optimale.

De ce fait, cette étude a été menée afin d'élaborer les périmètres de protection des captages d'eau souterraine de la nappe des graviers de la région de Boumaiza, afin d'éviter les différents sources de pollution, qui peuvent altérer la qualité d'eau et assurer la pérennisation des ressources souterraines.

Ainsi, ce travail s'articule autour d'une introduction générale, six chapitres, conclusion générale, des références bibliographiques et des annexes.

→ Dans le **premier chapitre**, *généralités sur la zone d'étude*, une synthèse des connaissances de la région du Boumaiza qui fournira une approche du point de vue géographique, géomorphologique, et identification des unités industrielles ainsi que les différentes activités agricoles qui caractérise la région.

→ Le **deuxième chapitre**, *Contexte géologique et structural de Boumaiza*, est consacré à l'étude géologique, structurale et tectonique de la région, afin de constituer une idée sur l'aquifère et les sources de minéralisation des eaux souterraines et le sol.

→ Le **troisième chapitre**, *Etude hydroclimatologique*, appréhender l'évolution des caractéristiques climatiques dans le temps et dans l'espace, définir et évaluer les différents termes du bilan hydrique.

→ Le **quatrième chapitre**, *Etude hydrogéologique*, s'intéresse à la définition de la géométrie, la structure et la lithologie de l'aquifère à la base des données géophysiques et des sondages mécaniques, ainsi que la détermination des caractéristiques hydrodynamiques et la réalisation des cartes piézométriques (hautes et basses eaux) pour déceler le sens d'écoulement, les zones d'alimentations et d'accumulation des eaux souterraines.

→ Le **cinquième chapitre**, *vulnérabilité de la zone d'étude*, consiste à l'établissement de la carte de vulnérabilité de la nappe alluviale et de déterminer les zones vulnérables à la pollution.

→ Enfin, le **sixième chapitre**, « *Les périmètres de protection des captages d'eau souterraine dans un milieu vulnérable : la nappe des graviers de la région de Boumaiza (Skikda, Nord-Est Algérie)* », est divisée en deux parties :

✓ Une partie théorique : mettre en évidence les définitions et les notions de base des périmètres de protection, ainsi que les différentes méthodes adopter pour la détermination de ces périmètres. Aussi, des définitions et conceptions concernant les bassins d'alimentations des captages et les portions des nappes alimentant les captages (BAC et PNAC), ainsi que les démarches et les méthodes de déterminations de chaque un.

✓ Une partie pratique comporte deux volets, dont le premier présent la détermination théorique des périmètres de protection à partir des calculs par des différentes méthodes, et le deuxième volet traite l'instauration réelle de ces périmètres sur terrain, tenant compte les différents obstacles rencontrés, afin de délimiter des secteurs à protéger. Après, un

recensement de différentes sources de pollution (accidentelles ou dispersives) existant dans la zone d'étude avec des propositions pour résoudre ce problème et avoir une nappe saine sur une long durée.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

1. Situation géographique

La région de Boumaiza fait partie du bassin versant de l'Oued Kébir Ouest, situé au Nord-Est Algérien entre les wilayas d'Annaba et de Skikda, limitée par les longitudes 7°10'E et 7°27'E, et les latitudes 36°42'N et 36°50'N. Elle appartient aux bassins versant côtiers constantinois centre et s'étend sur une superficie de 88,8 km².

Elle est limitée par (Fig. 1) :

- ✓ La commune de Ben azzouz au Nord ;
- ✓ Ain Charchar et Bekkouche Lakhdar au Sud ;
- ✓ Le lac fetzara à l'Est ;
- ✓ Ain Nechema à l'Ouest.

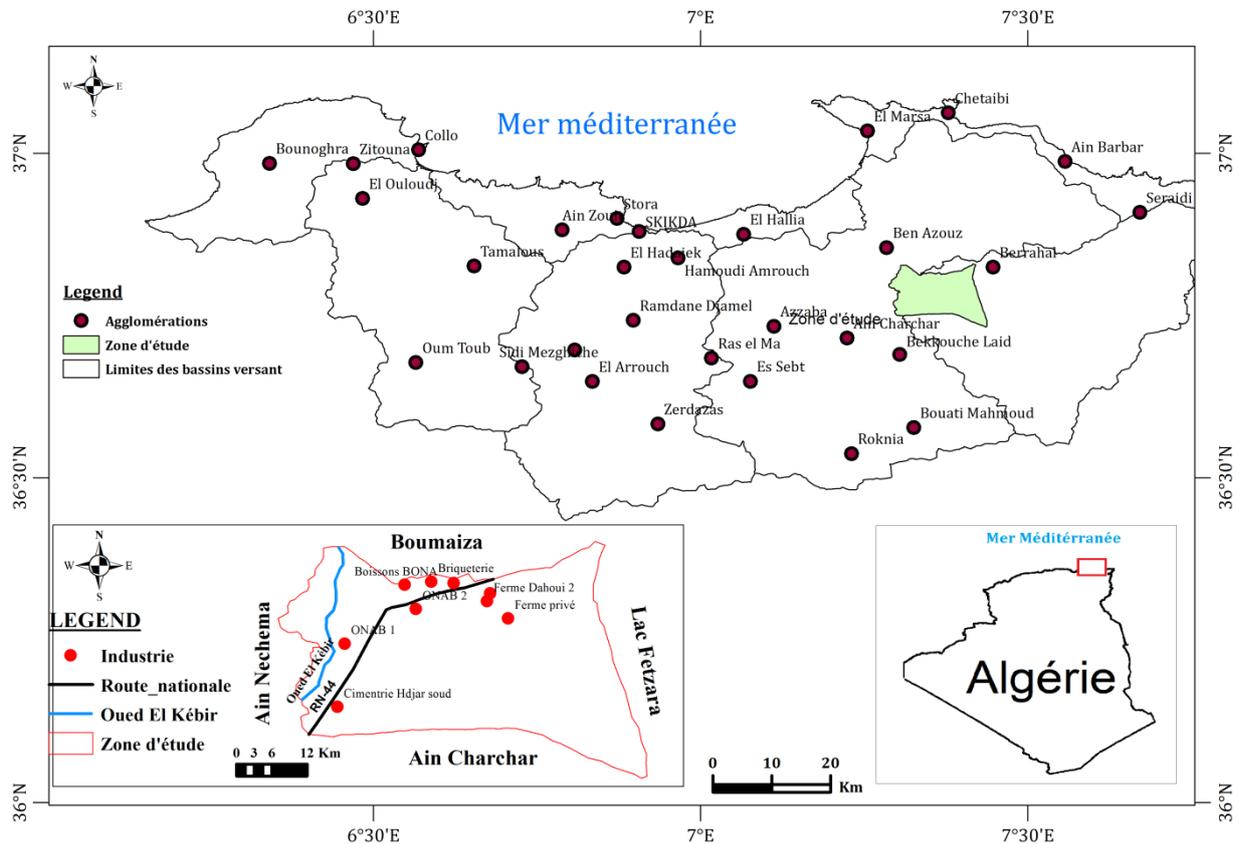


Figure 1 : Carte de situation géographique

2. Aperçu Socio-économique

L'agriculture et l'élevage sont les occupations essentielles de la population de la région de Boumaiza, ainsi que le secteur industriel qui présente une évolution exceptionnelle tenant compte la nouvelle orientation de l'état (développement de l'industrie).

2.1. L'agriculture

L'agriculture est le secteur le plus porteur dans la wilaya de Skikda. La région de Ben Azzouz titrée la premier en matière de production de cet aliment à l'échelle nationale, produire plus de deux million de quintaux de tomate industrielle qui présente le tiers de la production nationale. La superficie agricole représente 80 % de la zone d'étude. L'activité principale est la tomate industrielle, le poivron et rarement pastèque et melon.

2.2. L'élevage

Depuis l'indépendance, les habitants de Boumaiza comme tous les petits villages algériens, caractérisé par l'élevage des bétails, volaille et de bovins pour un intérêt personnel.

En raison de l'orientation de l'état à développer ce secteur, plusieurs fermes ont été construites tel que les fermes Dahoui (1 et 2) qui renferme des centaines de vaches laitiers produisent près de 4000 litres / jours, ainsi que deux complexes pour l'élevage de volailles affilié à l'office nationale des aliments du bétail ONAB.

2.2. L'industrie

L'industrie à Boumaiza est connue par trois grands complexes industriels :

- La cimenterie de Hajar-Soud (SCHS filiale du groupe GICA) qu'est opérationnelle depuis 1973 et s'étend sur une superficie de 29 ha.

- L'unité de transformation de tomate industrielle Amor Benamor qu'est opérationnel depuis Juillet 2011 avec une capacité de 2500 à 5000 tonne/jours.

- L'usine de fabrication des boissons gazeuses Bona.

Ces dernières années, connu un développement remarquable par la création des nouvelle unités industrielles tel que SIFCO (société industrielle de fabrication de carton ondulé), Briqueterie de Ben Azzouz (unité de fabrication de la brique).

3. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est représenté par l'oued kébir Ouest et oued Magroune occupant la partie Nord-Ouest, et une série de ruisseaux à écoulement temporaire (hiver) se déversant directement dans le lac Fetzara qui rejoint la mer par l'intermédiaire d'un canal de dessèchement qui passe par l'oued Meboudja, puis par l'oued Seybouse (H. Khelfaoui, 2014).

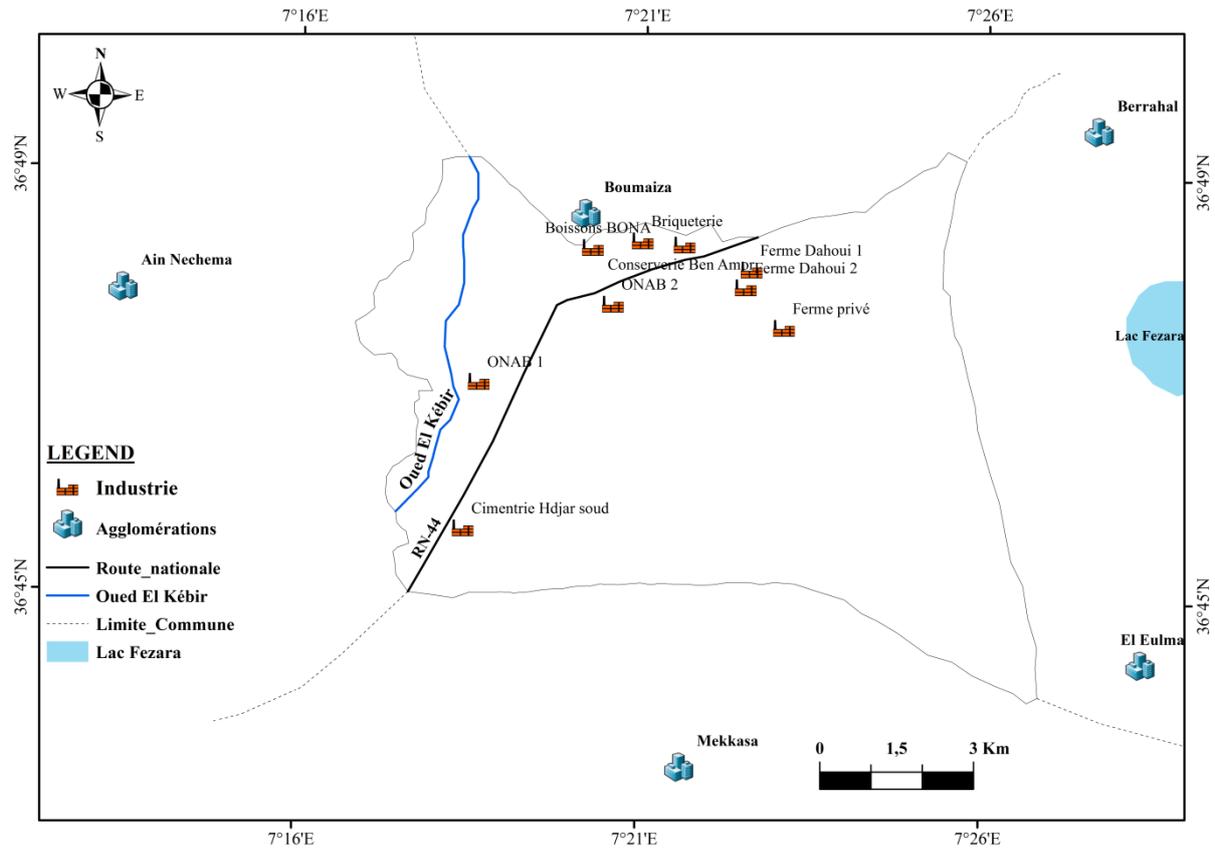


Figure 2: Les différentes unités industrielles de Boumaiza

4. Aperçu morphologique

La plaine alluviale de Boumaiza creusée par l'Oued Kébir Ouest, offre des pentes peu accentuées favorisant des faibles débits de pointe, Les altitudes qui sont dans l'ensemble moyennes à faibles reflètent un relief modéré.

Elle est entourée de massifs montagneux, il s'agit de :

- ✓ l'Edough-Cap de Fer au Nord Nord-Est ;
- ✓ Filfila-Safia au Nord-Ouest.

5. Climat et végétation

La région de Boumaiza est caractérisée par un climat tempéré, avec un hiver doux et humide, et un été chaud et sec. Ces conditions climatiques imposent le développement d'une végétation typique dans la région. La répartition de cette végétation est représentée par près de 20 % des pâturages et 80 % des cultures maraîchères, pastèque, melon, tomate, poivron avec quelque plantation d'eucalyptus près des agglomérations.

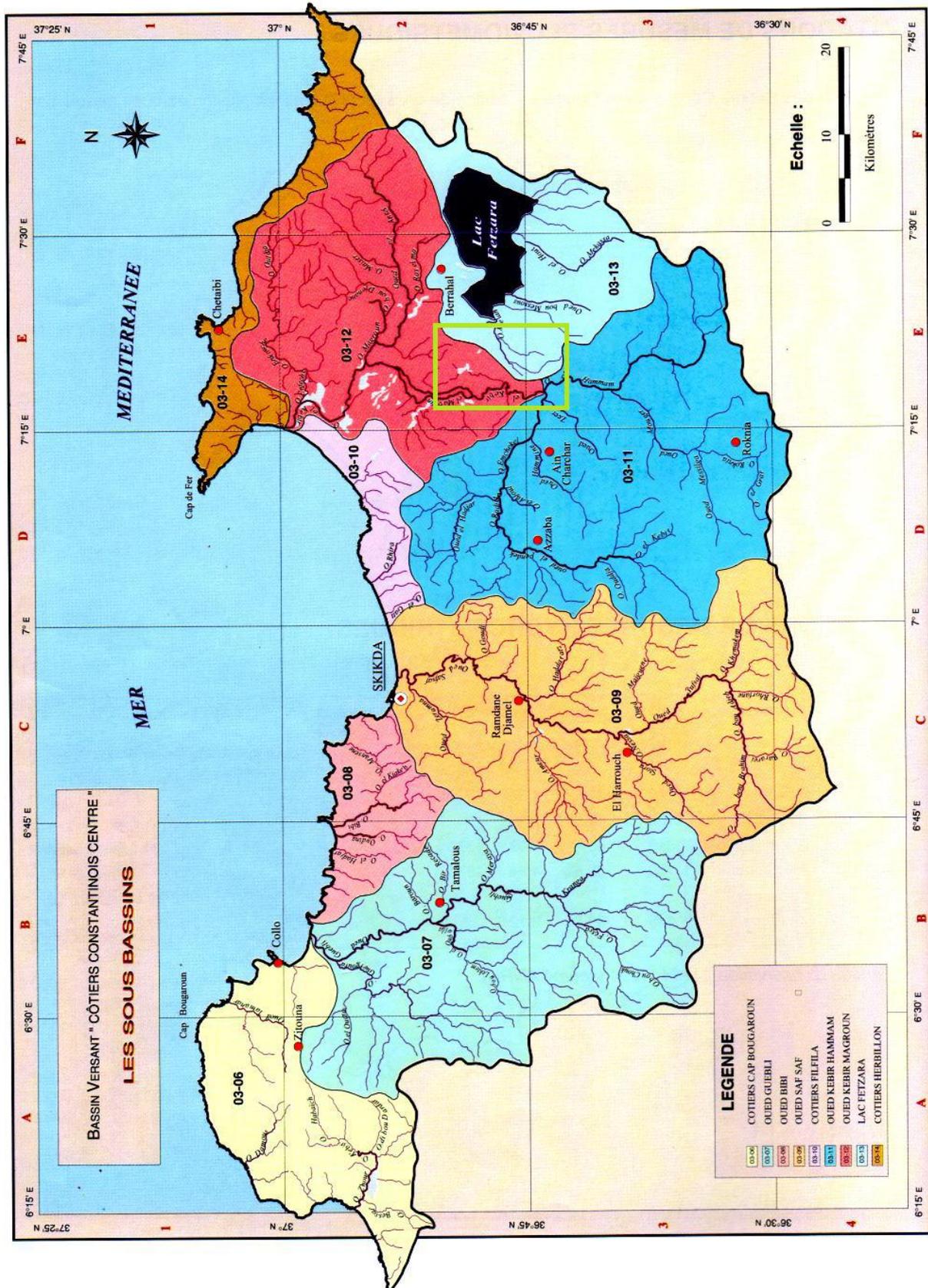


Figure 3 : Carte des bassins versant des côtières constantinois et réseau hydrographique de la zone d'étude (ABH Constantine, 2000)

6. Etude de la surface topographique

L'Oued Kébir Ouest qui draine la zone étudiée prend naissance au Sud dans la région de Azzaba à la suite de la confluence des Oueds Emchekel et Hamam, il poursuit son parcours vers le nord et contourne les dunes pour rejoindre la mer. On distingue deux principaux sous bassins :

- le sous-bassin de Hammam qui représente l'aire drainée par le cours inférieur, il occupe une surface de l'ordre de 1130 km^2 ;
- le sous-bassin de Magroune drainé par le cours supérieur s'étend sur $372,5 \text{ km}^2$;
- la surface totale drainée par l'oued kébir Ouest est d'environ 1500 km^2 ;
- Le périmètre total du bassin est d'environ 251 km et le secteur d'étude occupe une aire d'environ 133 km^2 .

7. La population

D'après l'office national des statistiques de l'Algérie, la région de Boumaiza compte 4905 habitants en 2008 (dernier recensement du 14 Avril 2008), où l'agriculture représente la principale source de revenu financière.

CHAPITRE II

CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES

1. Introduction

Nombreux sont les géologues qui ont étudié la géologie de l'Algérie. Vu l'importance de cette étude pour l'identification des gisements d'eau souterraine de la région, on s'est inspiré pour l'accomplir des travaux de Durand Delga M. et al 1956, 1960, 1967, 1969, de Hilly J., 1962 sur le massif de l'Edough et Cap de Fer, de Raoult J.F., 1974 sur la géologie du centre de la chaîne Numidique dans lequel il a donné une description lithostratigraphique et structurale des monts de Safia et Filfila. Bolfa J. et al., 1952 sur les massifs cristallins du Nord constantinois, de Deleau P., 1938 sur le pays constantinois et de Vila J.M., 1980 sur la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens.

2. Aperçu géologique de l'Algérie

L'Algérie située dans la partie nord du craton africain, peut être divisée en quatre grands ensembles structuraux (fig. 5). Il s'agit de domaines fortement différenciés au cours des phases tectoniques mésozoïques et cénozoïque. Ce sont du Nord au Sud :

- les chaînes littorales kabyles ;
- les chaînes telliennes ;
- les hauts plateaux et les hautes plaines ;
- l'Atlas Saharien.

2.1. Les chaînes littorales kabyles

Elles sont situées au Nord de l'Algérie. Les massifs primaires essentiellement métamorphiques d'âge anté-gothlandien [(M.DURAND DELGA, 1956) in C.KHAMMAR, 1980], anté-silurien représentent les noyaux rigides d'un géanticlinal qui séparent l'Eurogéosynclinal septentrional du sillon miogéosynclinal tellien. Ce domaine est marqué par l'absence du Trias gypso-salin, les lacunes du Mésozoïque et surtout par l'importance de manifestations éruptives syn. et post tectoniques (Oligocène à Pliocène).

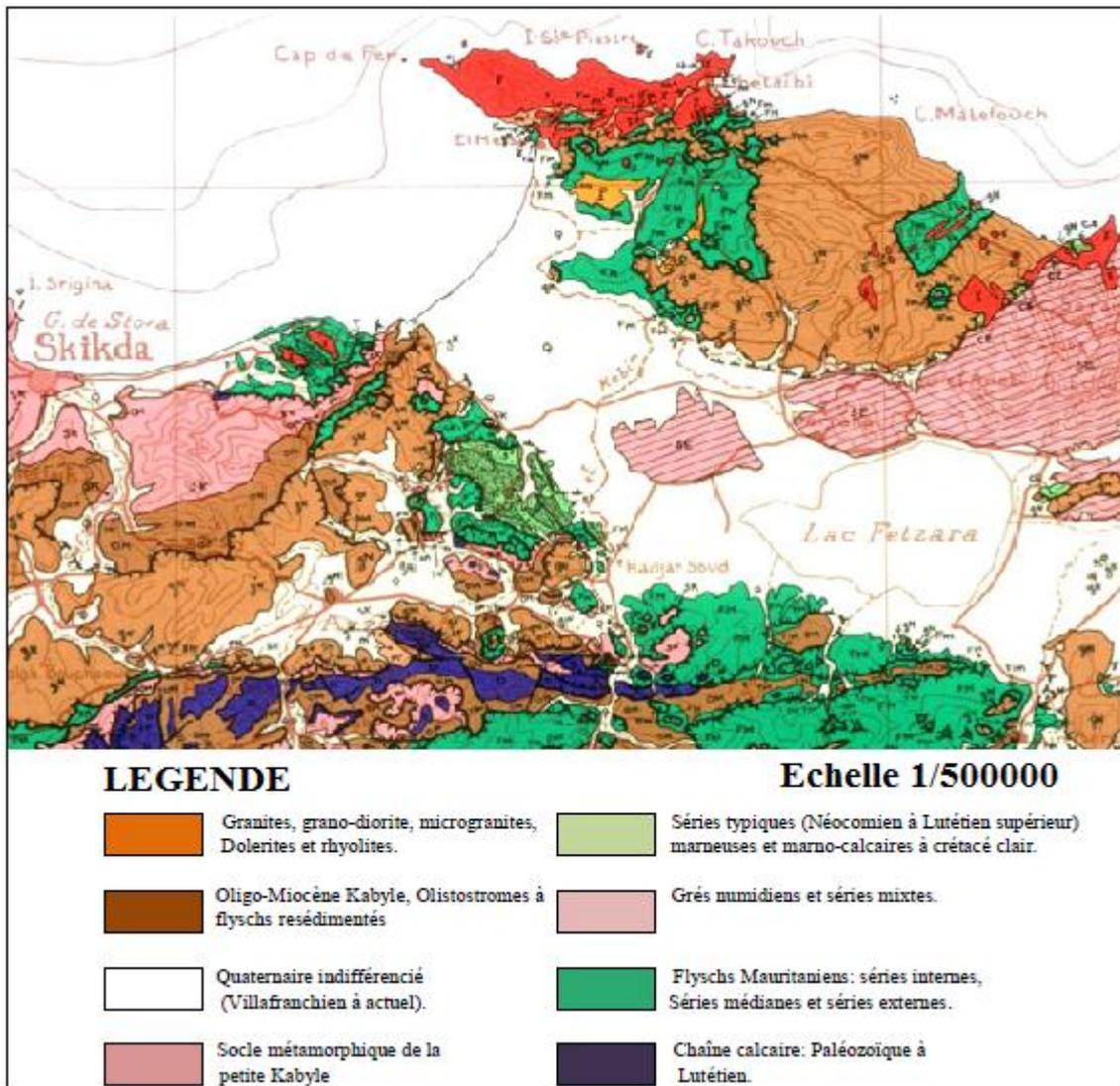


Figure 4 : Carte géologique de la région d'étude (d'après J.M. Vila, 1980)

2.2. Les chaînes telliennes

L'emplacement des chaînes telliennes fut occupé au Mésozoïque et au Cénozoïque par un fossé de sédimentation où se sont déposés en mer le plus souvent profonde, des sédiments épais, plissés de façon complexe lors des phases orogéniques pyrénéenne et alpine suivant des directions généralement est-ouest. Du Nord au Sud, on distingue :

➤ La zone Ultra-tellienne (Durand Delga M., 1969), caractérisée par des faciès « bathaux » clairs au Crétacé et à l'Eocène à sa marge septentrionale la zone tellienne stricto sensu est caractérisée par un Lias de plate-forme suivi par un Jurassique plus marneux avec cependant réapparition de faciès de plate-forme. Le Crétacé d'abord détritique devient marneux à argilo-calcaire. L'Eocène est caractérisé par des marnes épaisses.

➤ La zone Péni-tellienne : récemment définie [J-M VILA, 1977] est un des traits les plus originaux de la chaîne alpine d'Algérie orientale. Les séries de l'avant-pays sétifien ou constantinois constituent un vaste ensemble d'unités allochtones au front duquel se manifestent des phénomènes morphotectoniques. Leur faciès se diversifie vers l'est à partir du méridien de Constantine.

2.3. Les Hauts plateaux et les Hautes plaines

Les Hautes Plainnes correspondent à une zone surélevée où la couverture néritique des terrains crétacés et éocènes, moins épaisse que dans les chaînes telliennes, est peu plissée. C'est l'ensemble des régions qui séparent la chaîne tellienne de l'Atlas Saharien, il se rétrécit progressivement à l'Est vers les confins algéro-tunisiens où l'Atlas Saharien et la chaîne tellienne sont en contact.

2.4. L'Atlas Saharien

Situé au Sud, l'Atlas Saharien correspond à une fosse peu profonde où s'est accumulée, du fait de la subsidence, une grande épaisseur de terrains néritiques et continentaux durant le Secondaire et le Tertiaire. Il présente par l'épaisseur de ses sédiments et par l'amplitude de ses plissements pyrénéens, une individualité bien marquée vis-à-vis des régions qui l'encadrent.

3. La géologie régionale

La région de Boumaiza appartient au massif de l'Edough qui fait partie de la chaîne Alpine de l'Algérie du Nord orientale, formé essentiellement par un groupe de roches métamorphiques, sédimentaire et magmatiques, d'âge allant du précambrien jusqu'au quaternaire. Il est constitué d'un socle métamorphique de nappes de flysch allochtones et de roches magmatiques.

3.1. Le socle cristallophyllien

Le massif de l'Edough a été longtemps considéré comme un segment de la chaîne betico-magrébine. Il représente le témoin le plus oriental des massifs cristallophylliens littoraux de l'Algérie du Nord.

3.1.1. L'unité gneissique de la base

Cette unité forme le cœur de la structure de l'Edough et affleure au cap de garde dans la ville d'Annaba, au Nord du massif de Bélélieta et au Sud-ouest de Berrahal. Elle est constituée essentiellement de gneiss riche en matériel quartzo-feldspathique et micacé.

3.1.2. L'unité intermédiaire

C'est la série intermédiaire composée essentiellement par une alternance de micaschistes alumineux et de bancs de marbres. Elle surmonte les gneiss de l'unité de base. Il s'agit de micaschistes à grains fins à disthènes et sillimanites au cap de garde et de paragneiss migmatique à la voile noir, son épaisseur varie de quelques mètres à une centaine de mètres. On trouve parfois associées à cette série, des lentilles d'amphibolites et des metagabbros. Le contact entre cette série et la série gneissique de base est parallèle à la foliation régionale. Exceptionnellement au cap du garde, le contact a été observé en position vertical, au Nord-ouest il semble exister un passage progressif entre les paragneiss et les orthogneiss.

3.1.3. L'unité supérieure ou série des alternances

Elle affleure essentiellement au Nord d'Annaba. Elle est constituée d'une alternance de bancs décimétriques à métrique de quartzites feldspathique et de micaschistes alumineux riches en matières organiques.

Les niveaux quartzitiques sont de puissance variable, les micaschistes alumineux ont une couleur noire satinée très caractéristique, ils contiennent une grande quantité de grenats et de nombreuses baguettes de tourmalines. Cette série est également caractérisée par la présence de nombreuses fissures remplies d'andalousite rose associées à des quartzs fumés bipyramides. Elle renferme aussi des niveaux caractéristiques de tourmalines (mm à dm) souvent très continus.

3.2 Les unités épimétamorphiques du massif de l'Edough

3.2.1. Les formations pélitiques de Boumaiza

A l'extrémité Sud-ouest du massif de l'Edough (Boumaiza), se manifeste des affleurements de séricitoschistes auxquels sont associés des bancs de calcaires dolomitiques et épimétamorphiques surmontant directement les micaschistes à grenats, disthènes, staurotides, similaires ceux des micaschistes du cap de garde.

3.2.2. Les formations épimétamorphiques de Berrahal

Ces formations comprennent une assise carbonatée épimétamorphiques d'environ 10 m d'épaisseur. Ces massifs de marbres qui ont une couleur jaunâtre sont encadrés par des horizons pélitiques, par des niveaux siliceux et des séricitoschistes avec des niveaux de lydienes et de jaspes rouges ferrugineux dont le faciès évoque des radiolarites. Un niveau conglomératique remaniant les dolomies surmonte ces formations. Les séricitoschistes renferment essentiellement du quartz et du mica blanc néoformé avec quelques baguettes de

tourmaline. Un boudinage associé à des plis isoclinaux est montrés par les marbres à trémolites ainsi que les séricitoschistes de cette unité. Les niveaux pélitiques noirâtres dans les séricitoschistes montrent une dissymétrie indiquant un sens de déplacement de cette unité vers le nord-ouest. Ces formations épimétamorphiques sont surmontées par des formations argilo-gréseuse très légèrement schistosé de couleur jaunâtre dont l'âge est probablement Albo-Aptien. Ces formations reposent en accordance tectonique sur les micaschistes à grenat du socle.

4. Géologie de la région de Boumaiza

La particularité de la région de Boumaiza est la présence d'une puissante couverture de dépôts quaternaire de composition argilo sableuse dont l'épaisseur peut atteindre 60 à 70 m.

Elle cache parfaitement les formations géologiques de la région à l'exception quelques époinçements qui s'y trouvent tel que les effleurements du marbre au niveau de Koudiet Sidi Ahmed el maalag et un autre affleurement de schistes à amphiboles, le pendage des couches est généralement doux variable entre 30° et 40°.

4.1. La lithologie

La région de Boumaiza fait partie de la chaîne Alpine (zone plissée de l'Algérie du Nord). Elle est constituée par un empilement de nappes datant du Trias – Préabonien parfois adhérents à un socle paléozoïque ou plus ancien de nature cristallophyllienne complexe. Cette région est formée par un groupe de roches métamorphiques d'une part représentées par des amphibolites, des schistes satinés et du marbre, et d'autre part par des roches ignées peu ou pas métamorphisées qui sont représentées par des métagabbros et des ortho-amphibolites (Khammar et Bouabid, 1988 ; Hammor 1992).

4.1. Roches métamorphiques

➤ **Schistes satinés** : Affleurant dans la partie méridionale du secteur à Koudiet Boumaiza et au Sud-ouest de Koudiet Fatoûm. On rencontre des intercalations lenticulaires d'amphibolites à pyroxènes et du marbre.

➤ **Schistes à silimanite**

- ✓ **Le marbre** : forme un horizon affleurant dans la partie Sud-ouest du secteur.
- ✓ **Les amphibolites** : Constituent le faciès le plus répandu dans le secteur.

4.2. Les roches magmatiques

Les métagabbros et le Gabbros forment des affleurements métriques massifs fortement prismés.

4.3. Les roches sédimentaires

On distingue :

➤ **Le Secondaire** : Représenté par des formations du Jurassique et du Crétacé inférieur rencontrées à l'Ouest du terrain d'étude (Djebel Safia et à Koudiet Embarek). Le Jurassique se présente sous forme de calcaire massif blanc alors que le Crétacé se rencontre sous forme de calcaire et de marnocalcaire à nodules siliceux, des marno-calcaires du Valanginien contenant des lits de schiste du Barrémien :

- ✓ Des lits de schistes prédominants dans les marno-calcaires d'âge Aptien ;
- ✓ Un flysh Albo-Aptien.

➤ **Le Tertiaire** : Présent au niveau de la forêt de Radjata. Il est représenté par les conglomérats de base, (Numidien) qui reposent directement sur la formation cristallophyllienne, les argiles Numidienne et les éboulis de grés Numidien.

➤ **Le Quaternaire** : Il est représenté par des alluvions limoneuses et des dépôts anciens et récents de la Guerâa de Fetzara. On distingue :

✓ Le Pléistocène ancien, représenté par les alluvions de moyennes terrasses (des sables et cailloux roulés parfois assez riches en Fer) et les alluvions des hautes terrasses des vallées (sables et des cailloux roulés renfermant des blocs des grés Numidiens).

✓ Le Pléistocène récent, qui renferme les dépôts anciens de la Guerâa de Fetzara. Ce sont des sables, des limons et les alluvions des basses terrasses avec des sables et des cailloux roulés.

✓ Le Néopléistocène : représenté par :

- Les dépôts récents du lac Fetzara : Ce sont des sables et limons renfermant des dragées de limonite aux alentours immédiats de la Guerâa.

- Les alluvions limoneuses du fond des vallées.

- Le sol des marécages de la plaine de Fetzara.

5. Géologie locale

L'étude des logs stratigraphiques des forages réalisés dans le secteur de Boumaiza a montré la succession lithologique illustrée dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Log stratigraphique du forage Boumaiza 1 (AEP Annaba)

Profondeur (m)	Formation
0 - 22	Argile jaune graveleuse
26 - 26	Graviers de grés à matrice argileuse
26 - 34	Argile graveleuse
34 - 66	Graviers et grés très propre
63 - 73	Marne

Ces coupes lithographiques (Voir annexe 1) ont permis de réaliser une coupe géologique de cette région et d'en déduire (selon la DHW) l'allure générale de la nappe aquifère de Boumaiza qui présente une coupe du Nord – Ouest au Nord – Est. Donc d'après les études antérieures on distingue deux types de nappes : Nappe superficielle et nappe captive exploitées à divers usages (AEP, AEI, et irrigation).

6. Tectonique

Le domaine étudié est affecté par une tectonique complexe (souple et cassante), J.Hilly, (1962) ; J.M.Vila, (1980) ; M.Gleize, (1988) et D. Hammor, (1992). On y rencontre des unités structurales synorogéniques charriées et fracturées en divers blocs qui appartiennent aux Kabyliques et ultra Kabyliques. Les ensembles structuraux ont chacun une tectonique propre et sont séparés par des contacts doux, plats ou discordants.

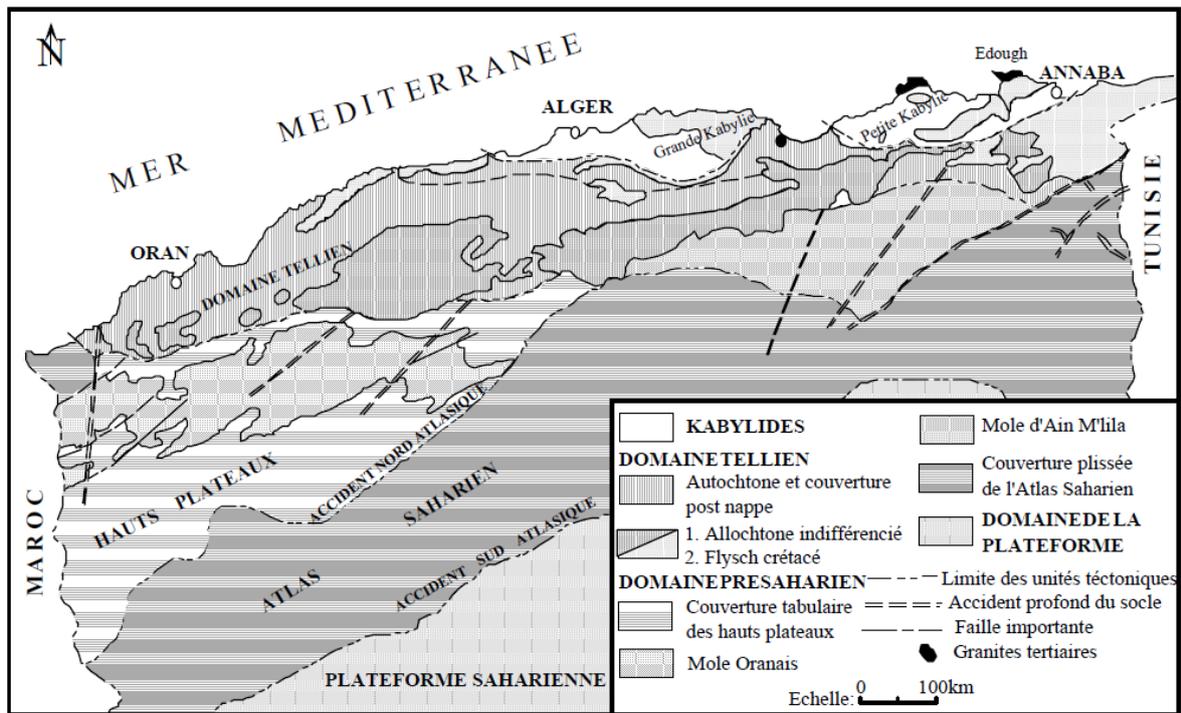


Figure 5 : Cadre structural schématique de l'Algérie

- Tectonique souple** : Le secteur a subi des déformations souples représentées au Nord – Est de Boumaiza par un grand pli anticlinal axé au Nord – Ouest avec des pendages maxima de $30-40^\circ$ sur les flancs (J.M.Vila sous presse). La chaîne calcaire est définie par la fenêtre tectonique du Djebel Safia (Durand Delga, Raoult et Vila ; 1967) formant ainsi un anticlinal déformé d'axe NW-SE. Ces déformations souples sont représentées aussi par la nappe de charriage métamorphique Kabyle du paléozoïque inférieur dans la localité de Dem El Begrat en fenêtre sous la nappe de charriage numidienne et la nappe du flysh argilito-gréseux affleurant en grande partie dans la région Est de la zone d'étude.

- Tectonique cassante** : Le secteur de Boumaiza est affecté par des failles de direction NNW-SSE, NE-SW et E-W.

7. Conclusion

Le secteur de Boumaiza appartient à la chaîne alpine, zone plissée de l'Algérie du Nord ayant subi une tectonique complexe souple et cassante. Le principal pli étant l'anticlinal crétacé et liasique du Djebel Safia. Celui ci est fracturé longitudinalement par une faille qui a rendu les flancs très abrupts.

Les coupes lithologiques des forages réalisés dans le secteur de Boumaiza montrent que l'aquifère de la nappe alluviale de Boumaiza se trouve dans les graviers du Quaternaire.

CHAPITRE III

HYDROCLIMATOLOGIE

1. Introduction

Le mouvement de l'eau dans le sol et le sous-sol est une étape d'un grand circuit sur la terre, le cycle global de l'eau. La source d'alimentation de l'eau souterraine est l'infiltration qui renouvelle l'eau des réservoirs souterrains et entretient, par son circuit dans les aquifères, le débit de l'écoulement souterrain (A. Castany, 1998).

L'établissement d'un bilan hydrique nécessaire pour estimer le taux de recharge d'un système hydraulique passe impérativement par la connaissance des facteurs climatiques tels que la précipitation, l'évapotranspiration, l'écoulement et l'infiltration.

L'objectif de notre étude est l'analyse de ces facteurs et la détermination des différents termes du bilan d'eau.

2. Analyse des données climatiques

Toute étude climatique est basée sur la collecte des données. La quantité et la qualité de ces dernières conditionnent les résultats obtenus. Notre étude est basée sur les données recueillies (précipitations et températures) des trois stations pluviométriques Ain Charchar, Azzaba et Skikda et de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de Constantine (A.N.R.H) sur une période de 35 ans (1980-2015), sous forme de moyennes mensuelles et annuelles des hauteurs de pluie ainsi que des températures. Le choix des stations est relatif à la disponibilité des données climatiques (complètes et traitées), ainsi que l'éloignement de la zone d'étude.

Tableau 2 : Les coordonnées Lambert des stations pluviométriques

Station	Coordonnées			Période d'observation	Eloignement de Boumaiza
	X	Y	Z		
Skikda	874.50	406.40	1.5	1980/2015	49 km vers NE
Azzaba	892.3	391.35	91	1980/2015	35 Km vers NO
Ain Charchar	909.5	393.2	34	1980/2015	20 Km vers SO

2.1. Analyse des précipitations

La précipitation est la quantité d'eau météorique, totale, liquide ou solide qui tombe sur une surface horizontale déterminée, appelée "section pluviométrique" (M. Sorre, 1943). La pluie est un facteur climatique très important conditionnant l'écoulement saisonnier et par conséquent le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes.

La variabilité interannuelle des précipitations est exprimée par le coefficient pluviométrique (CP).

Le coefficient pluviométrique permet de déterminer pour une station donnée si l'année est excédentaire ou déficitaire. L'année est d'autant plus excédentaire que $H > 1$. Si $H < 1$, l'année correspondante est déficitaire.

Tableau 3 : Coefficient pluviométrique des stations de Skikda, Ain Charchar et Azzaba (1980/2015)

Année / Station	Skikda	A. Charchar	Azzaba	H_Skikda	H_A. Charchar	H_Azzaba
1980-1981	861	655,9	477,9	1,10	0,79	0,69
1981-1982	811,5	659,8	678,9	1,04	0,80	0,98
1882-1983	675,8	575,7	653,6	0,86	0,70	0,95
1983-1984	884,9	841,9	821,8	1,13	1,02	1,19
1984-1985	1034	976,5	884,2	1,32	1,18	1,28
1985-1986	613	491,9	475,7	0,78	0,59	0,69
1986-1987	1025	981,1	978,3	1,31	1,19	1,42
1987-1988	601	530,3	619,1	0,77	0,64	0,90
1988-1989	627	574,2	645,7	0,80	0,69	0,94
1989-1990	701	579,9	528,9	0,90	0,70	0,77
1990-1991	888	793	865,8	1,14	0,96	1,26
1991-1992	804	707,4	638,1	1,03	0,85	0,92
1992-1993	633	652,7	575,7	0,81	0,79	0,83
1993-1994	692	625,1	581,5	0,89	0,76	0,84
1994-1995	753,5	614,2	653	0,96	0,74	0,95
1995-1996	685,8	649,68	597,1	0,88	0,78	0,87
1996-1997	518,5	346,2	334,8	0,66	0,42	0,49
1997-1998	1032,9	962,4	907,3	1,32	1,16	1,32
1998-1999	690,1	691,9	1021,6	0,88	0,84	1,48
1999-2000	683,6	541,1	420,9	0,87	0,65	0,61
2000-2001	537,7	764,7	505	0,69	0,92	0,73
2001-2002	578,4	620	314,3	0,74	0,75	0,46
2002-2003	1119,9	1113,4	835,9	1,43	1,34	1,21
2003-2004	840,5	1164,8	588	1,08	1,41	0,85
2004-2005	1162,3	1118,2	937,1	1,49	1,35	1,36
2005-2006	594	610,2	510	0,76	0,74	0,74
2006-2007	694,6	894,5	698,8	0,89	1,08	1,01
2007-2008	663,6	1229,7	504,5	0,85	1,49	0,73
2008-2009	978,9	1062,4	501,2	1,25	1,28	0,73
2009-2010	959,2	1282,4	623,3	1,23	1,55	0,90
2010-2011	835,2	1249,5	842,1	1,07	1,51	1,22
2011-2012	816,75	1127,1	890,63	1,05	1,36	1,29
2012 -2013	760,09	1149,5	945,96	0,97	1,39	1,37
2013-2014	620,13	965,44	886,97	0,79	1,17	1,29
2014-2015	978,11	1172,85	1201,7	1,25	1,42	1,74

Le terme H est défini par le rapport de la pluviométrie P d'une année à la pluviométrie moyenne \bar{P} pour une période de n années;

$$H = P / \bar{P}$$

Avec:

H : coefficient pluviométrique;

P : pluviométrie d'une année en mm;

\bar{P} : Pluviométrie moyenne en mm.

L'étude de l'évolution interannuelle des trois stations pour la période 1980/2015, a mis en évidence 16 années excédentaires aux stations de Skikda et Ain Charchar, et 14 ans à la station d'Azzaba.

L'année (2009-2010) est la plus pluvieuse avec 1282,4 mm enregistrée à la station de Skikda avec un coefficient pluviométrique de 1,55, et l'année (1980-1981) est la plus sèche avec 477,9 mm enregistrée à la station d'Azzaba avec un coefficient pluviométrique de 0,69.

2.1.1. Calcul de la lame d'eau moyenne précipitée

En climat méditerranéen, la moyenne pluviométrique ne reflète pas la réalité climatique, pourtant sa détermination demeure nécessaire pour l'étude de l'abondance fluviale et permet de cerner la variabilité des précipitations sur de longues séries d'observations.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour le calcul de la lame d'eau précipitée (ARITHMETIQUE et THEISEN). Selon la première méthode la lame d'eau moyenne précipitée est égale à :

$$\bar{P}_i = \frac{\sum P_i}{n}$$

\bar{P}_i : Précipitation annuelle moyenne pour chaque poste pluviométrique en mm;

n : nombre de poste.

Pour la période 1980-2015 nous obtenons une moyenne annuelle de la lame tombée de l'ordre de 766,43 mm/an.

2.1.2. Variations des précipitations dans le temps

2.1.2.1. Variations annuelles

Les hauteurs des pluies moyennes annuelles enregistrées par les trois stations sur une période d'observation de 35 ans, sont représentées dans (Fig. 6). On remarque que les hauteurs maximales des précipitations atteignent 1282,4 mm au niveau de la station d'Ain Charchar au cours de l'année 2014/2015 tandis que les hauteurs minimales de l'ordre de 334,8 mm ont été enregistrées à la station d'Azzaba en 1980/1981.

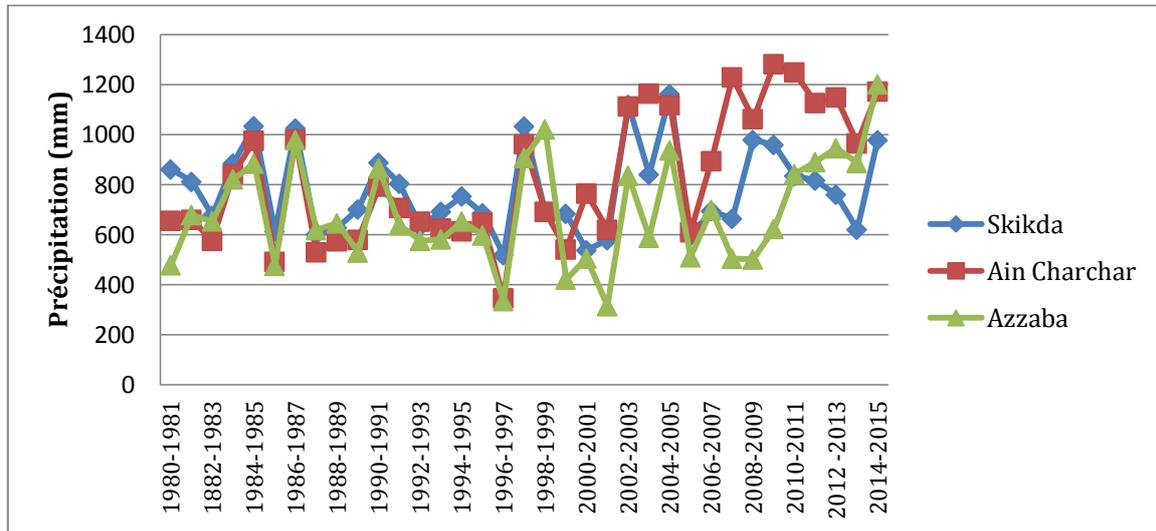


Figure 6 : Variations des précipitations moyennes annuelles pour les stations de Skikda, Ain Charchar et Azzaba (1980-2015)

2.1.2.2. Variations moyennes mensuelles

La précipitation moyenne mensuelle nous permet de donner un aperçu sur les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations en se basant sur des calculs de la moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations du mois considéré pour un nombre d'années quelconques. Les hauteurs des pluies moyennes mensuelles enregistrées durant la période d'observation (1980 - 2015) sont illustrées dans le tableau 5.

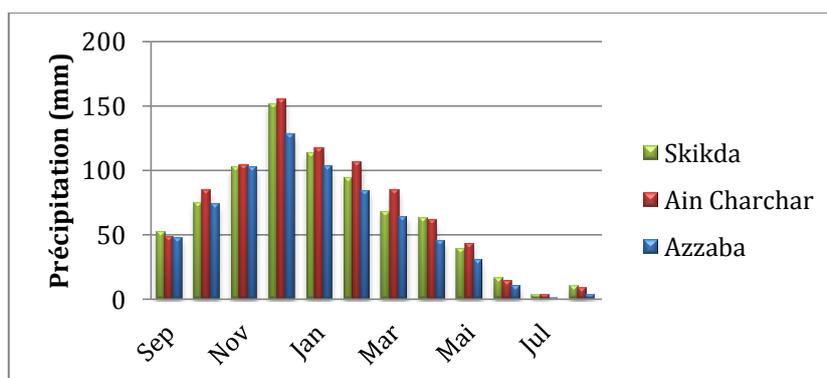
L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles (Fig.7) des trois stations, (Skikda, Ain Charchar et Azzaba), montre un accroissement des précipitations allant du mois de Septembre jusqu'au mois de Décembre ou atteindre les valeurs maximum 151.4 mm, 155,11 mm et 127,25 mm successivement. A partir du mois de Janvier débute la baisse des précipitations qui se poursuit jusqu'au mois d'Août. Les valeurs minimum sont marquées au mois de Juillet ou les précipitations sont presque nulles 0,7 mm pour la station d'Azzaba et plus ou moins de 3 mm pour les stations de Skikda et Ain Charchar.

Tableau 4 : Précipitations moyennes annuelles en mm (1980/2015)

Année / Station	Skikda	Ain Charchar	Azzaba	Année / Station	Skikda	Ain Charchar	Azzaba
1980-1981	861	655,9	477,9	1998-1999	690,1	691,9	1021,6
1981-1982	811,5	659,8	678,9	1999-2000	683,6	541,1	420,9
1882-1983	675,8	575,7	653,6	2000-2001	537,7	764,7	505
1983-1984	884,9	841,9	821,8	2001-2002	578,4	620	314,3
1984-1985	1034	976,5	884,2	2002-2003	1119,9	1113,4	835,9
1985-1986	613	491,9	475,7	2003-2004	840,5	1164,8	588
1986-1987	1025	981,1	978,3	2004-2005	1162,3	1118,2	937,1
1987-1988	601	530,3	619,1	2005-2006	594	610,2	510
1988-1989	627	574,2	645,7	2006-2007	694,6	894,5	698,8
1989-1990	701	579,9	528,9	2007-2008	663,6	1229,7	504,5
1990-1991	888	793	865,8	2008-2009	978,9	1062,4	501,2
1991-1992	804	707,4	638,1	2009-2010	959,2	1282,4	623,3
1992-1993	633	652,7	575,7	2010-2011	835,2	1249,5	842,1
1993-1994	692	625,1	581,5	2011-2012	816,75	1127,1	890,63
1994-1995	753,5	614,2	653	2012 -2013	760,09	1149,5	945,96
1995-1996	685,8	649,68	597,1	2013-2014	620,13	965,44	886,97
1996-1997	518,5	346,2	334,8	2014-2015	978,11	1172,85	1201,7
1997-1998	1032,9	962,4	907,3				

Tableau 5 : Précipitations moyennes mensuelles en mm (1980/2015)

Station \ Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Skikda	51,4	74,2	102,5	151,4	113,3	94,2	67,6	63,0	39,2	15,6	2,9	9,7
Ain Charchar	47,99	84,38	103,91	155,11	117,14	105,94	84,09	61,14	42,91	13,66	3,21	8,49
Azzaba	47,11	73,27	102,32	127,25	103,23	83,94	63,80	44,83	29,87	10,32	0,70	3,31

**Figure 7 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles aux stations de Skikda, Ain Charchar et Azzaba (1980/2015)**

2.1.2.2.1 Calcul des valeurs caractéristiques

Les irrégularités interannuelles des précipitations sont traduites par le coefficient de variation (cv) égale au rapport de l'écart type à la moyenne.

Tableau 6 : Valeurs caractéristiques des séries pluviométriques

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Station de Skikda												
Moyenne	51,38	74,16	102,46	151,41	113,31	94,24	67,61	63,02	39,21	15,60	2,94	9,73
Min	0	2	6	30	21	1	0	13	2	0	0	0
Max	203	203,5	248	343	276	246	172	148	129,2	87	22,1	64
Ecartype	39,53	48,88	67,31	72,65	60,71	55,43	39,19	38,52	31,18	17,10	4,65	14,53
CV	0,77	0,66	0,66	0,48	0,54	0,59	0,58	0,61	0,80	1,10	1,58	1,49
Station A. Charchar												
Moyenne	47,99	84,38	103,91	155,11	117,14	105,94	84,09	61,14	42,91	13,66	3,21	8,49
Min	2,00	0,00	14,10	15,50	20,50	0,50	1,20	3,20	0,00	0,00	0,00	0,00
Max	173,00	273,00	295,20	348,10	277,50	341,50	311,10	217,10	121,50	69,00	26,00	42,50
Ecartype	39,99	69,24	66,73	84,93	66,82	78,07	62,51	46,58	34,48	17,92	5,42	11,08
CV	0,83	0,82	0,64	0,55	0,57	0,74	0,74	0,76	0,80	1,31	1,69	1,31
Station d'Azzaba												
Moyenne	47,11	73,27	102,32	127,25	103,23	83,94	63,80	44,83	29,87	10,32	0,70	3,31
Min	0,00	2,10	3,60	1,30	15,90	7,90	6,30	5,90	0,30	0,00	0,00	0,00
Max	198,00	252,39	343,70	302,60	269,40	264,80	199,40	156,30	100,40	52,00	8,90	26,20
Ecartype	52,28	66,86	84,18	66,84	53,86	62,81	41,71	31,09	25,60	13,54	1,71	6,00
CV	1,11	0,91	0,82	0,53	0,52	0,75	0,65	0,69	0,86	1,31	2,43	1,81

Le coefficient de variation : $cv = \frac{\sigma P}{P}$ avec :

$$\text{Ecart type : } \sigma P = \sqrt{\frac{\sum (P_i - \bar{P})^2}{n}}$$

Pour $n > 30$

La moyenne : $\bar{P} = \frac{\sum P_i}{n}$

Taille de l'échantillon n .

La variabilité interannuelle des modules pluviométriques est bien exprimée par le coefficient de variation (Cv) traduisant la dispersion relative des pluies. Les valeurs du coefficient de variation relatives à la période (1980-2015) pour les stations de Skikda, Ain Charchar, et Azzaba, oscillent entre 0,22 et 0,32 ce qui implique une variabilité faible dans l'ensemble, par rapport à la variabilité des précipitations mensuelles.

Tableau 7 : Les irrégularités interannuelles des précipitations

Stations	Skikda	Ain Charchar	Azzaba
Moyenne	781,57	827,87	689,87
Min	518,50	346,20	314,30
Max	1162,30	1282,40	1201,70
Ecartype	171,99	261,24	209,51
CV	0,22	0,32	0,30

2.1.2.3. Variations des précipitations saisonnières

Les quatre saisons de l'année sont :

- L'automne (septembre, octobre et novembre) ;
- L'hiver (décembre, janvier et février) ;
- Le Printemps (mars, avril et mai) ;
- L'été (juin, juillet et août).

La répartition des précipitations selon les saisons est illustrée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8 : Répartition saisonnière des précipitations en (mm)

Station / Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Ain Charchar	236			378			188			25		
Azzaba	223			314			139			14		
Skikda	228			359			170			28		
Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté		

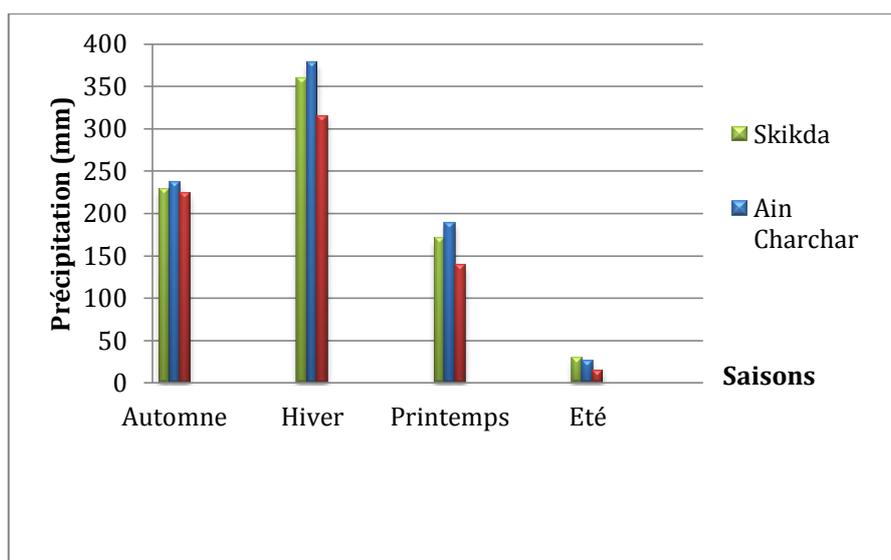


Figure 8 : Variations moyennes saisonnières des précipitations aux stations de Skikda, Ain Charchar et Azzaba

Les résultats présentés dans (Tab.8) montrent que l'hiver est la saison la plus pluvieuse pour les trois stations Skikda, Ain Charchar et Azzaba avec des taux variant de 45 % à 47 %. L'été correspond à la saison sèche avec des pourcentages variant entre 2 % et 4 %. L'automne est une saison légèrement pluvieuse pour les trois stations.

2.2. Les températures

La température de l'aire est un facteur de grande influence sur le bilan hydrique du fait qu'il conditionne l'évaporation. Elle varie sous l'influence de plusieurs facteurs telle que l'altitude par un gradient thermique varie selon SELTZER de (-0,5 °c) chaque fois qu'on monte plus de 100 m, ainsi que l'influence des océans.

2.2.1. Les températures moyennes mensuelles

L'analyse des données de la température est basée sur les données relevées au niveau des trois stations Skikda, Ain Charchar et Azzaba pour la période de 1980-2015.

Tableau 9 : Températures moyennes mensuelles (1980-2015)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T (°C) _Skikda	24	21	17	14	13	13	14	16	19	22	25	26
T (°C) _A. Charchar	24	20	16	12	11	11	13	15	18	22	25	26
T (°C) _Azzaba	27	23	18	15	15	15	17	19	22	25	28	29

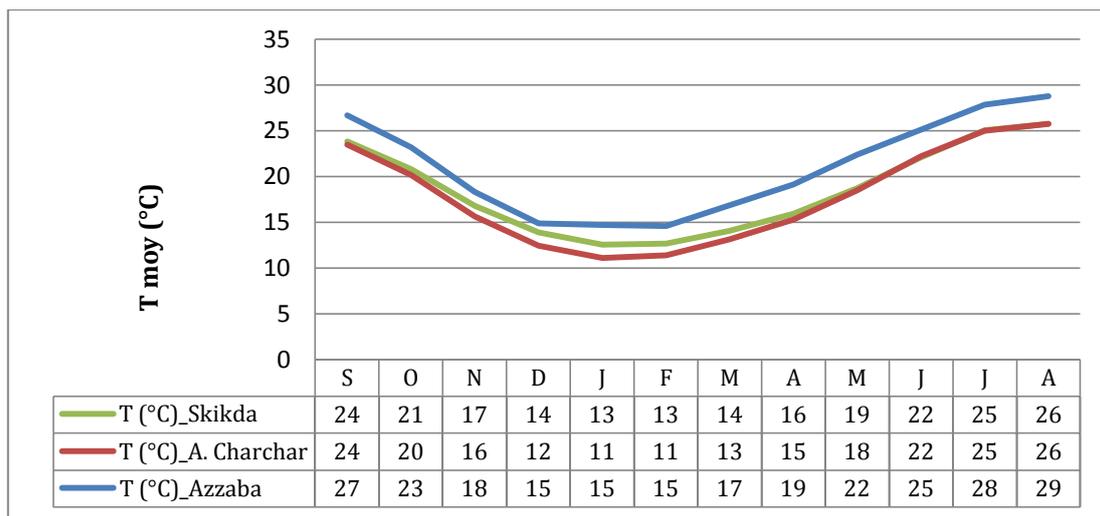


Figure 9 : Variations moyennes mensuelles des températures en (°C) aux stations de Skikda, Ain Charchar et Azzaba (1980-2015)

L'historique des températures moyennes mensuelles montre une différence assez proche entre les températures des trois stations (Fig. 9).

Les plus faibles valeurs sont mesurées aux mois de décembre, janvier, février et mars où on remarque que les mois les plus froids sont Janvier et Février (avec des températures variant de 11°C à 15°C).

Par contre les plus fortes valeurs caractérisent les mois de Juin, Juillet et Août où on remarque que le mois le plus chaud est le mois d'Août (avec des températures oscillent entre 26°C et 29°C).

2.2.2. Diagrammes Ombro-thermique

On l'appelle aussi les courbes pluviométriques. Elle est représentée graphiquement par la combinaison de deux facteurs, la température (°C) et la précipitation (mm) ; Les températures sont reportées à l'échelle double des précipitations selon la définition de GAUSSEN 1958. Notons qu'une période sèche est une période pendant laquelle les précipitations totales du mois sont inférieures ou égales au double de la température ($P \leq 2T$).

A partir des diagrammes Ombro-thermiques des trois stations, on distingue une saison sèche s'étant de début de Mars au mois d'Octobre et une saison humide allant de Novembre à la fin de Mars, avec une précipitation importante qui atteint son maximum pendant le mois de décembre avec 155,11 mm à la station de Skikda.

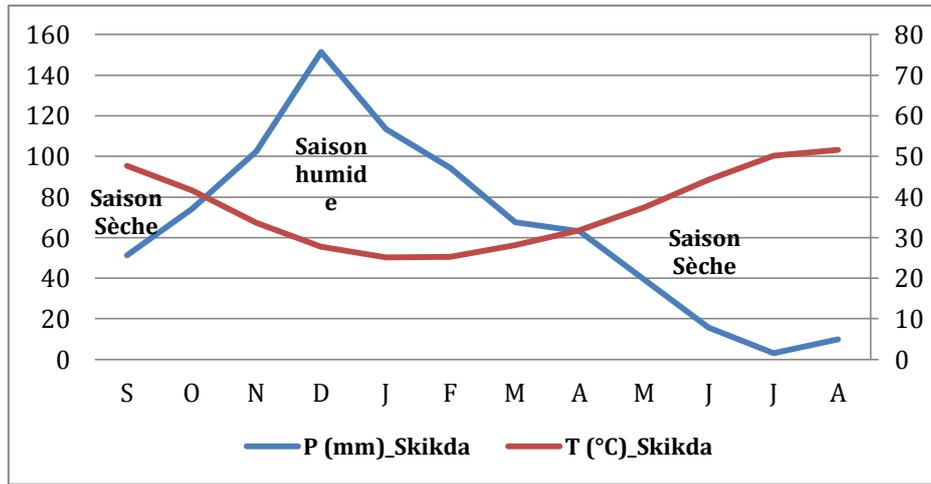


Figure 10 : Diagramme Ombro-thermique de la station de Skikda

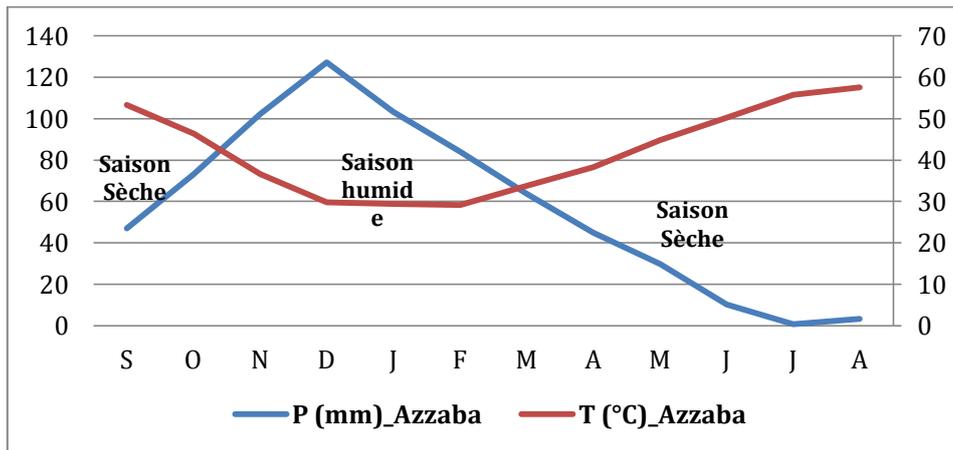


Figure 11 : Diagramme Ombro-thermique de la station d'Azzaba

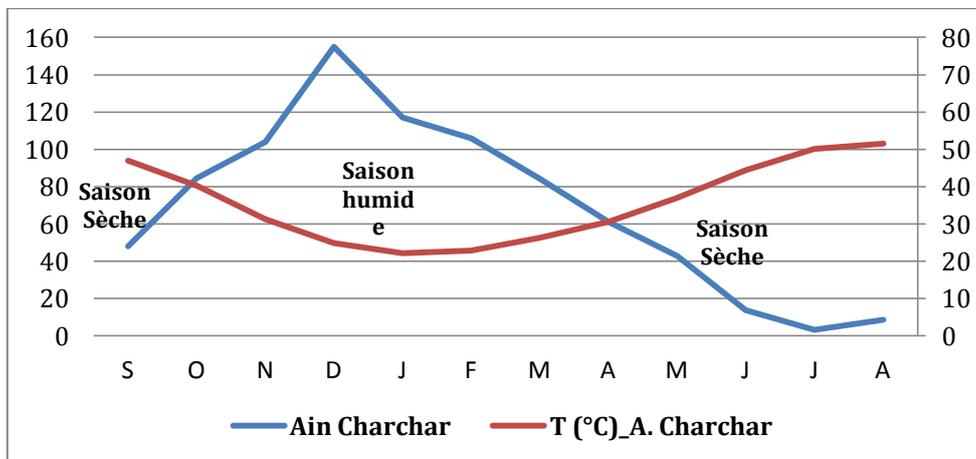


Figure 12 : Diagramme Ombro-thermique de la station d'Ain Charchar

Sur le plan temporel, on constate une nette coïncidence typiquement méditerranéenne entre le maximum thermique et le minimum pluviométrique, ce qui se traduit par une sécheresse marquée ou l'évapotranspiration atteint son maximum.

2.3. Humidité relative

L'humidité relative de l'air montre l'état de l'atmosphère en expliquant s'il est plus ou moins proche de la condensation, elle correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de vapeur saturante à la même température elle est exprimée en %.

Ce paramètre intervient comme coefficient de l'évapotranspiration lorsqu'il est inférieur à 50%.

Le manque des données aux stations d'Azzaba et Ain Charchar nous a conduites à étudier seulement l'humidité relative enregistré à la station de Skikda. Les moyennes mensuelles varient de 74.55 % en hiver au mois de Janvier à 71.85 % en été au mois de Juillet avec une moyenne annuelle de l'ordre de 73.28 % Le tableau ci-après représente les variations moyennes mensuelles d'humidité de la station de Skikda (1980-2013).

Tableau 10 : Moyennes mensuelles d'humidités relatives en (%) à la station de Skikda (1980-2013)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Station de Skikda	73,27	72,78	72,89	73,26	74,55	73,85	73,11	73,05	74,49	73,6	71,85	72,67

2.4. Le vent

Le vent est l'un des éléments les plus déterminants des régimes pluvieux, de l'évaporation et par conséquent du climat.

Les mesures réalisées sur le site d'une durée effective de 15 mois entre janvier 2007 et novembre 2009 (hors période d'été car il n'y a pas eu de mesures), font apparaître des vents de toute provenances, avec prédominance du secteur Est à Sud-est et Nord à Nord-Ouest, ces derniers étant également prépondérants en intensité (vitesse maximale de 2 à 2,5 m/s) (d'après SOGREA ALGERIE).

2.5. Détermination du type du climat (Indice de Martonne E. De)

Emmanuel DE.MARTONNE (1925) a proposé une formule climatologique, appelée indice d'aridité, fonction de la température (T) et des précipitations (P) de la forme:

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

Avec:

A : indice d'aridité annuelle;

P : précipitations moyennes annuelles en mm;

T : températures moyennes annuelles en °C.

Selon DE MARTONNE :

- Si A est inférieur à 5: le climat est hyperaride.
- Si A est compris entre 5 et 10: le climat est très sec.
- Si A est compris entre 10 et 20: le climat est sec.
- Si A est compris entre 20 et 30: le climat est tempéré.
- Si A est supérieur à 30: le climat est humide (l'écoulement est abondant).

Les résultats des calculs sont récapitulés dans le tableau ci-dessous:

Tableau 11 : Indice d'aridité annuelle (D'après la formule DE.MARTONNE)

Stations	P (mm)	T (°C)	A
Skikda	781,57	19	26,95
Ain Charchar	827,87	18	29,57
Azzaba	689,87	21	22,25

Les trois stations montrent que la région d'étude caractérisée par un climat tempéré (pour une valeur comprise entre 20 et 30).

3. Bilan hydrologique

Le bilan permet d'évaluer les apports et les sorties en eau sur une période déterminée. L'évaluation du bilan d'eau est nécessaire aux paramètres physiques du milieu tels que les éléments climatologiques, pédologiques qui interviennent dans le cycle de l'eau.

Le calcul de ce bilan est nécessaire pour mieux définir les besoins globaux et chiffrés du milieu et essentiellement pour l'évaluation du volume des ressources en eau souterraine (infiltration) et de surface (ruissellement).

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

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

Avec :

P : Lamme moyenne précipitée sur le bassin versant en mm

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

I : Infiltration moyenne annuelle (mm).

R : Ruissellement en mm,

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

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

3.1. Estimation des paramètres du bilan

3.1.1. Evapotranspiration

Le terme d'évapotranspiration désigne la quantité de vapeur d'eau rejetée dans l'atmosphère tant par évaporation directe au niveau du sol lui-même que par transpiration des organes aériens des plantes. L'étude de l'évapotranspiration exige que soient définis deux concepts essentiels : l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Cette dernière est apparue en particulier avec les travaux de Thornthwaite et se définit comme représentant la quantité d'eau disponible sous forme d'humidité du sol, suffisante pour que les plantes puissent maintenir leur taux de transpiration à un niveau maximal.

Au cours de travaux sur la croissance des végétaux, Thornthwaite, botaniste et climatologue Américain (*in* Brochet & Gerbier, 1975), avait noté que les échanges d'eau entre la plante et l'atmosphère conditionnaient pour une grande part la croissance du tissu végétal.

L'évapotranspiration potentielle correspond à une alimentation hydrique optimale des végétaux.

Pour le calcul de l'évapotranspiration, nous pouvons utiliser l'une des méthodes suivantes :

➤ la méthode Thornthwaite (1948), Thornthwaite et Mather (1955) ont relié l'évapotranspiration potentielle (ETP) à des paramètres facilement accessibles : la température moyenne de l'air et la durée théorique de l'insolation.

➤ la méthode de Penman (1950) prend en compte quatre facteurs principaux qui agissent sur l'ETP : la température de l'air, la radiation, l'humidité et le vent.

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

Le bilan hydrologique d'un bassin versant est une méthode de calcul qui permet d'apprécier les relations entre apports et sorties d'eau, sur une période de temps déterminée, qui correspond à une année hydrologique complète. Il sert à vérifier la cohérence de l'ensemble des données recueillies et calculées : mesure de précipitation, calcul d'évapotranspiration, mesure de l'écoulement moyen.

Le non-équipement des stations météorologiques utilisées pour la détermination de certains paramètres, nous oblige à utiliser seulement deux méthodes (Thornthwaite et Turc) basée sur les données fournies.

3.1.1.1. Evapotranspiration potentiel ETP (methode de Thornthwaite)

Cette méthode nous permet à partir des données de base (précipitation, température, le coefficient thermique mensuel (K) et l'indice thermique mensuel (i) de calculer l'évapotranspiration potentielle selon la relation suivante :

$$ETP = 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{t}{I} \right)^a \cdot k ; I = \sum_1^{12} i$$

$$\text{Avec } i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.5} \text{ et } a = \frac{1,6}{100} I + 0,5$$

t est la température moyenne mensuelle du mois considéré ;

ETP est l'évapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau) ;

K est un coefficient d'ajustement mensuel.

Le principe de calcul du bilan hydrologique de Thornthwaite est le suivant :

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

➤ si $P < ETP$, la valeur de $ETR = P + RFU$, jusqu'à égalisation avec ETP. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole $DA = ETP - ETR$, ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation.

3.1.1.2. L'évapotranspiration réel ETR (Formule de Turc)

Cette formule consiste à évaluer directement l'évapotranspiration réelle à partir de la hauteur moyenne de la pluie et de la température moyenne annuelle.

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

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (2)$$

ETR : évapotranspiration réelle en (mm).

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

L : paramètre arbitraire lié à la température.

T : température moyenne annuelle en (°C).

Tableau 12 : L'évapotranspiration réelle selon la formule de Turc

Paramètres	Skikda	Ain Charchar	Azzaba
P (mm)	781,57	827,87	689,87
T (°C)	21,00	18,00	19,00
L	1288,05	1041,60	1117,95
ETR (mm/an)	694,03	668,92	609,57

L'ETR est également calculée par la méthode du bilan hydrique mensuelle de C.W.Thornthwaite, qui est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (RFU), cette eau peut être reprise par l'évaporation par l'intermédiaire des plantes. Pour notre cas la région de Boumaiza on prend $RFU = 100$ mm. La satisfaction de l'ETP est prioritaire sur l'écoulement,

c'est-à-dire avant qu'il y ait écoulement il faut avoir satisfait ce qu'on appelle le pouvoir évaporant (ETP = ETR), par ailleurs le remplissage de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement. On établit alors un bilan à échelle mensuelle à partir de la pluie du mois, de l'ETP et la RFU. Les résultats sont présentés dans les tableaux 15, 16 et 17.

3.1.2. Le ruissellement

Le ruissellement de surface est la quantité d'eau au cours d'une précipitation, échappée à l'infiltration et à l'évaporation. Le coefficient de ruissellement R a été estimé avec la formule de Tixeront-Berkaloff :

$$R = P^3/3(ETP)^2 \quad \text{quand : } P < 600 \text{ mm.}$$

$$R = P^3/3 \quad \text{quand : } P > 600 \text{ mm.}$$

Avec :

R : ruissellement en mm.

P : précipitation moyenne mensuelle en mm.

ETP : évapotranspiration potentielle.

Selon les trois stations pluviométrique, $P > 600$ mm ; alors on va utiliser la deuxième formule. Les résultats de ruissellement calculé à partir de cette formule sont représentés dans le tableau 12.

Tableau 13 : Le ruissellement selon la formule de Turc

Paramètre	Skikda	Ain Charchar	Azzaba
P (mm)	781,57	827,87	689,87
R (mm)	159,14	189,13	109,44
R %	20,36	22,84	15,86

3.1.3. L'infiltration

L'infiltration est un paramètre très important dans le bilan hydrique, est définie comme étant le mouvement de l'eau dans un sol en passant par la surface, elle dépend de plusieurs facteurs, les plus importants sont :

- ✓ La nature de sol,

- ✓ La perméabilité et la porosité.
- ✓ La couverture végétale.

Elle est calculée à partir du bilan hydrique, en remplaçant chacun des termes par sa valeur trouvée :

$$I = P - R - ETR$$

Avec :

R : ruissellement en mm.

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

I : Infiltration en mm.

Si $I > 0$: Les entrées sont supérieures aux sorties.

Si $I < 0$: Les entrées sont inférieures aux sorties.

Tableau 14 : Détermination des paramètres de la formule du bilan hydrique

Paramètre	Stations		
	Skikda	Ain Charchar	Azzaba
P (mm)	781,57	827,87	689,87
ETR (mm/an)	518,69	494,68	480,86
R (mm)	159,14	189,13	109,44
I (mm)	103,74	144,06	99,57

Tableau 15 : Bilan hydrologique pour la station d'Ain Charchar d'après la méthode de C.W.

Thornthwaite

Période	P (mm)	T (°C)	<i>i</i>	K	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
S	47,99	24	10,75	1,03	113,88	47,99	0,00	65,89	0,00
O	84,38	20	8,16	0,97	76,50	76,50	7,88	0,00	0,00
N	103,91	16	5,82	0,86	44,85	44,85	66,94	0,00	0,00
D	155,11	12	3,76	0,81	24,79	24,79	100,00	0,00	97,26
J	117,14	11	3,30	0,87	22,66	22,66	100,00	0,00	94,48
F	105,94	11	3,30	0,85	22,14	22,14	100,00	0,00	83,80
M	84,09	13	4,25	1,03	36,56	36,56	100,00	0,00	47,53
A	61,14	15	5,28	1,10	50,91	50,91	100,00	0,00	10,23
M	42,91	18	6,95	1,21	78,50	78,50	64,41	0,00	0,00
J	13,66	22	9,42	1,22	114,80	78,07	0,00	36,73	0,00
J	3,21	25	11,44	1,24	147,87	3,21	0,00	144,66	0,00
A	8,49	26	12,13	1,16	148,75	8,49	0,00	140,26	0,00
Année	827,97	17,75	84,56	-	882,21	494,68	-	387,54	333,29

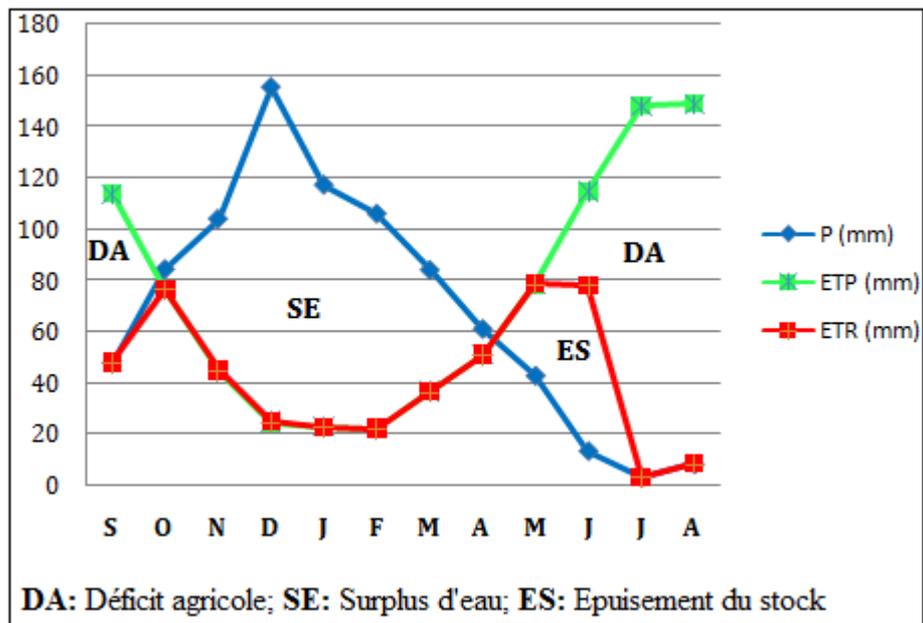


Figure 13 : Bilan d'eau (Station d'Ain Charchar 1980-2015)

Tableau 16 : Bilan hydrologique pour la station de Skikda d'après la méthode de C.W.

Thornthwaite

Période	P (mm)	T (°C)	<i>i</i>	K	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
S	51,40	24,00	10,75	1,03	110,32	51,40	0,00	58,92	0,00
O	74,20	21,00	8,78	0,97	80,13	74,20	0,00	5,93	0,00
N	102,50	17,00	6,38	0,86	47,11	47,11	55,39	0,00	0,00
D	151,40	14,00	4,75	0,81	30,42	30,42	100,00	0,00	76,37
J	113,30	13,00	4,25	0,87	28,29	28,29	100,00	0,00	85,01
F	94,20	13,00	4,25	0,85	27,64	27,64	100,00	0,00	66,56
M	67,60	14,00	4,75	1,03	38,68	38,68	100,00	0,00	28,92
A	63,00	16,00	5,82	1,10	53,56	53,56	100,00	0,00	9,44
M	39,20	19,00	7,55	1,21	82,28	82,28	56,92	0,00	0,00
J	15,60	22,00	9,42	1,22	110,33	72,52	0,00	37,81	0,00
J	2,90	25,00	11,44	1,24	143,78	2,90	0,00	140,88	0,00
A	9,70	26,00	12,13	1,16	145,16	9,70	0,00	135,46	0,00
Année	785,00	18,67	90,27	-	897,70	518,69	-	379,01	266,31

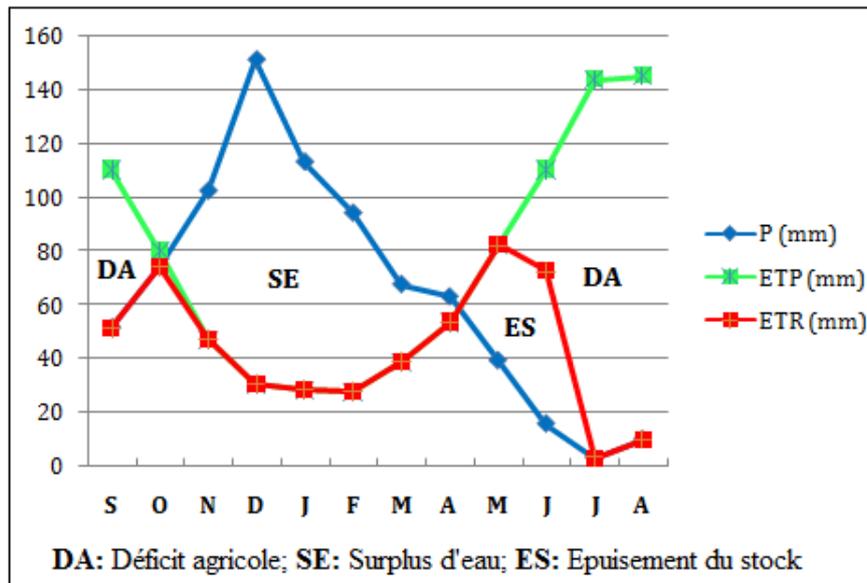


Figure 14 : Bilan d'eau (Station de Skikda 1980-2015)

Tableau 17 : Bilan hydrologique pour la station d'Azzaba d'après la méthode de C.W.

Thornthwaite

Période	P (mm)	T (°C)	<i>i</i>	K	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
S	47,11	27,00	12,85	1,03	126,64	47,11	0,00	79,53	0,00
O	73,27	23,00	10,08	0,97	83,35	73,27	0,00	10,08	0,00
N	102,32	18,00	6,95	0,86	42,74	42,74	59,58	0,00	0,00
D	127,25	15,00	5,28	0,81	26,78	26,78	100,00	0,00	60,05
J	103,23	15,00	5,28	0,87	28,77	28,77	100,00	0,00	74,46
F	83,94	15,00	5,28	0,85	28,11	28,11	100,00	0,00	55,83
M	63,80	17,00	6,38	1,03	45,05	45,05	100,00	0,00	18,75
A	44,83	19,00	7,55	1,10	61,68	61,68	83,15	0,00	0,00
M	29,87	22,00	9,42	1,21	94,15	94,15	18,87	0,00	0,00
J	10,32	25,00	11,44	1,22	126,30	29,19	0,00	97,11	0,00
J	0,70	28,00	13,58	1,24	165,36	0,70	0,00	164,66	0,00
A	3,31	29,00	14,32	1,16	167,31	3,31	0,00	164,00	0,00
Année	689,95	21,08	108,39	-	996,24	480,86		515,38	209,09

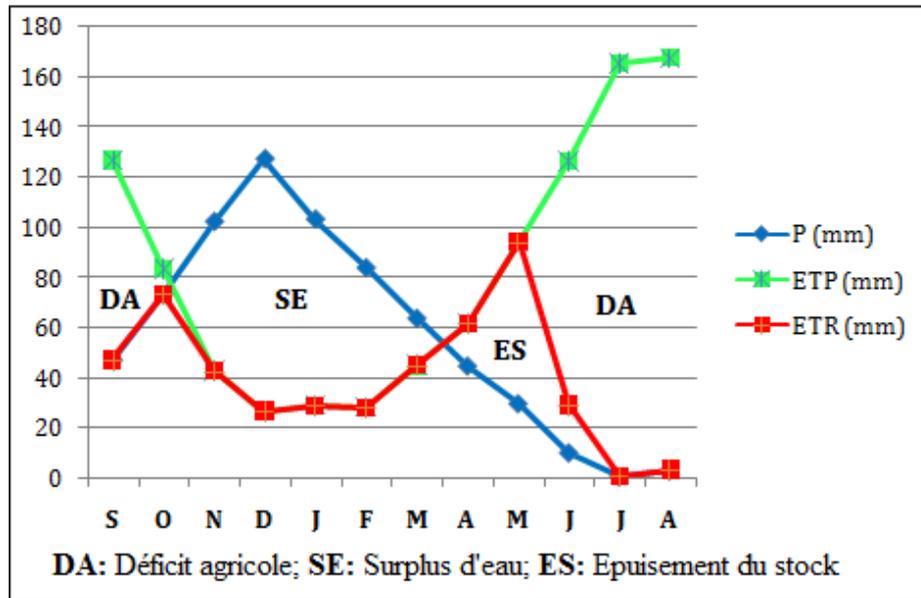


Figure 15 : Bilan d'eau (Station d'Azzaba 1980-2015)

3.1.4 Interprétation du bilan hydrique

❖ Généralement, quand le RFU est totale, on remarque un surplus d'eau accompagné par un ruissellement jusqu'à la fin du mois de Mars. A partir du mois d'Avril, le RFU commence à diminuer ce qui engendre un épuisement du stock jusqu'à mois de juin ou il devient nul et commence la période de déficit agricole qui nécessite l'irrigation (saison agricole pour la région de Boumaiza) qui s'étend jusqu'à le mois d'Octobre.

❖ L'évapotranspiration potentielle (ETP) dans les trois stations (Azzaba, Ain Charchar et Skikda) atteint son maximum au mois d'Aout (145,4 mm à 167,3 mm) et son minimum au mois de Janvier (22,14 mm à 28,11 mm).

❖ L'Excédent annuelle est de l'ordre de 333,29 mm, 266,31 mm et de 209,9 mm successivement pour les trois stations d'Ain Charchar, Skikda et Azzaba.

4. Conclusion

L'ensemble des données climatiques permet d'attribuer à la région de Boumaiza un climat tempéré méditerranéen, caractérisé par deux saisons distinctes, l'une humide et pluvieuse allant du fin de moi d'Octobre au début du mois de Mars et l'autre sèche et chaude allant du mois de Mars jusqu'à la fin du mois de Novembre.

Les moyennes annuelles des précipitations varient entre 827,87 mm et 689,86 mm, sous une température moyenne annuelle oscille de 18 °C à 21 °C.

La formule du bilan de Thornthwaite, montre que l'évapotranspiration réelle ETR représente 60 % à 70 % des précipitations à travers les trois stations, et environ de 30 % à 40% d'excédent qui se traduit plus tard en infiltration efficace prouvée par plusieurs auteurs.

CHAPITRE IV

HYDROGEOLOGIE

1. Introduction

Les eaux du système aquifère de Boumaiza constituent la principale ressource pour la population de la région ainsi que d'autres villages voisins. Ces régions ont été marquées par une sécheresse importante et une demande en eau croissante vis-à-vis l'accroissement de population et l'augmentation de l'activité agricole et industrielle, ce qui a eu pour conséquence une sollicitation accrue des nappes. Pour bien gérer cette ressource une étude hydrogéologique du système aquifère s'impose. Cette étude débutera par la détermination de l'extension des aquifères, elle sera suivie par l'interprétation des données piézométriques et couronnée par l'estimation des caractéristiques hydrodynamiques, le tout nous permettra de dresser l'état des nappes vis-à-vis de la demande.

La détermination des caractéristiques hydrogéologiques est très importante pour la connaissance des caractéristiques des aquifères. Cependant, elle reste tributaire des informations recueillies à partir du dépouillement des travaux réalisés. Pour palier à l'insuffisance des informations, nous avons combiné les résultats obtenus à partir des données de forages et ceux issues de l'étude géophysique.

2. Géométrie de l'aquifère

La région de Boumaiza fait partie de la vallée de l'oued Kébir Ouest (la partie S-SE). Dans le cadre de l'étude du remplissage Plio-quadernaire de ce dernier, nous présentons les résultats de la campagne géophysique Bulgar Strojexport réalisée dans la région d'étude entre le 1^{er} Octobre 1975 et le 20 Mars 1976 et supervisée par la direction des études du milieu et de la recherche hydraulique d'Alger.

L'objectif principal de cette étude est la détermination de l'épaisseur et la qualité du remplissage alluvial, la nature du substratum et les zones favorable à l'implantation des ouvrages de captage des eaux souterraines.

Les travaux comportent 200 sondages électriques dans la plaine alluviale en quadrillage 1000×1000 avec une longueur AB=1000 m. Cette configuration initiale a été remplacée par des sondages électriques tous les 500 m sur des profils distants de 2 km.

2.1. Interprétation des résultats

Les mesures réalisées dans les forages ont permis de déterminer la résistivité des différentes couches lithologiques (Fig.16). Ce sont ces valeurs qui ont permis d'identifier, lors de l'interprétation des sondages électriques, les divers horizons et d'établir aussi la carte des épaisseurs des alluvions.

Tableau 18 : Résistivités et signification lithologique des sondages électriques dans la plaine de Hadjar Essoud

Résistivité en ohm.m	Nature lithologique
1) Les alluvions	
5	Limons jaunes superficiels
9 à 18	Alternance d'argiles noires et jaunes, d'argile sableuse
18 à 28	Graviers, sables fins et galets aquifères
55 à 65	Micaschistes pyriteux fins altérés
140	Sables dunaires
2) Le substratum	
< 20	Limons et argiles
20 à 30	Substratum poudingue, argile et grés numidiens
30 à 60	Substratum flyschs marno-calcaire du Crétacé ou calcaires altérés du lias.
60 à 100	Substratum calcaire fissuré et karstifié
> 100	Substratum calcaire compact

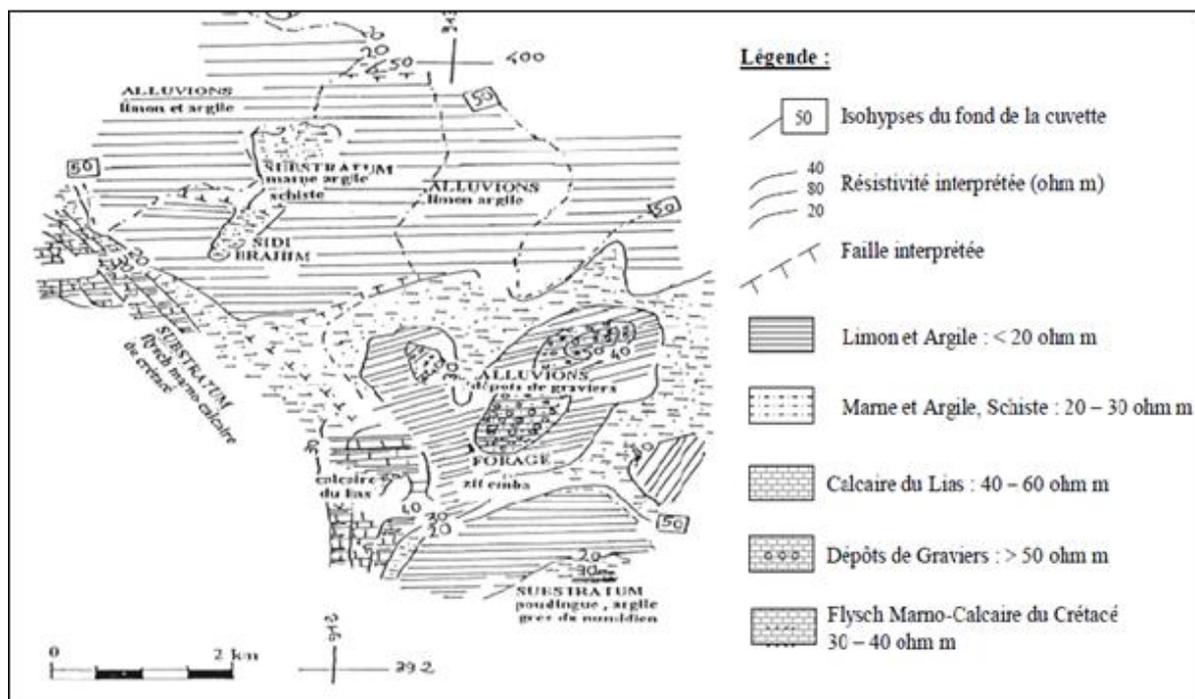


Figure 16 : Carte des résistivités dans la plaine de l'oued Kébir Ouest (Khammar, 1981)

2.1.1. Les alluvions

Les valeurs de résistivité dans la partie orientale sont assez homogènes. Les alluvions d'épaisseur maximale de 110 m ont une résistivité de 40 ohm.m, tandis que dans toute la partie occidentale, elles sont hétérogènes. Les limons, argiles et argiles sableuse (15 à 30 ohm.m) séparent entre les sols argileux en surface (0.5 et 10 ohm.m) et les dépôts de graviers dont les résistivités varient entre 30 et 50 ohm.m.

2.1.2. Le substratum

Le substratum est représenté par les sédiments argilo-gréseux du numidien et du flysch crétacé dont les résistivités évoluent entre 15 et 60 ohm.m et même les calcaires altérés du Lias (30 ohm.m) qui peuvent être confondus avec ces derniers sédiments. Les calcaires du Lias sont caractérisés par des résistivités supérieures à 60 ohm.m.

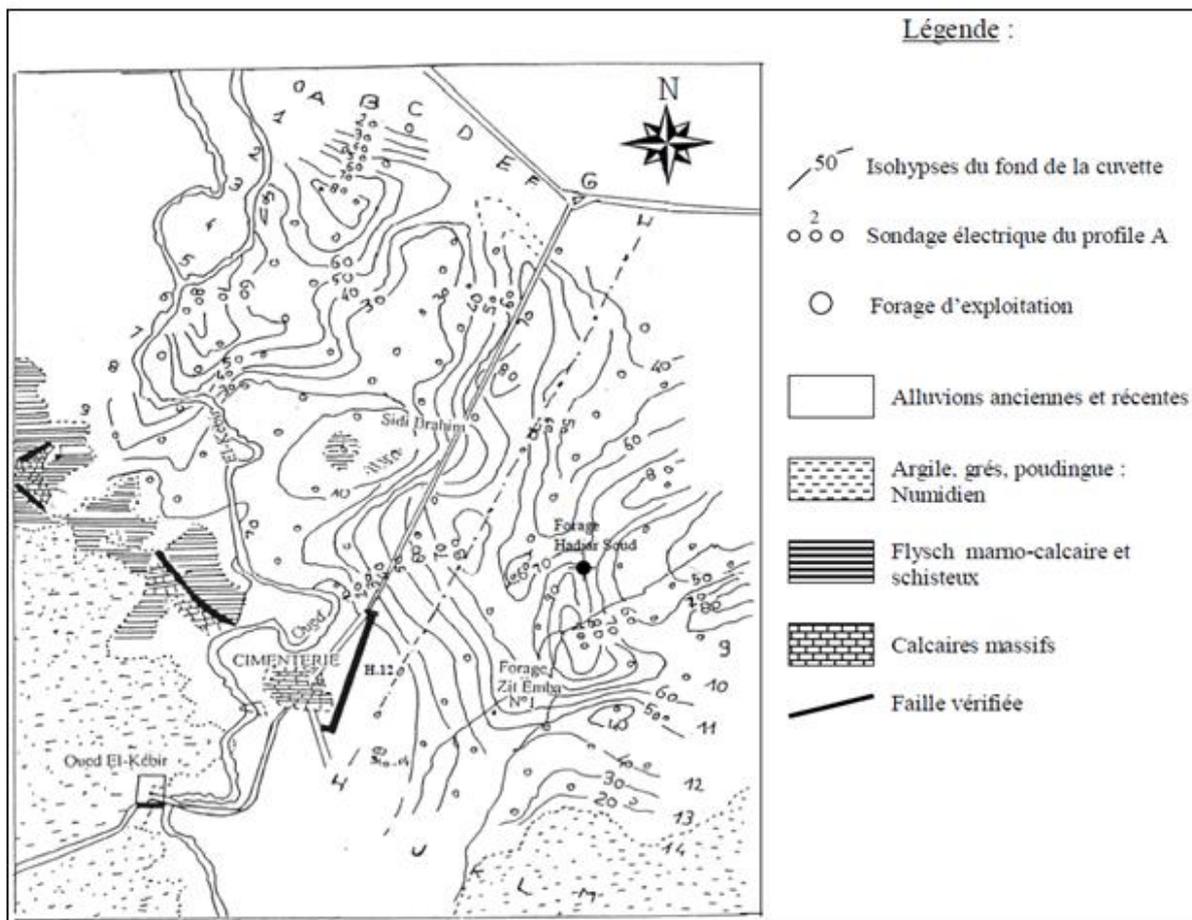


Figure 17 : Carte des épaisseurs des alluvions dans la plaine de l'oued Kébir Ouest (Khammar, 1981)

3. Etude du remplissage Plio-quaternaire de la vallée de l'oued Kébir par les sondages mécaniques

Pour bien confirmer les résultats obtenus par l'interprétation géophysique, nous allons utiliser les coupes géologiques des trois forages implantés dans le même sens que les sondages électriques.

3.1. Forage 1 (Boumaiza)

Le forage est réalisé pour l'alimentation en eau potable de la région de Boumaiza. Il est implanté entre les sondages électriques 4 et 5 (profil B). Le substratum localisé à 80 m par la géophysique se trouve confirmé.

0 - 19.5m : Argiles jaunes et limons ;

19.5 - 47.5m : Argiles sableuses avec des passages graveleux ;

47.5 - 48.5m : Sable jaune moyennement grossier ;

48.5 – 79m : Alluvions grossières ;

79 – 80m : Argile grise.

3.2. Forage de Hadjar Soud

Le forage est réalisé pour l'alimentation en eau potable de la région de Boumaiza à environ 4 Km de la cimenterie. Le manque de contraste géo-électrique entre les sédiments de remplissage alluvial où les argiles sont quasi-présentes soit comme matrice dans le matériel grossier, soit comme horizon intermédiaire

0 – 5 m : Argiles et limons ;

5 – 12 m : Argiles renfermant des petites galets ;

12 - 18 m : Argile jaune ;

18 – 70 m : Galets de grès à matrice argileuse ;

70 – 110 m : Marnes bleues.

3.3. Forage de la cimenterie

Il alimente la cimenterie de Hadjar Soud implanté sur le sondage électrique 14 du profil 1. La corrélation entre la coupe géologique et géo-électrique présente la même succession lithologique. Le substratum situé à une profondeur de 25 m confirme la faible épaisseur du remplissage en ce point et met en évidence le seuil de l'oued Kébir à l'entrée de notre bassin (Khammar, 1981).

0 - 8 m : Argiles brunes à jaunâtres plus au moins granuleuses ;

8 – 25 m : Gravier et sables

25 – 30 m : Argile jaune compacte.

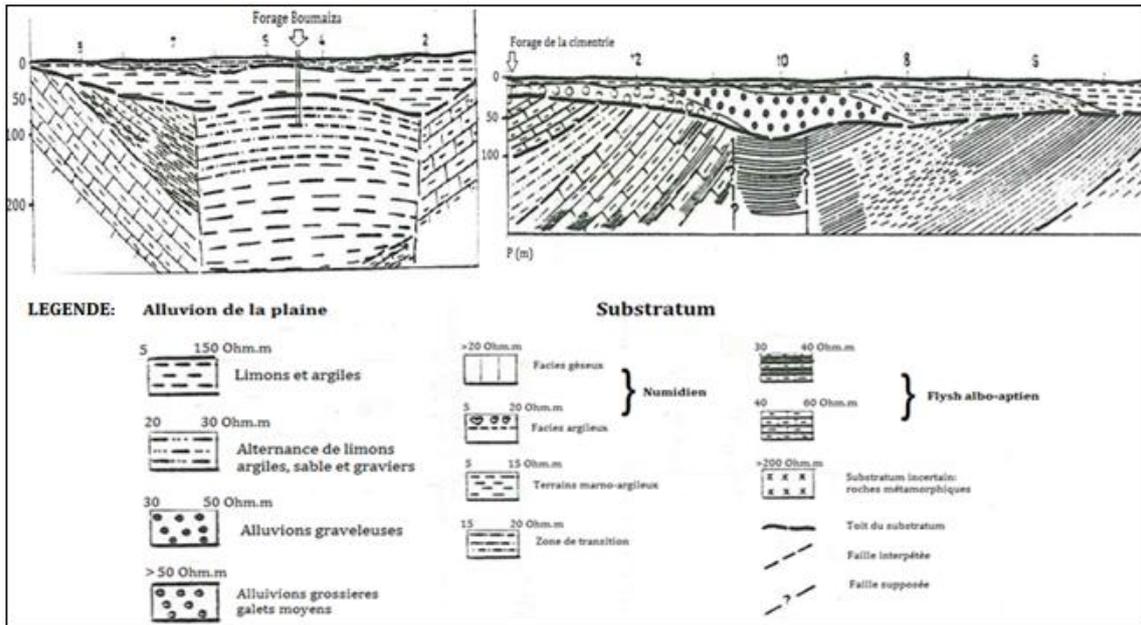


Figure 18 : Coupes géo-électriques au travers de la plaine alluviale de l’oued kébir Ouest

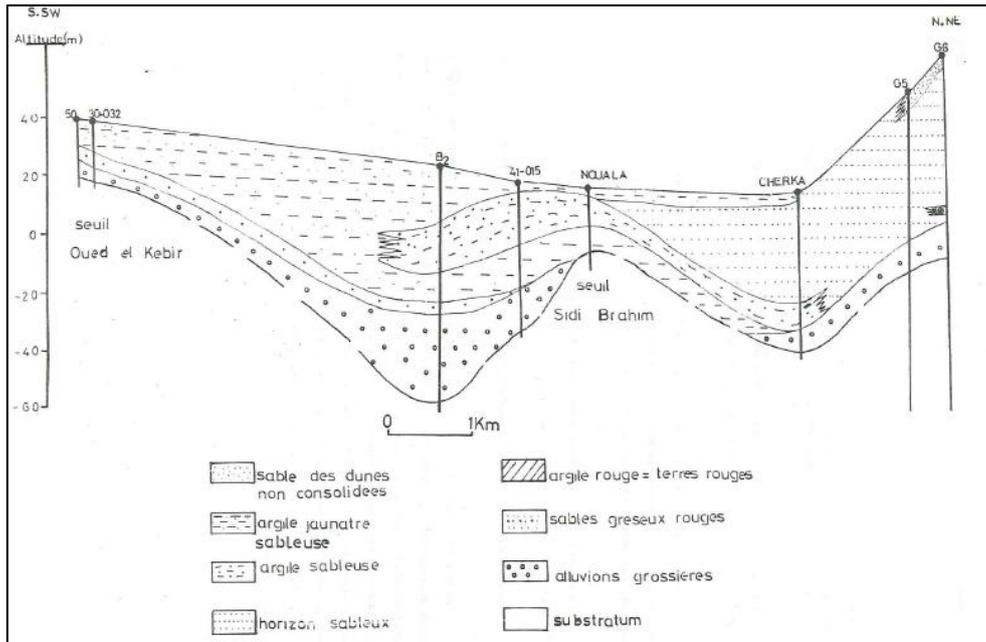


Figure 19 : Coupe interprétative du remplissage Plio-quaternaire d’après les sondages mécaniques

Les résultats obtenus à travers l’interprétation géophysique et les sondages mécaniques montrent une hétérogénéité des dépôts de la région de Boumaiza.

L'horizon imperméable représenté par :

- les calcaire et marnes du Lias et du Crétacé ;
- les formations numidiennes ;
- les roches métamorphiques.

L'horizon perméable représenté par les alluvions grossières et les sédiments sableux caractérisés par des résistivités variant entre 30 et 40 Ohm.m dans la partie S-SE de la plaine alluviale de l'oued Kebir Ouest (la région d'étude).

4. Piézométrie

4.1. Inventaire des points d'eau

4.1.1 Les puits

Près de 50 puits de profondeurs variant entre 10 à 15 m sont implantés dans toute la région d'étude. Ces ouvrages sont utilisés à des fins domestiques puisqu'ils sont implantés dans les maisons et même commercial (stations services).

4.1.2 Les forages

Le tableau ci-dessous donne les forages implantés dans la région et leurs coordonnées et altitudes.

Pour bien déterminer l'évolution du niveau d'eau dans la nappe, nous avons réalisé deux campagnes de mesures piézométriques (Avril 2017 et janvier 2018) sur les forages cités précédemment (Tab. 18), ce qui nous a permis la réalisation des cartes piézométriques relatives à chaque état. Chaque carte permet la détermination du sens de l'écoulement des eaux ainsi que le mode d'alimentation de la nappe alluviale de Boumaiza.

4.2. Interprétation des cartes piézométriques

4.2.1. Carte du mois d'Avril 2017

La carte piézométrique (Fig. 21) réalisée présente une variation du niveau piézométrique de 4 à 24 m durant la période des hautes eaux.

Le sens global de l'écoulement montre deux directions qui divisent la plaine en deux parties ; la première est de direction Nord-Nord-Est, Sud-Sud-Est, et Sud-Est de l'oued Kébir vers le centre de la plaine et puis vers l'Est pour l'alimentation du lac Fetzara. Le deuxième est de direction Sud-Sud-Est au niveau de l'oued Kébir vers la partie extrême Nord-Ouest de la zone d'étude considérée la partie Sud-Sud-Ouest de la plaine alluviale de l'oued Kébir Ouest (Hadj Said, 2007 ; Khammar 1981).

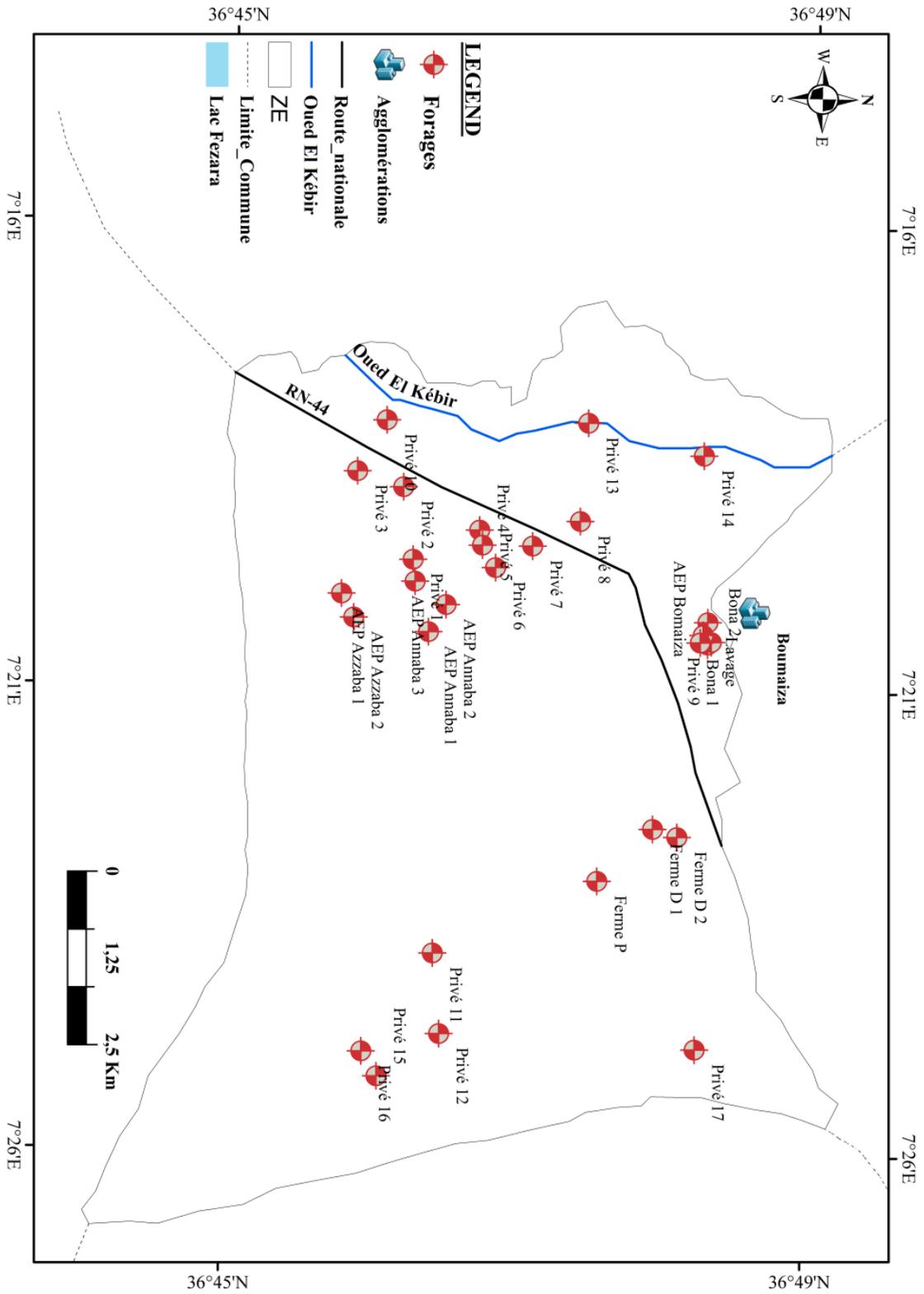


Figure 20 : Carte de la répartition des forages dans la région de Boumaiza

Tableau 19 : Coordonnées des forages

Forage	Longitude	latitude	altitude
Ferme Dahoui 1	7,372	36,805	20
Ferme Dahoui 2	7,374	36,808	21
Ferme Privé	7,381	36,798	16
Bona 1	7,343	36,812	28
Bona 2	7,342	36,812	30
Lavage	7,339	36,812	28
AEP Azzaba 1	7,335	36,765	25
AEP Azzaba 2	7,339	36,766	23
AEP Annaba 1	7,341	36,776	24
AEP Annaba 2	7,337	36,778	24
AEP Annaba 3	7,333	36,774	25
AEP Boumaiza	7,341	36,811	26
Privé 1	7,329	36,774	25
Privé 2	7,318	36,772	27
Privé 3	7,315	36,766	29
Privé 4	7,325	36,782	23
Privé 5	7,327	36,783	23
Privé 6	7,331	36,784	21
Privé 7	7,327	36,789	24
Privé 8	7,323	36,795	23
Privé 9	7,342	36,811	25
Privé 10	7,307	36,770	27
Privé 11	7,393	36,777	17
Privé 12	7,406	36,778	13
Privé 13	7,307	36,796	23
Privé 14	7,312	36,811	20
Privé 15	7,413	36,770	15
Privé 16	7,409	36,768	17
Privé 17	7,408	36,811	14

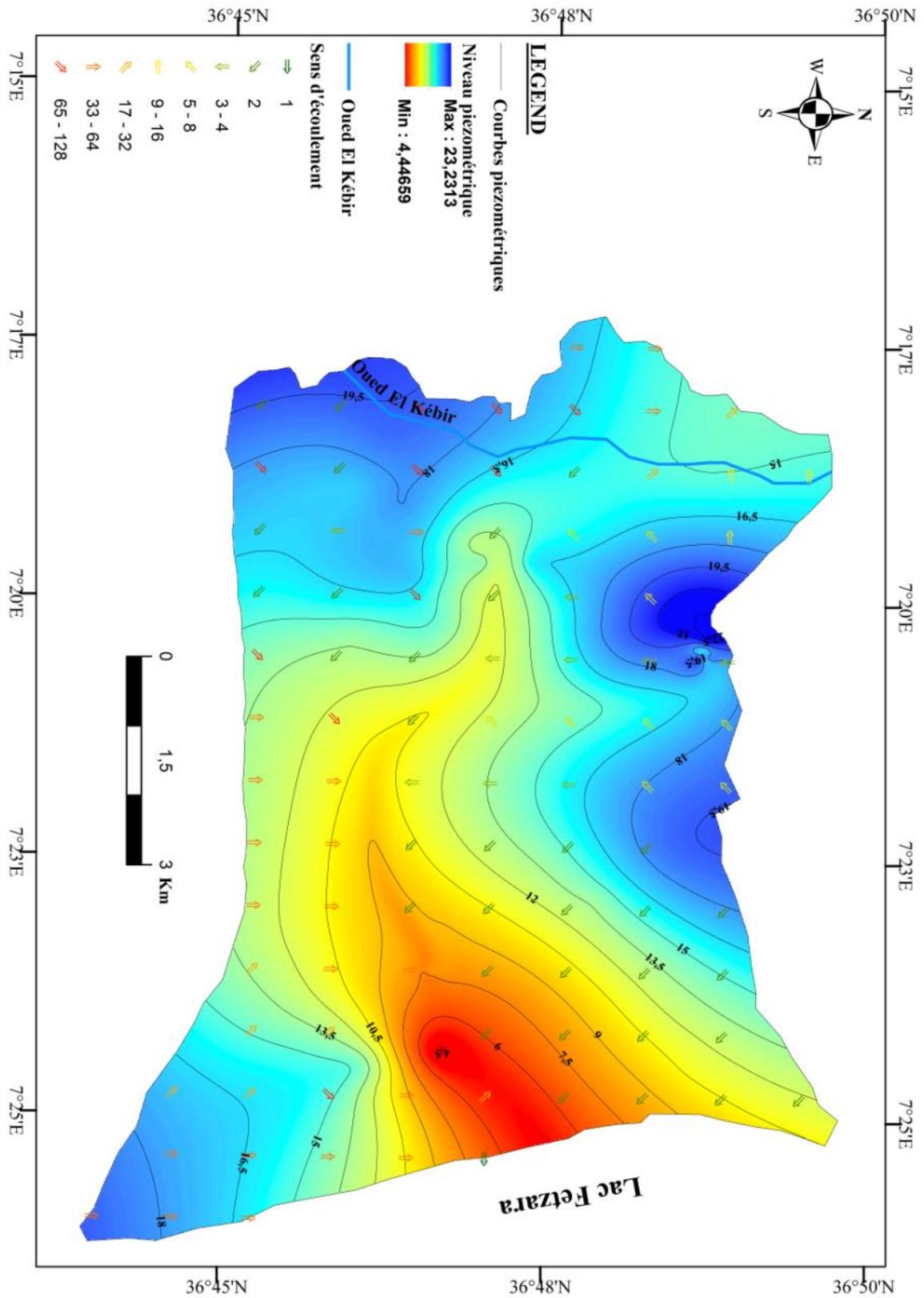


Figure 19 : Carte piézométrique de la nappe des graviers de Boumaiza (Avril 2017)

4.2.2 Carte du mois Janvier 2018

Durant cette période, le niveau piézométrique (Fig. 22) atteint un niveau plus bas que celui du mois d'avril (2 à 18m). Vu la vocation agricole de la région (majorité des forages implantés dans la région à utilisation agricole et de façon illégale) et après une année agricole dure caractérisée par un été sec et de faibles précipitations au début de la saison, la nappe est surexploitée.

L'allure générale des courbes piézométrique montre un seul sens d'écoulement vers la partie sud-est de la plaine de Boumaiza et par la suite l'alimentation du lac Fetzara et la disparition de l'écoulement enregistré durant la période du mois d'avril (sud sud-est au niveau de l'oued Kébir vers la partie Nord Ouest).

4.3. Fluctuation des profondeurs d'eau

Pour réaliser notre travail on s'est intéressé aux cartes piézométriques établies au mois d'avril 2017 et le mois de janvier 2018, ce qui nous a permis de tracer la carte de battement de la nappe entre les deux périodes considérées.

La carte obtenue (Fig. 23), montre un battement très important atteignant jusqu'à 9 mètres de niveau dans la partie extrême Sud-Est et Nord centre, engendré par la présence des dômes facilitant les écoulements d'eau particulièrement de la nappe vers le centre de la plaine et le lac Fetzara. Ailleurs, les fluctuations restent assez faibles.

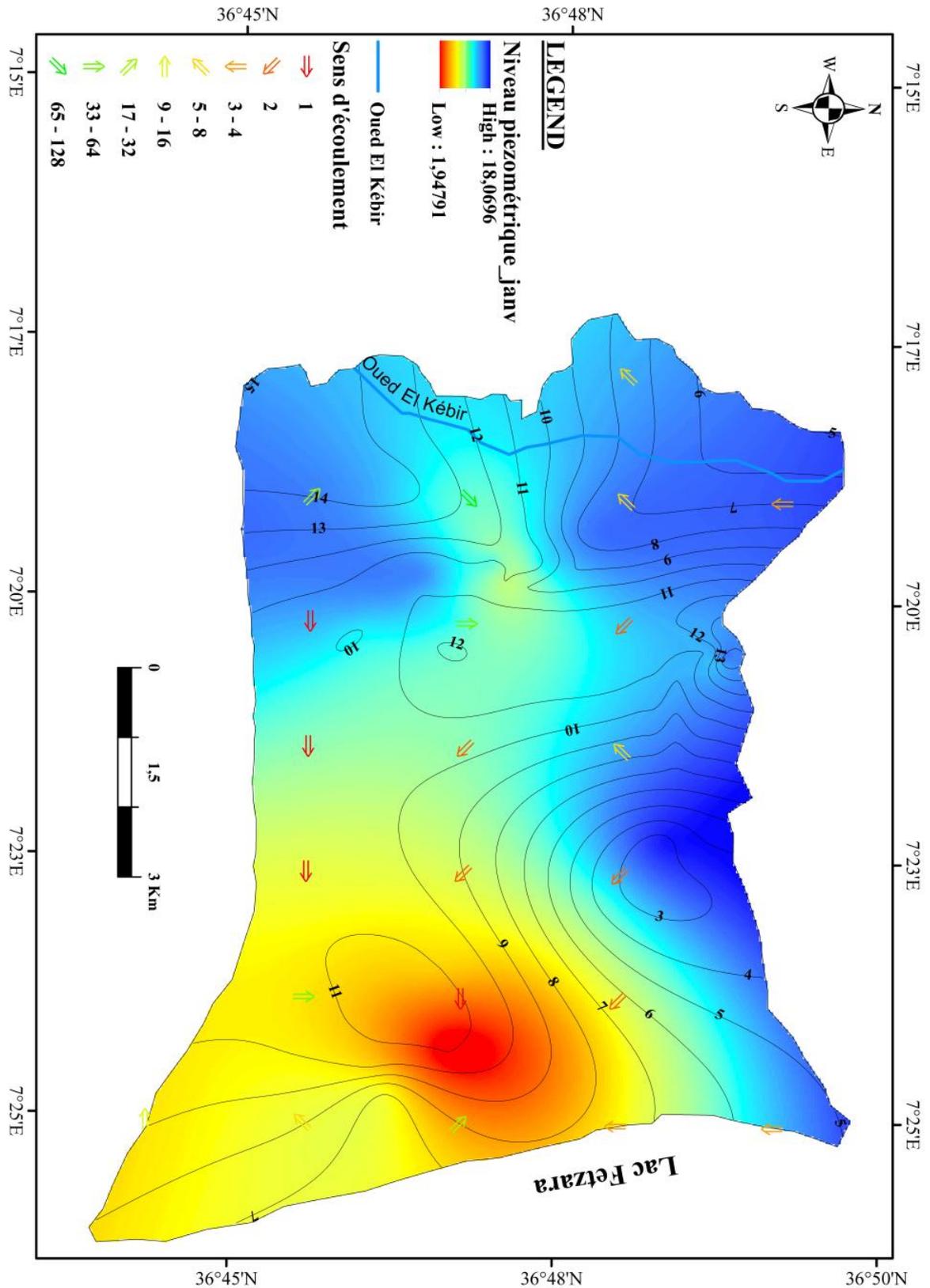


Figure 20 : Carte piézométrique de la nappe des graviers de Boumaiza (Janvier 2018)

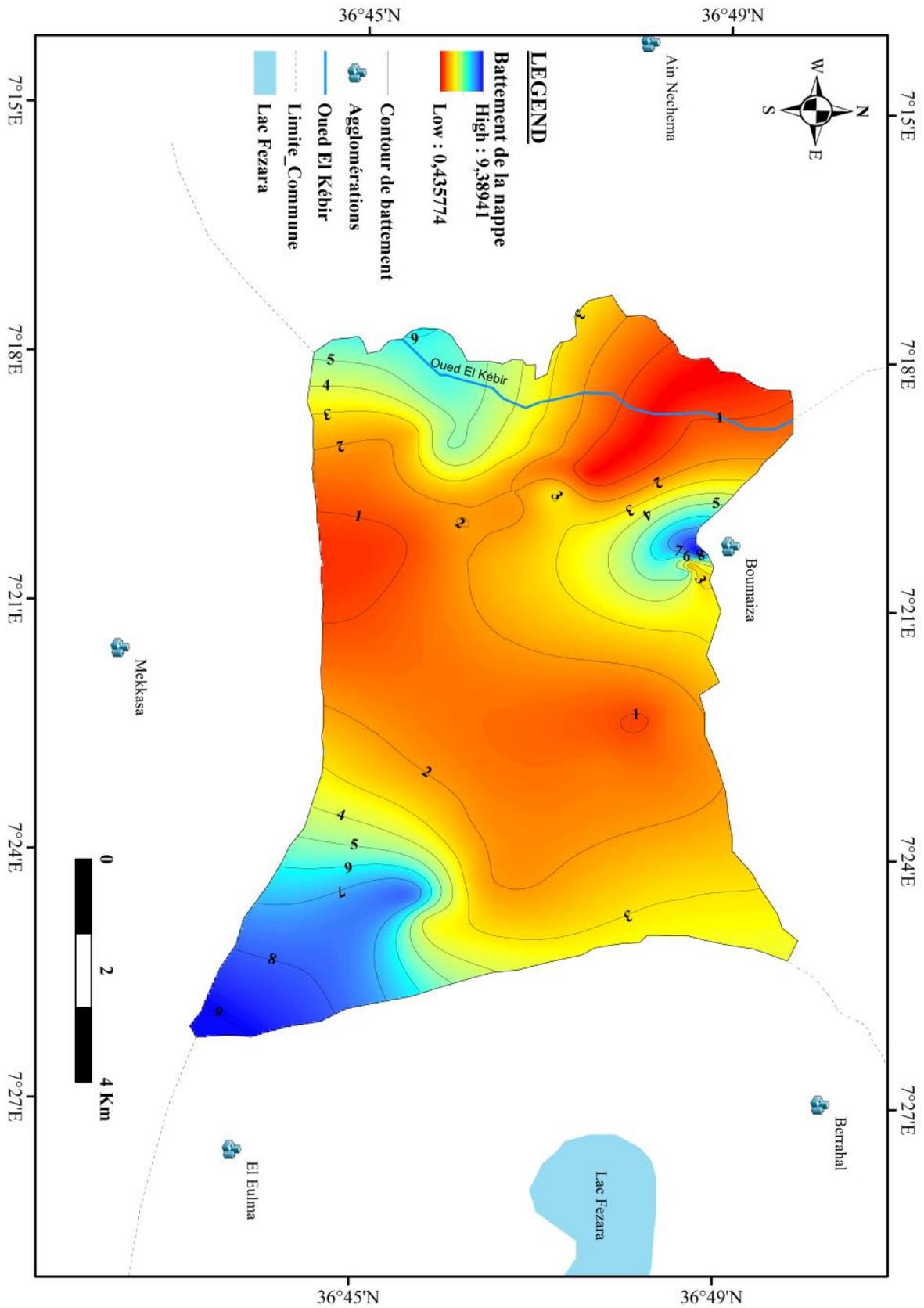


Figure 21 : Carte de battement de la nappe (Avril 2017 - Janvier 2018)

5. Conditions aux limites

Il semble que la majorité des apports provient d'une part de l'infiltration directe des pluies surtout dans les zones perméables de l'Infero-flux de l'Oued El Kébir, et d'autre part des formations encaissantes, argiles et grés numidiens à l'Est, marno-calcaires et calcaires secondaires à l'Ouest.

La présence de l'argile en surface en plusieurs endroits limite considérablement les échanges Oued – nappe.

Aucun exutoire n'est connu à la limite du massif calcaire du Djebel Safia (partie Sud-ouest de la plaine de Boumaiza). Il semble que les eaux deviennent captives sous les dépôts argileux de l'Oued El Kébir (Khammar, 1981).

La Limite Nord-Est comprend une limite à potentiel imposé correspondant au lac Fetzara.

La plaine de Boumaiza a une altitude moyenne de 5 à 30 m, la nappe des graviers à une épaisseur moyenne de 50 m qui repose sur un substratum marneux.

6. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe

Les caractéristiques hydrodynamiques des nappes sont généralement obtenues au moyen des tests portant sur les modifications du comportement hydrodynamiques du complexe aquifère - ouvrages de captage, en réponse à une impulsion créée par un pompage à un débit constant.

L'essai par pompage est l'un des moyens les plus utilisés pour connaître les caractéristiques du complexe aquifère-ouvrage, et déterminer les paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emménagement) et les caractéristiques particulières de l'aquifère (structure, hétérogénéité, drainance...etc.).

Malheureusement, la majorité des forages implantés dans la région de Boumaiza (étatiques et privés), ne possèdent pas les données de pompage d'essai (même si elles existent, elles restent insuffisantes) pour des différentes raisons telles que l'ancienneté des forages (perte des documents archivés) et la négligence du client à la demande de ces résultats parce que l'objectif pour lui c'est uniquement trouver de l'eau (selon notre investigation).

Pour cela on va présenter, dans cette partie, les résultats obtenus par des autres auteurs qui ont travaillé sur la même région (Khammar, 1981, Majour et Ouelaa, 1990, et Hadj Said, 2007).

6.1. Définition des caractéristiques hydrodynamiques

6.1.1. La perméabilité "k"

Elle est définie par la loi de Darcy. C'est le volume d'eau gravitaire en m^3 traversant en une unité de temps, sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique sur une unité de section en m^2 orthogonale à la direction de l'écoulement. Elle s'exprime en m/s.

6.1.2. La transmissivité "T"

La transmissivité est le produit du coefficient de perméabilité par l'épaisseur de l'aquifère.

Elle est donc égale au débit traversant une section normale à l'écoulement, de largeur unitaire prise sur toute l'épaisseur de l'aquifère et sous un gradient hydraulique égal à l'unité. Elle s'exprime en m^2/s .

6.1.3. Le coefficient d'emménagement "S"

Le coefficient d'emménagement est défini comme le volume d'eau libéré ou emmagasiné à travers une surface d'aire égale à l'unité, pour une unité de variation de la charge hydraulique, Δh , normale à cette surface. Il est désigné par le symbole S, sans dimension.

Dans un aquifère libre, l'eau est libérée par l'action des forces de gravité (drainage). Le coefficient d'emménagement S est équivalent, en pratique, à la porosité efficace.

Dans un aquifère captif ou semi-captif, l'expulsion de l'eau est le résultat de la compression de l'aquifère et de la baisse du niveau statique lors du pompage provoquant une baisse de pression, une détente élastique et une déformation du solide libérant l'eau (actions d'élasticité de l'eau et du solide). Les modules d'élasticité étant faibles, le volume d'eau libéré est beaucoup plus petit, à caractéristiques égales, que pour les nappes libres.

6.2. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques

Afin de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, on a eu recours à plusieurs méthodes. Ceci nous permet de comparer les différents résultats et d'en dégager les plus représentatifs de la région étudiée.

6.2.1. Méthode de THEIS

Un grand progrès a été fait par THEIS (1935) qui fut le premier à développer les formules du régime transitoire, comprenant le temps et le coefficient d'emménagement. THEIS découvrit que lorsqu'on pompe à débit constant dans un puits parfait captant un aquifère d'extension latérale illimitée, l'influence du prélèvement de l'eau se propage vers l'extérieur avec le temps. Si en chaque point de la zone d'influence on multiplie l'abaissement de la charge hydraulique

par le coefficient d'emmagasinement, et s'il l'on fait ensuite la somme de toutes les valeurs obtenues, le chiffre trouvé est égal au volume prélevé. Comme l'eau doit provenir d'une réduction de l'emmagasinement de la nappe, le niveau piézométrique continue à baisser aussi longtemps que l'aquifère reste infini. Donc, il n'existe théoriquement aucun régime permanent. Cependant, la vitesse de l'abaissement diminue constamment au fur et à mesure que la zone d'influence s'étend, et le cas échéant elle devient si faible qu'elle est négligeable, ce que l'on considère en fait comme le régime permanent.

L'équation de THEIS, provient de l'analogie entre l'écoulement souterrain et la conduction de la chaleur, et peut s'écrire par la formule :

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} w(u)$$

d'où :

$$W(u) = \frac{r^2 s}{4 tT}$$

Avec :

s : Rabattement en m

Q : Débit constant de pompage dans le puits en m³/s

t : Temps de pompage en seconde

r : Distance du puits d'observation à l'axe du puits de pompage en m

T : Transmissivité en m²/s

S : Coefficient d'emmagasinement

Résultats : Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 20 ci-dessous.

Tableau 20 : Caractéristiques hydrodynamiques selon la méthode de THEIS

Point d'eau	Q (m ³ /s)	s (m)	u	W (u)	t (s)	T (10 ⁻³ m ² /s)
Hadjar Soud	1.05	0.15	0.62	0.55	480	0.3
Boumaiza	1.1	0.65	0.4	0.85	2400	0.11
Ain Nechema	1.5	0.57	0.7	1.3	1000	0.27

6.2.2. Méthode de SHOW

SHOW (1952) développa une méthode dont l'intérêt est qu'on n'a pas besoin de tracer la courbe de la méthode de THEIS, sans pour autant être limité aux faibles valeurs de r et aux grandes valeurs de t , comme dans la méthode de Jacob.

On doit satisfaire aux mêmes hypothèses et conditions que pour la méthode de THEIS car on s'appuie directement sur l'équation :

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} w(u)$$

Afin de calculer les valeurs de $W(u)$ et u correspondant au rabattement s mesuré au temps t , SHOW (1952) introduisit la fonction :

$$F(u) = \frac{w(u) e^u}{2.3}$$

Résultats :

Les résultats obtenus sont exposés dans le tableau 21 ci-dessous.

Tableau 21 : Caractéristiques hydrodynamique selon la méthode de SHOW

Point d'eau	Q (m3/s)	Δ_A (m)	c_A	F(u) _A	t _A (sec)	W(u) _A	T (10 ⁻³ m2/s)
Hadjar Soud	1.05	0.32	0.63	0.51	1040	0.8	0.20
Boumaiza	1.1	0.3	0.47	0.63	850	1.8	0.52
Ain Nechema	1.5	0.4	0.56	0.71	560	1.3	0.26

6.2.3. Méthode de la remontée de THEIS

Une fois le pompage achevé, le niveau d'eau cesse de descendre pour remonter vers sa position d'origine. On mesure la remontée par le rabattement résiduel "s", c'est à dire la différence entre le niveau originel de l'eau avant le pompage et le niveau mesuré à un certain moment "t" de la remontée. "t" représente le temps écoulé depuis l'arrêt du pompage.

Les résultats de la remontée permettent aussi le calcul de la transmissivité et sont donc un moyen de contrôle des résultats de l'interprétation de l'essai durant la période de pompage. En outre, la remontée présente l'avantage que le débit "Q" est constant et égal à la moyenne des débits du pompage. On peut calculer la transmissivité par l'équation :

$$T = \frac{2.3 Q}{4 \pi \Delta s}$$

Q : débit en m³ ;

Δs : la différence de rabattement résiduel par cycle logarithmique t/t' ;

t' : temps écoulé depuis l'arrêt du pompage.

Résultats :

Tableau 22 : Transmissivité selon la méthode de la remontée

Point d'eau	Q (m3/s)	Δs (m)	T (10 ⁻³ m2/s)
Hadjar Soud	1.05	0.4	0.48
Boumaiza	1.1	1.5	0.13
Ain Nechema	1.5	1.23	0.27

6.3. Discussion des résultats

Les résultats de calcul de transmissivité de l'aquifère obtenus par les différentes méthodes sont représentés dans le tableau 23 suivant :

Tableau 23 : Valeurs de transmissivité calculée par différentes méthodes

Point d'eau	Transmissivité T (10 ⁻³ m ² /s)		
	THEIS	SHOW	Remonté de THEIS
Hadjar Soud	0.3	0.20	0.48
Boumaiza	0.11	0.52	0.13
Ain Nechema	0.27	0.26	0.27

La comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes montre une bonne concordance pour le calcul de la transmissivité variant entre 0.2-0.48 10⁻³ m²/s excepté ceux obtenus par la méthode de SHOW qui a donné des valeurs supérieures à celles acquises par les autres méthodes.

Les valeurs du coefficient d'emménagement sont calculés à partir des valeurs de la transmissivité T moyenne obtenus par la méthode d'essai de pompage elle est de l'ordre de 0.04% (Khammar 1981).

7. Estimation de la réserve en eau

Ces réserves représentent le volume d'eau des nappes à surface libre. Situées au dessous de la zone de fluctuation de cette surface. Ces réserves dites séculaires varient à l'échelle des temps géologiques.

La puissance moyenne des aquifères a été estimée à partir des résultats obtenus par les forages de reconnaissance et d'exploitation et l'étude géophysique.

La réserve en eau souterraine est évaluée par la relation suivante :

$$V_p = A \cdot h_p \cdot m_e$$

Avec :

A : la superficie totale.

$h_p = H - h$: la puissance des aquifères non affectés pour les fluctuations de la nappe, avec H puissance de l'aquifère et h variation du niveau piézométrique.

m_e : porosité efficace moyenne d'après Archie.

Les réserves permanentes de la plaine alluviale de l'oued Kébir Ouest sont de l'ordre de $128.10^6 m^3$ (Khammar 1981).

8. Exploitation actuelle

Le site géographique de Boumaiza représente un grand intérêt industriel et commercial ce qui a engendré un développement remarquable dans ces domaines par rapport aux années passées. Ce développement a facilité l'extension urbaine et par conséquent l'accroissement démographique.

L'intensité des activités industrielles et agronomiques dans la région ainsi que l'obligation de satisfaction en eau potable de la population, a provoqué une exploitation importante des horizons profonds de la nappe. Ceci est expliqué par le nombre très élevé des ouvrages de captage d'eau implanté dans la région ces dernier temps. Ces ouvrages sont répartis selon les besoins des usagers ce qui explique la différence du débit d'exploitation d'une zone à l'autre. La nappe superficielle dans la plaine alluviale est exploitée pour des besoins domestiques.

Les eaux souterraines de la région de Boumaiza sont utilisées pour :

- L'irrigation des parcelles agricoles individuelles ou collectives (activités saisonnières telles que la tomate, le poivron et la pastèque) ;
- L'alimentation en eau potable de la population de Boumaiza ainsi que les agglomérations voisines ;
- Des intérêts commerciales (stations services et alimentation du bétail) ;
- Des activités industrielles (briqueterie, la cimenterie de Hadjar Soud, complexes agroalimentaires tels que la conserverie de la tomate Ben Amor et l'usine de fabrication des boissons Bona).

9. Conclusion

La plaine alluviale de Boumaiza caractérisée par des alluvions d'épaisseur maximale de 110 m répartie sur la totalité de la plaine. Limons, argiles et argiles sableuse séparent entre les sols argileux en surface et les dépôts de graviers qui caractérisent la nappe profonde.

Le substratum est représenté par les sédiments argilo-gréseux du numidien et du flysch crétacé.

Les mesures piézométriques de la nappe profonde de la plaine ont permis l'établissement des cartes piézométriques pour les deux périodes de hautes et basses eaux.

Le sens de l'écoulement pour la période des hautes eaux (Avril 2017) mis en évidence deux directions, dans la première les eaux provient du Nord nord-est, Sud sud-est, et Sud-est pour l'alimentation du lac Fetzara et le deuxième est de direction Sud sud-est au niveau de l'oued kébir vers la partie extrême Nord ouest de la zone d'étude.

L'étude des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe ont donnés des transmissivité variant entre 0.2 à $0.48 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement sont de l'ordre de 0.04 % (Khammar 1981).

CHAPITRE V

VULNERABILITE A LA POLLUTION DE LA NAPPE ALLUVIALE DE BOUMAIZA

1. Introduction

La prévention contre la pollution des nappes constitue une étape importante dans la gestion des aquifères, à laquelle les scientifiques consentent de plus en plus d'efforts, notamment l'étude de la vulnérabilité des nappes d'eaux souterraines à la pollution. Cette étude permet d'abord de délimiter les zones exposées à la pollution, afin de les déterminer les périmètres de protection des captages implantés de dans, pour assurer une meilleure gestion de ces ressources et des interventions convenables dans le cas de contamination. Une fois identifiées, ces régions peuvent être visées avec prudence par les planificateurs et les utilisateurs de la terre (Graillat et *al.*, 1994; Babiker et *al.*, 2004; Hamza et *al.*, 2007).

2. Définition et historique de la vulnérabilité

Depuis quelques décennies, l'exigence de planification du territoire selon des modalités tolérables pour l'environnement souterrain a contribué au développement de la notion d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution.

La nécessité de classer les sources de contamination, et de définir les conditions de protection des eaux souterraines se sont fait sentir dans les années 1960 quand Vladirnirskij suggéra le développement d'une méthode, précurseur des cartes de vulnérabilité, permettant la construction de cartes de potentiel de contamination des eaux souterraines. Margat et Albinet (1970) pour leur part élaboraient en France dans les années 1970 une carte de vulnérabilité des eaux souterraines à l'échelle du pays.

Le terme vulnérabilité date des années 1960 et a été choisi afin de sensibiliser la population au fait que même si la notion d'eau souterraine est associée à une image de pureté, cette ressource n'en reste pas moins sensible aux agents extérieurs et susceptible d'être polluée. Selon la nature et la structure des sols et aquifères le concept de vulnérabilité pourra prendre des formes et des degrés variés de manière à mettre en évidence les capacités de résistances naturelles diverses des milieux (Margat, 1991).

La définition d'Albinet et Margat (1970) a été l'une des premières reconnues et généralement utilisée : la vulnérabilité d'un aquifère est la possibilité qu'a un contaminant de percoler et de diffuser depuis la surface jusqu'au réservoir d'eau dans des conditions naturelles.

En 1974, Olmer et Rezac suggèrent que la vulnérabilité des eaux souterraines est le degré de dangerosité déterminé par les conditions naturelles et non pas par les sources actuelles de pollution.

Dans ces deux définitions, la vulnérabilité est considérée comme fonction de la perméabilité de la zone non saturée et de la zone saturée (déterminant en partie les vitesses d'écoulement).

Une dizaine d'années plus tard, Villumsen et al. (1983) proposent que la vulnérabilité des eaux souterraines soit définie comme le risque qu'une substance chimique, utilisée ou entreposée sur le sol, puisse représenter pour la qualité des eaux souterraines. Selon ces auteurs, la vulnérabilité des eaux souterraines dépend d'une série de paramètres dynamiques et statiques ; ils insistent sur le fait que la composition chimique d'une eau souterraine peut être utilisée comme indicateur de la vulnérabilité et proposent que les analyses chimiques des eaux utilisées pour vérifier les cartes de vulnérabilité.

Alors, la vulnérabilité d'une nappe à la pollution est une notion relative, non mesurable et sans dimension (Vrba et Zaporozec, 1994). La précision de son évaluation dépend essentiellement de la nature, de la qualité et de la fiabilité des données utilisées. Sa caractérisation est basée généralement sur l'estimation d'un certain nombre de paramètres plus ou moins importants relatifs notamment à la couverture de la nappe (sol et zone non saturée) et à la zone saturée proprement dite.

Les cartes de vulnérabilité montrent quelles sont, suivant les terrains rencontrés en surface et les réservoirs contenant la première nappe d'eau souterraine, les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans ces terrains.

Le concept de vulnérabilité peut se définir à 3 niveaux:

- aptitude d'un système d'eaux souterraines à être contaminé;
- intégration de l'aptitude des eaux souterraines à propager et à conserver la contamination;
- prise en considération des caractéristiques polluantes du contaminant ce qui fait appel aux concepts de normes et de seuils de toxicité. (Lafrance *et al.*, 1989).

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité ; intrinsèque et spécifique (Schnebelen et al., 2002) :

➤ **La vulnérabilité intrinsèque** : est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux à la pollution par les activités humaines ;

➤ **La vulnérabilité spécifique** : est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

3. Origine de la vulnérabilité des eaux souterraines

D'après Cazaux (2007), le concept de vulnérabilité des eaux souterraines est basé sur un modèle « origine – écoulements – cible ». Ce modèle est repris et détaillé en particulier dans un projet européen traitant de la protection des aquifères, l'action COST620 (Zwahlen, 2003).

➤ **L'origine de la contamination:** c'est le lieu d'infiltration du polluant au niveau de la surface du sol. Cette approche ne tient pas compte des pertes ou fuites de réseaux d'eau usée.

➤ **L'écoulement :** c'est le trajet du contaminant à travers le milieu naturel, c'est à dire sa composante verticale au sein de la zone non saturée. Si l'objet de la protection est le point de captage d'eau (puits, forage, exutoire), il faut également prendre en compte l'écoulement au sein de l'aquifère.

➤ **La cible:** est l'eau souterraine faisant l'objet d'une protection. Il peut s'agir soit du toit de la nappe, soit du captage d'eau.

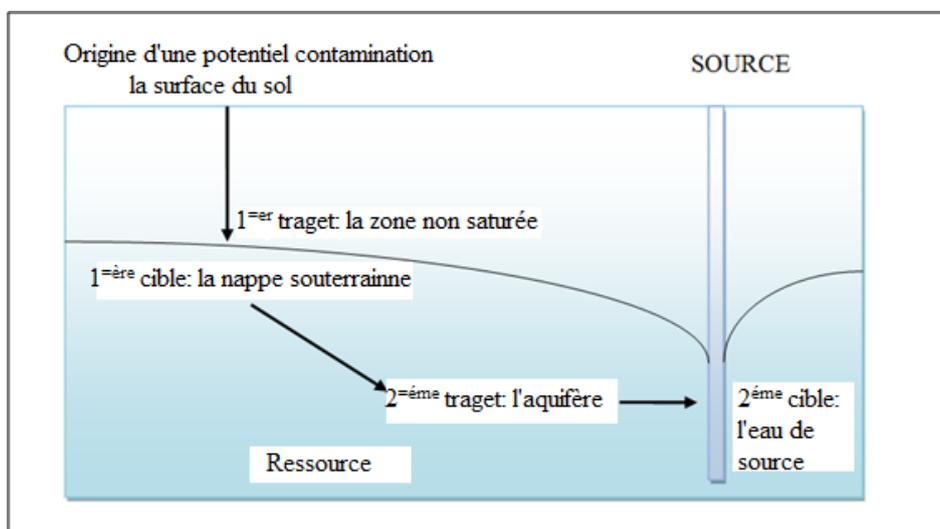


Figure 22 : Modèle «origine – écoulements – cible» -modifié- (action COST620, 2004 in Cazaux, 2007)

4. Cartographie de la vulnérabilité

La cartographie permettant d'identifier la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, d'évaluer et de prévenir les risques de contamination; correspond à un type de carte hydrogéologique spécialisée répondant à un besoin particulier et visant un public varié (CRIVERT, 2003; Duchaine, 1998).

Elle apparaît nécessaire et incontournable car ce type de carte permet d'identifier très facilement les zones à risques de pollutions potentielles. Elle servira comme un outil d'aide à

la décision aux gestionnaires des ressources en eau et permettra également d'orienter l'aménagement du territoire. Les premières cartes ont été réalisées en Europe et aux Etats-Unis au début des années 1970. La rapidité et la précision de la cartographie augmente en utilisant les systèmes d'information géographique (SIG) (Amharref et Bernoussi, 2007; Cazaux, 2007; Duchaine, 1998).

4.1. Utilisation des SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité des nappes

Dans l'optique de la gestion des risques naturels et anthropiques, les systèmes d'informations géographiques (SIG) apportent des informations localisées et objectives irremplaçables. Dans un premier temps, ils permettent de gérer une multitude d'informations de tous types, de les mettre à jour, d'optimiser leurs échanges et de générer de nouvelles couches d'informations par le biais de leurs croisements. En second lieu, ils assurent la restitution des cartes thématiques et les analyses qui en résultent.

Le SIG compte parmi les nouvelles techniques informatiques destinées au domaine de prévision et d'intervention puisqu'il répond à une problématique de gestion, de planification et d'aménagement. Il offre les possibilités de croisement au sein d'une base de données spatialement référencée de façon à extraire commodément des synthèses utiles à la décision (Eastman, 1995; Duchaine, 1998; Hentati *et al.*, 2005).

L'apport du SIG dans les études de vulnérabilité des nappes permet d'aborder les risques de la pollution des eaux souterraines, d'aider à limiter ce risque par une meilleure planification et une intervention efficace sur le terrain afin de préserver la qualité de la ressource. Toute méthode d'évaluation de la vulnérabilité doit être combinée à un SIG pour déterminer les zones susceptibles d'altérer la qualité de l'aquifère à partir de la superposition des cartes thématiques des paramètres pris en compte par la méthode concernant les caractéristiques naturelles de l'aquifère d'une part, les types d'occupation du sol et les différentes activités d'autre part (Hentati *et al.*, 2005; Chloé, 2007).

4.2. Méthodes de cartographie de la vulnérabilité

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses et ont été développées dans le monde selon le cas étudié, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectent la vulnérabilité. L'application de ces méthodes ne peut être possible sans l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG), en raison de la masse très importante des

données nécessaires (Vaillant et al. , 1995 ; Gogu et Dassargues, 1998; Arousseau et al. , 1998; Sinan et al. , 2003; Amharref et Bernoussi, 2007; Caquel et al., 2007; Pranville et al., 2007; Ake et al., 2009). Deux méthodes seront utilisées dans ce travail ; GOD et DRASTIC.

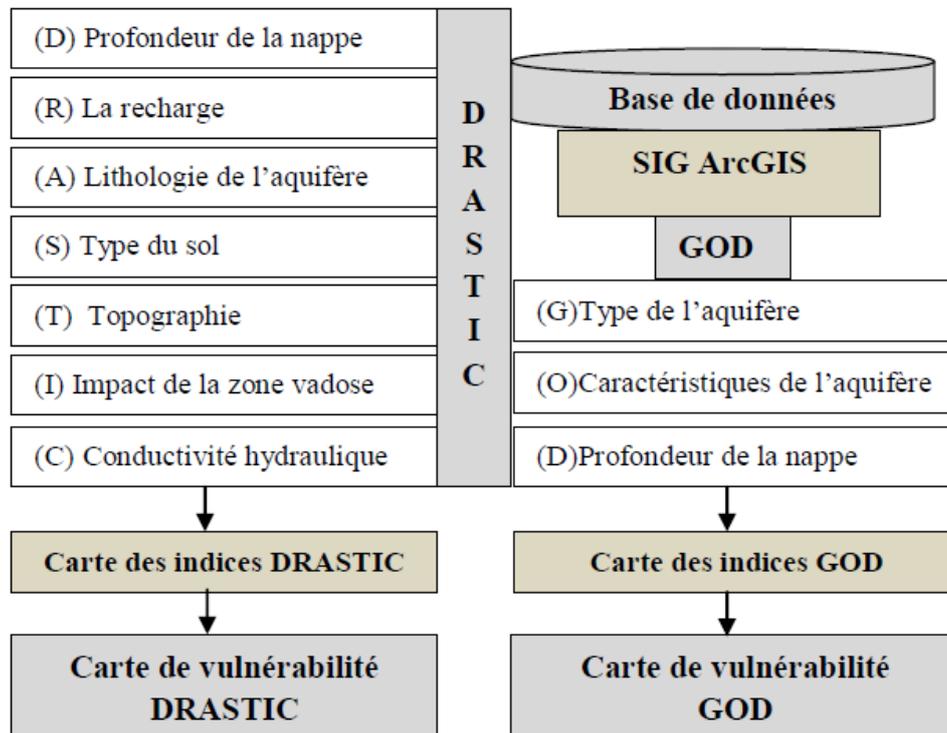


Figure 23 : Elaboration des cartes de vulnérabilité par la méthode DRASTIC et GOD

4.2.1. La méthode GOD

La méthode du GOD a été développée par Foster en 1987. Elle présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale des polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas la migration latérale des polluants dans la zone saturée (Mardhel et al., 2005). C'est une méthode paramétrique utilisant le produit des trois paramètres: Type de nappe (**G**roundwater occurrence), Lithologie de la zone non saturée de l'aquifère (**O**verall aquifer class), Profondeur de la nappe (**D**epth to groundwater table) (Foster, 1987).

L'indice de vulnérabilité se calcule par la multiplication des coefficients des trois paramètres GOD comme suit : $I_{GOD} = C_i * C_p * C_a$. Où:

- ❖ I_{GOD} : est l'indice potentiel de pollution (indice GOD) ou degré de vulnérabilité;
- ❖ C_i : est le coefficient du type de l'aquifère;
- ❖ C_p : est le coefficient de profondeur de la nappe;
- ❖ C_a : est le coefficient de lithologie de l'aquifère.

Les coefficients sont attribués aux paramètres en fonction de leur importance pour la vulnérabilité de l'aquifère. Ils correspondent à une ponctuation attribuée à une caractéristique hydrogéologique de l'aquifère. Ces coefficients prennent des valeurs dans un intervalle de classes numérique donné. Les classes définies en tenant compte du temps de transfert du polluant à l'aquifère et en commençant de la condition la plus favorable, ou vulnérabilité faible (la valeur du score est égal à 0), jusqu'à la condition la plus critique (la valeur du coefficient est égal à 1). Chaque facteur critique a été analysé et évalué comparativement aux autres paramètres pour définir son importance relative dans l'estimation de la vulnérabilité. Les coefficients élevés sont attribués aux facteurs facilitant l'infiltration des polluants, de la surface du sol, à la nappe d'eau (Mimi et Assi, 2009; Ducci et Sellireno, 2013).

Les différentes plages de l'Indice GOD obtenues ont été mises en parallèle avec les classes de vulnérabilité. L'indice GOD a pour valeur minimum le " 0 " et comme valeur maximum " 1 ". D'une manière générale, les indices GOD sont répartis en cinq classes de vulnérabilité allant du "très faible" à "extrême".

Tableau 24 : Cotes accordées aux paramètres de la méthode GOD

Type de nappe (G)		Lithologie de la ZNS de l'aquifère (O)	
Aucun aquifère	0	Sol résiduel	0,4
Artésien	0,1	Limon alluvial, argile, marne, calcaire fin	0,5
Confiné	0,2		0,6
Semi confiné	0,3	Sable éolien; siltite ; tuf; roche ignée ou métamorphique fracturée	
Libre avec couverture	0,4- 0,6	Sable et gravier; grès; tuf	0,7
Libre	0,7- 1	Gravier (colluvion)	0,8
		Calcaire	0,9
		Calcaire fracturé ou karstique	1
Profondeur de plan d'eau (D) (m)			
	< 2		1
	2-5		0,9
	5-10		0,8
	10-20		0,7
	20- 50		0,6
	50-100		0,5
	>100		0,4

4.2.2. La méthode DRASTIC

C'est la méthode d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle des aquifères par systèmes paramétriques, la plus utilisée dans le monde. C'est une méthode qui prend en compte la majeure partie des facteurs hydrogéologiques qui influencent et contrôlent l'écoulement des eaux souterraines indépendamment du type de polluant (Mohamed *et al.*, 2001). Le principe commun de ces systèmes consiste à sélectionner préalablement les paramètres sur lesquels se base l'évaluation de la vulnérabilité. Chaque paramètre est subdivisé en intervalles de valeurs significatives et affecte d'une cotation numérique croissante en fonction de son importance dans la vulnérabilité (Evans et Mayers, 1990; Rundquist *et al.*, 1991; Knox *et al.*, 1993; Secunda *et al.*, 1998; Fritch *et al.*, 2000; Piscopo, 2001; Schnebelen *et al.*, 2002; Al-Adamat *et al.*, 2003). La précision avec laquelle la méthode DRASTIC permet de distinguer les régions vulnérables, a été vérifiée par les analyses physicochimiques dans différentes régions climatiques : Etats-Unis, Québec, Mexique, et d'autres pays (Knox *et al.*; 1993; Hamza *et al.*, 2007).

Elle se base sur sept paramètres (classés en trois catégories : les paramètres de surface (la pente du terrain, la recharge efficace, le type de sol) ; les paramètres de la zone non saturée (la lithologie de la zone vadose, la profondeur du plan d'eau) et les paramètres de l'aquifère (la lithologie de l'aquifère, la conductivité hydraulique de l'aquifère) (Ake *et al.*, 2009) :

[D] : Depth to groundwater (Distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée)

[R] : Recharge de l'aquifère

[A] : Aquifer media (nature de la zone saturée)

[S] : Soil media (nature du sol)

[T] : Topography (topographie, pente en %)

[I] : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée)

[C] : Conductivity (perméabilité de l'aquifère).

Chaque paramètre est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité.

Une fois les différentes classes définies et leurs notes attribuées, la méthode détermine l'indice DRASTIC (Id) qui permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de la nappe.

La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice (Id) calculé est élevé.

Cet indice est défini de la manière suivante:

$$ID = Dn.dp + Rn.Rp + An.Ap + Sn.Sp + Tn.Tp + In.Ip + Cn.Cp$$

Où

D, R, A, S, T, I, C sont les paramètres cités plus haut.

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

n : notation accordée à chaque paramètre

Le tableau ci-après contient les poids attribués à chacun des paramètres ci-dessus. Les poids les plus élevés (5) sont attribués à la nature lithologique et à l'épaisseur de la zone non saturée. Les poids les plus faibles (1 et 2) sont attribués respectivement à la pente et à la nature lithologique du sol.

Tableau 25 : Poids attribués aux paramètres DRASTIC (Aller et al, 1987)

Symbole	Paramètre	Propriétés	Poids
D	Profondeur de la nappe	Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met beaucoup de temps pour atteindre la surface piézométrique.	5
R	Recharge	Véhicule principal pour le transport du contaminant. Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé.	4
A	Lithologie de l'aquifère	Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand	3
S	Type de Sol	Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.	2
T	Topographie	Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible	1

I	Zone non saturée	Son impact est déterminé à partir de la texture des terrains qui la constituent. La percolation du polluant jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette texture est favorable	5
C	Perméabilité	Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide.	3

Pour chacun des paramètres DRASTIC, une note est affectée sur une échelle entière allant de 1 (le moins important) à 10 (le plus important). Pour un paramètre donné, une note basse implique que la nappe concernée n'est pas vulnérable à la pollution et vice-versa.

Tableau 26 : Classes et notes des sept paramètres (Lallemand- Barès 1994)

D : Profondeur du plan d'eau (m)		R : Recharge efficace (R) (mm/an)	
0 – 1,5	10	0-50	1
1,5 – 4 ,5	9	50-100	3
4,5 – 9	7	100-180	6
9 – 15	5	180-250	8
15 – 23	3	> 250	9
23– 31	2		
>31	1		
A : Nature de la zone saturée		S : Type de sol	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sable	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats	7
Grès massif	6	Limon sableux	6
Shales en séquence	6	Limon	5
Métamorphique altérée, grés	4	Limon silteux	4
Métamorphique	3	Limon argileux	3
Shale massif	2	Argile non agrégé et non fissuré	1
T : Topographie (pente du terrain %)		I : lithologie de la couche vadose	

0-2	10	Calcaire karstique	10
2-6	9	Basalte	9
6-12	5	Sable et gravier	8
12-18	3	Sable et gravier avec silt et argile	6
> 18	1	Calcaire lité, grès, shale	6
		Grès	6
		Calcaire	6
		Shale	3
		Silt/argile	1
C : Perméabilité (m/s)			
>9,4 10 ⁻⁴			10
4,7.10 ⁻⁴ à 9,4 10 ⁻⁴			8
32,9.10 ⁻⁵ à 4,7.10 ⁻⁴			6
14,7.10 ⁻⁵ à 32,9.10 ⁻⁵			4
4,7.10 ⁻⁵ à 14,7.10 ⁻⁵			2
4,7.10 ⁻⁷ à 4,7.10 ⁻⁵			1

Résultats et discussions

5.1. Introduction

Dans le présent travail la cartographie et le calcul de la vulnérabilité à la pollution ont été réalisés par les méthodes GOD et DRASTIC à l'aide du logiciel ArcGIS 10.3 (Hafedh *et al.*, 2007). Ce dernier a permis l'intégration et la répartition spatiale des scores pondérés, attribués aux paramètres utilisés dans les deux méthodes et représentation de ces paramètres sous le format shapefile (format vecteur) (Jourda *et al.*, 2007). Avec l'extension « Spatial Analyst » les shapefiles ont été convertis en Grid (format raster). Chaque Grid représente la variation spatiale des scores pondérés pour chaque paramètre (Chandoul *et al.*, 2008).

5.2. Evaluation de la vulnérabilité par la méthode GOD

La méthode GOD est une méthode qui utilise trois paramètres qui sont le type de nappe (G), la lithologie de la ZNS de l'aquifère (O) et la profondeur de la nappe (D) pour présenter la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale des polluants à travers la zone non saturée.

5.2.1. Traitement des paramètres GOD

5.2.1.1. Type de nappe (G)

La vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution dépend du type de nappe, libre ou captive, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère (Bézègues *et al.*, 2002; Renarda, 2002). La plaine alluviale de Boumaiza caractérisée par l'existence de deux nappes : une nappe libre captée par des puits à usage domestique pas profonds, dont les profondeurs oscillent entre 10 à 15 m est une autre nappe profonde captée par des puits dont les profondeurs varient entre 40 à 100 m implantés pour différents usage (AEP, agricole, industries). Malheureusement, l'inaccessibilité et le manque des données sur la nappe libre, nous a conduit automatiquement à étudier la nappe profonde seulement.

L'exploitation des rapports de prospections géophysiques et les coupes géo-électriques interprétatives, montré que la nature lithologique de notre aquifère d'étude est constitué essentiellement des graviers, galets de grés et du sables surmonté par des couches de sable argileux et des argiles rouges graveleux, ce qui rendre le toit d'aquifère perméable à semi-perméable. Selon le classement GOD, coefficient est égale à 0,6 ce qui lui confère un caractère de vulnérabilité moyen.

5.2.1.2. Lithologie de la ZNS de l'aquifère (O)

La circulation et la propagation d'un contaminant dans la zone saturée dépendent aussi de la texture et la distribution lithologique des couches de l'aquifère. Cela est toujours contrôlé par

la granulométrie, la porosité, la perméabilité et la lithologie des formations géologiques (Castany,1981; Banton et Bangoy,1997; Smida *et al.*, 2012). Cette dernière est obtenue par corrélation et extrapolation des données de logs stratigraphiques des forages implantés dans la plaine qui montre que la ZNS est constituée de plus de 80% des limons, sables et argile sableux (coefficient GOD de 0,7), les 20% restant divisés entre les formations métamorphiques qui se localisent au Nord (coefficient GOD de 0,6) et des grès et du marnes (coefficient GOD de 0,5) qui se localisent au sud-est de la plaine de Boumaiza.

La distribution des coefficients GOD est représentée dans la figure ci-dessous.

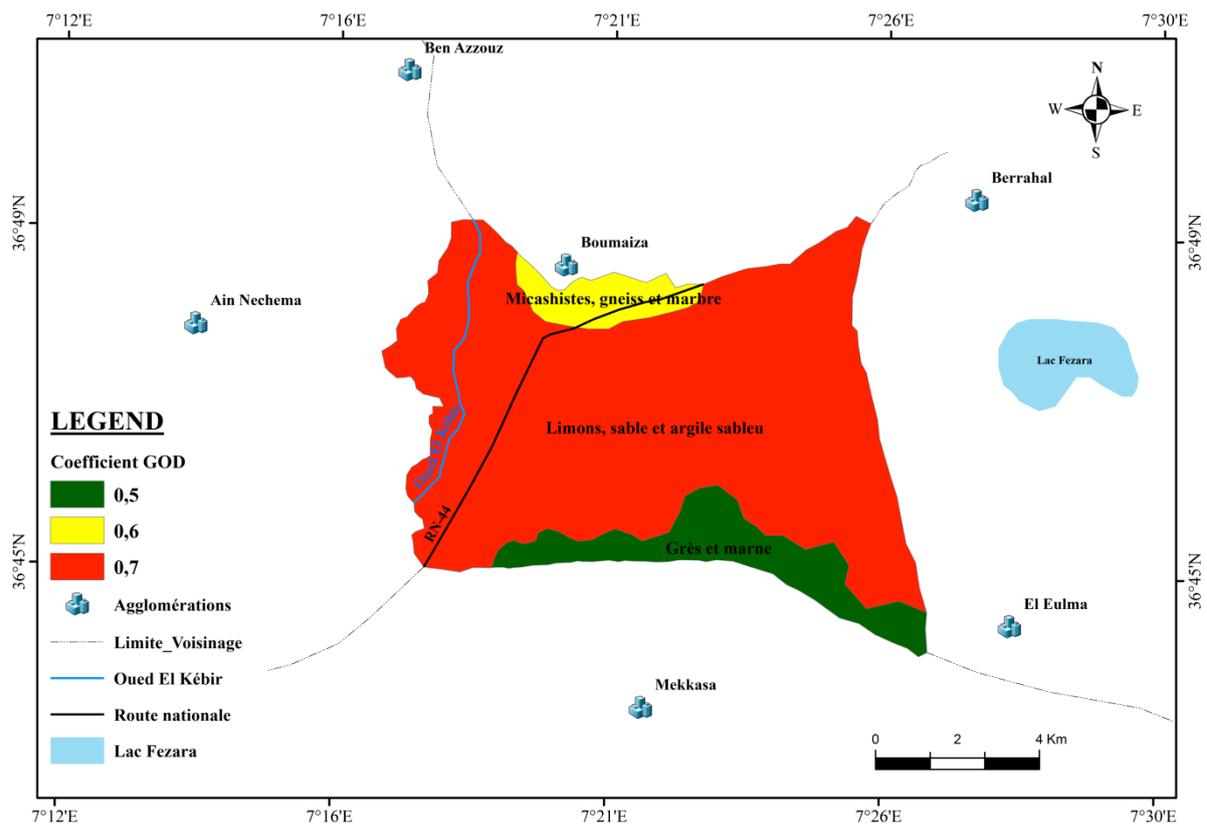


Figure 24 : Distribution spatiale des coefficients GOD selon la ZNS de l'aquifère

5.2.1.3. Profondeur de la nappe (D)

La profondeur de la nappe représente la distance verticale traversée par un polluant depuis la surface du sol pour atteindre l'aquifère. Généralement, la protection potentielle de l'aquifère augmente avec la profondeur de la surface supérieure de l'eau (Gravier *et al.*, 2004).

Les profondeurs du plan d'eau enregistrées au mois d'avril 2017, montrent que le niveau d'eau varie entre 2 et 12,5 m dans toute la région. Quatre intervalles de classes de profondeur du plan d'eau sont enregistrés à savoir:

- ❖ $D < 2\text{m}$: couvre 11,5% de la superficie de la nappe étudiée avec un coefficient 1, qui se localise à l'Est et le Sud-est de la zone d'étude;
- ❖ $2\text{m} < D < 5\text{m}$: présente 20% de la nappe avec un coefficient 0,9;
- ❖ $5\text{m} < D < 10\text{m}$: couvre la plus grande partie de la zone d'étude avec 61,7% avec un coefficient 0,8 ;
- ❖ $10\text{m} < D < 12,5\text{m}$: présente 6,8% avec un coefficient de 0,7 occupe la partie extrême Sud-ouest de la plaine.

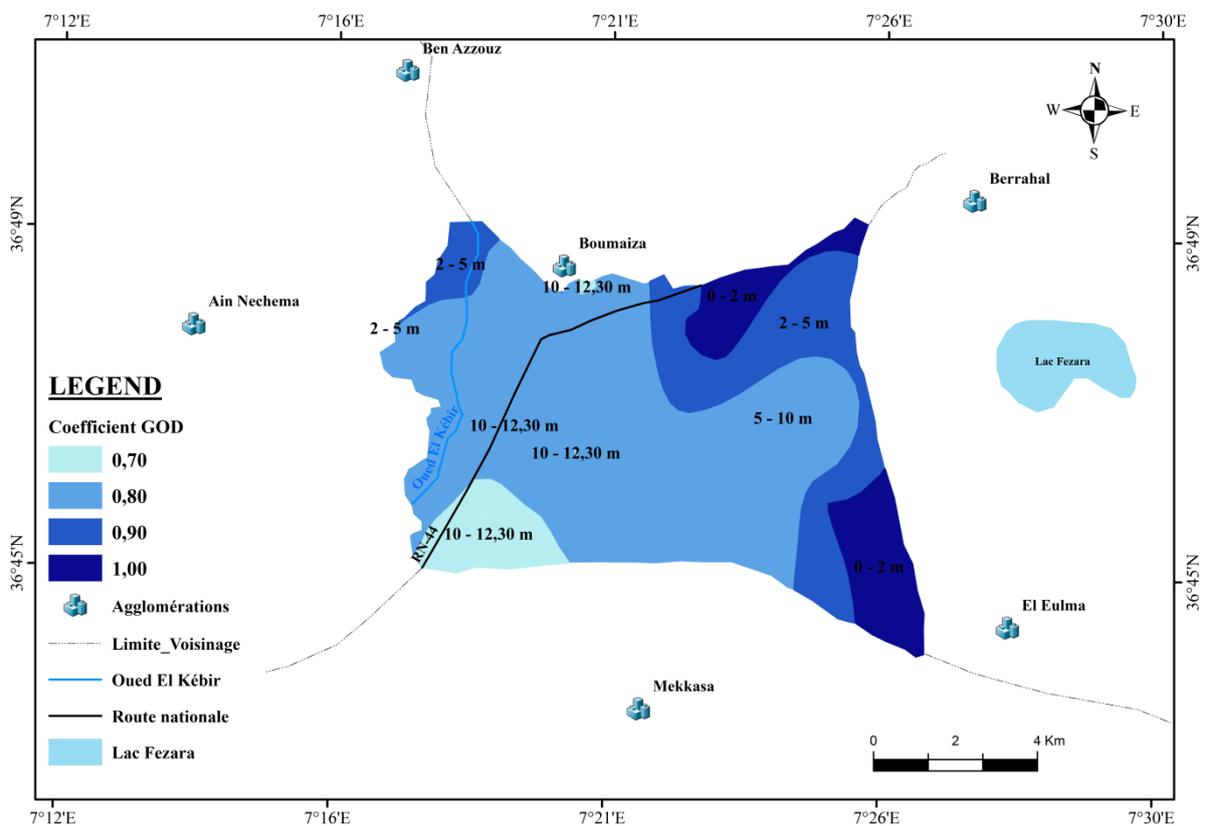


Figure 25 : Distribution spatiale des coefficients GOD selon la profondeur du plan d'eau

5.2.2. Carte de vulnérabilité GOD

Dans la plaine alluviale de Boumaiza, les valeurs de l'indice GOD (I_{GOD}) oscillent entre 0,21 et 0,42. Les valeurs possibles de l'indice de GOD sont réparties en classes de la manière indiquée au tableau ci-dessous. Selon ces valeurs on distingue deux classes de vulnérabilité réparties sur la totalité de la plaine de Boumaiza :

❖ Classe d'une vulnérabilité faible: dont les coefficients GOD varient entre 0,21 à 0,3 occupe la partie Nord-ouest et la partie sud, sur une superficie de 18,2 Km² soit 20,5% de la superficie de la nappe étudiée. Ce degré de vulnérabilité est expliqué par le nature de la zone non saturée de l'aquifère (métamorphique, grès et marnes), ainsi que les profondeurs relativement profond par rapport a des autres endroits sur la plaine.

❖ Classe d'une vulnérabilité modérée dont les coefficients GOD varient entre 0,3 à 0,42 occupe la majorité de la partie centrale de la plaine et 70,6 Km² soit 79,5% de la superficie de la nappe étudiée. Ce degré de vulnérabilité est expliqué par le nature de la zone non saturée de l'aquifère (limons, sables et argile sableux), ainsi que les profondeurs varie entre 5 et 10m.

Tableau 27 : Intervalles des valeurs de l'Indice GOD et classes correspondantes

Intervalles	Classes GOD
0 – 0,1	Vulnérabilité très faible
0,1 – 0,3	Vulnérabilité faible
0,3 – 0,5	Vulnérabilité modérée
0,5 – 0,7	Vulnérabilité fort
0,7 – 1	Vulnérabilité extrême

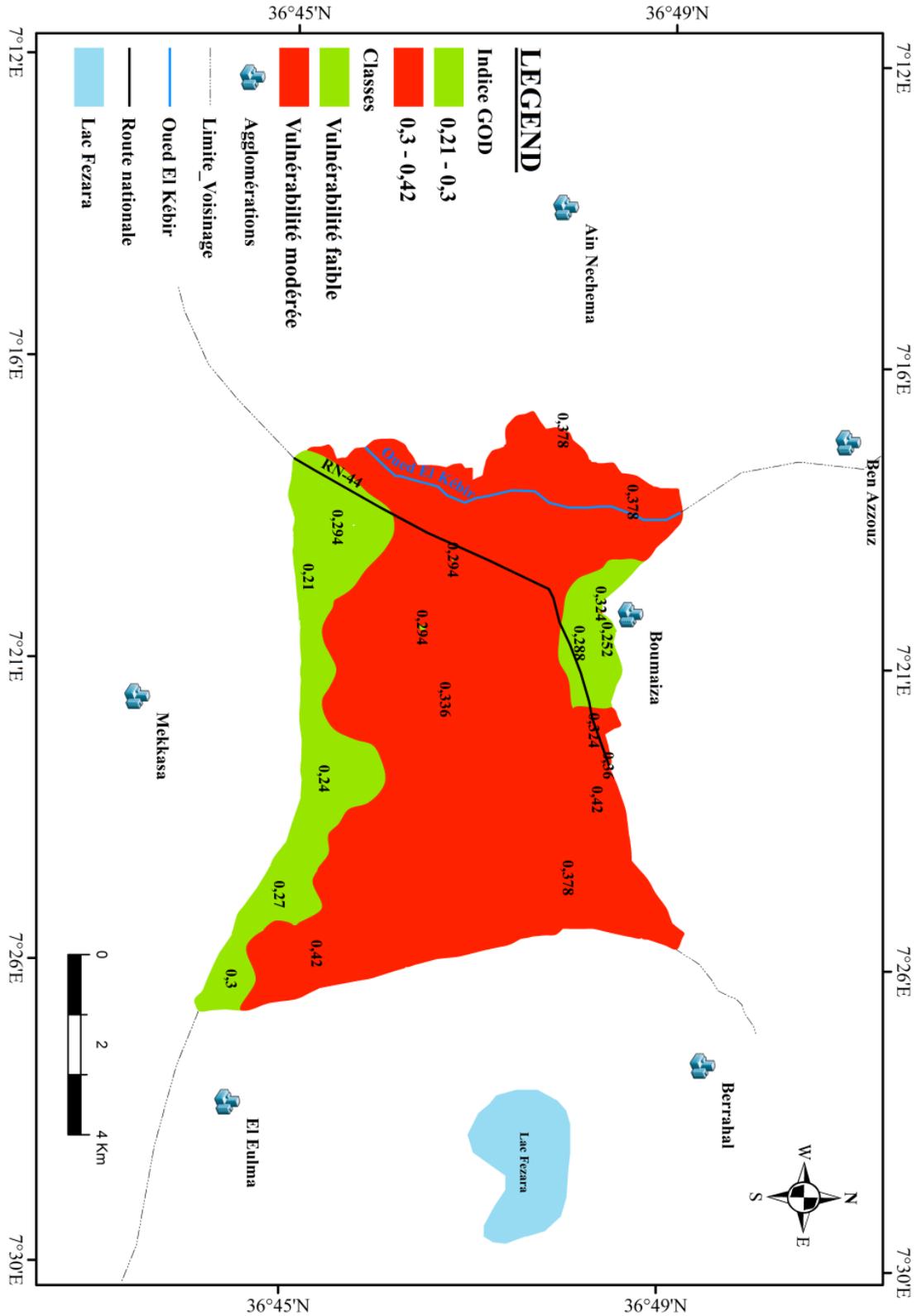


Figure 26 : Carte de vulnérabilité de l'aquifère de la plaine alluviale de Boumaiza par la méthode GOD

5.3. Evaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC

5.3.1. Profondeur du plan d'eau

Le paramètre profondeur de la nappe d'eau souterraine est un paramètre très important dans l'évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère (JORDAN *et al.*, 2005). Ainsi les nappes moins profondes sont facilement accessibles par les polluants infiltrés. Pour déterminer ce paramètre, nous avons utilisés les données des niveaux statiques des forages de la compagnie piézométrique du mois d'avril 2017. Les interpolations ont été faites, à partir de 29 forages que compte la base de données. Le niveau d'eau de la nappe rencontré est entre 1,5 et 12,5 m de profondeur. Selon la classification DRASTIC, quatre classes de profondeur ont été déterminées à savoir:

- ❖ $D < 1,5\text{m}$: couvre 7,25% de la superficie totale de la plaine avec un coefficient 10, se localise sur la partie Est et Sud-est;
- ❖ $1,5\text{m} < D < 4,5\text{m}$: présente 20% de la nappe avec un coefficient 9;
- ❖ $4,5\text{m} < D < 9\text{m}$: couvre la plus grande partie de la zone d'étude avec 58,7% avec un coefficient 7 ;
- ❖ $9\text{m} < D < 12,5\text{m}$: présente 14,05% avec un coefficient de 5 occupe la partie extrême Sud-ouest de la plaine.

Ces indices ont permis d'établir la carte thématique du paramètre profondeur. L'observation de la dite carte montre que les plus faibles indices sont répartis dans la partie sud-ouest. Leurs valeurs $ID=25$, alors que les plus importants indices se situent dans les parties Nord-est et Sud-est avec $ID=45\text{à}50$.

5.3.2. La recharge efficace (R)

La recharge efficace joue un rôle déterminant dans le transfert de la lame d'eau depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère sous-jacent. Elle concerne la quantité d'eau qui franchit la surface du sol pour renouveler les réserves d'eau souterraine et entretenir le débit de l'écoulement souterrain, après circulation dans l'aquifère. Les résultats du bilan hydrologique montrent que la valeur de ce paramètre est estimée à 100 mm sur l'ensemble de la région d'étude. Alors, l'indice DRASTIC est de l'ordre de 6 répartie sur la totalité de la plaine.

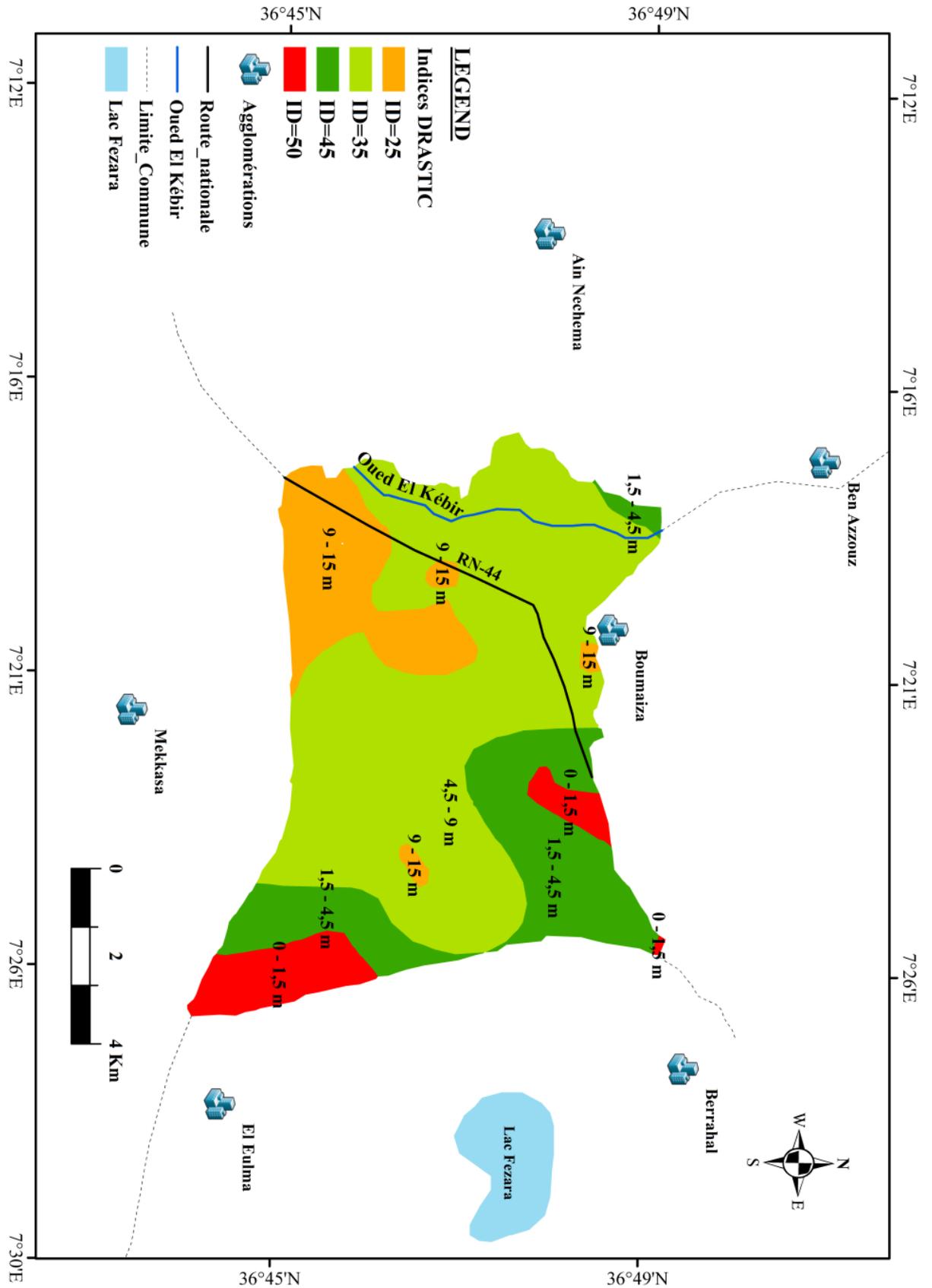


Figure 27 : Carte de répartition spatiale de l'indice DRASTIC pour les profondeurs du plan d'eau

5.3.3. Lithologie de l'aquifère (A)

Nous avons déterminé ce paramètre à partir de la texture des terrains qui constituent la zone non saturé (Jordan *et al.*, 2005). A partir de la carte géologique de la région, nous avons affecté une note pour chaque type de terrain, de plus perméable au moins perméable. L'exploitation des rapports de prospections géophysiques et les coupes géo-électriques interprétatives, montré que la nature lithologique de notre aquifère d'étude est constitué essentiellement des graviers, galets de grés et du sables. Alors, une seule classe lithologique a été déterminée qui est le sable et le gravier, sa cote est 8 alors une indice DRASTIC de l'ordre de 24.

5.3.4. Type de sol (S)

La nature de sol et leur épaisseur sont les deux facteurs qui conditionnent le caractère épurateur et l'aptitude des sols à laisser s'infiltrer un polluant (Bézègues *et al.*, 2002).

Pour déterminer ce paramètre nous nous sommes basés sur la carte de reconnaissance des sols d'Algérie (BONE) 1/200.000. Les sols rencontrés dans la région se répartissent en cinq types de sols. Les valeurs indiciaires ont été déterminées selon les différentes natures de sol.

Tableau 28 : Notation et pondération de la nature du sol

Nature de sol	Cote	Poid	ID sol
Limons Argileux	3	2	6
Limons silteux	4	2	8
Limons	5	2	10
Limons sableux	6	2	12
Argile	1	2	2

L'examen de la carte des indices relatifs à la nature du sol montre que les limons et limons sableux reparties sur la presque totalité de la zone d'étude, représente un risque de vulnérabilité moyen d'une indice DRASTIC ID= 10 à 12 .Le reste des sols représentés par les argiles et limons argileux, répartie sur le périphérique de la plaine alluviale, présente des indices DRASTIC faible oscillent entre 2 à 8.

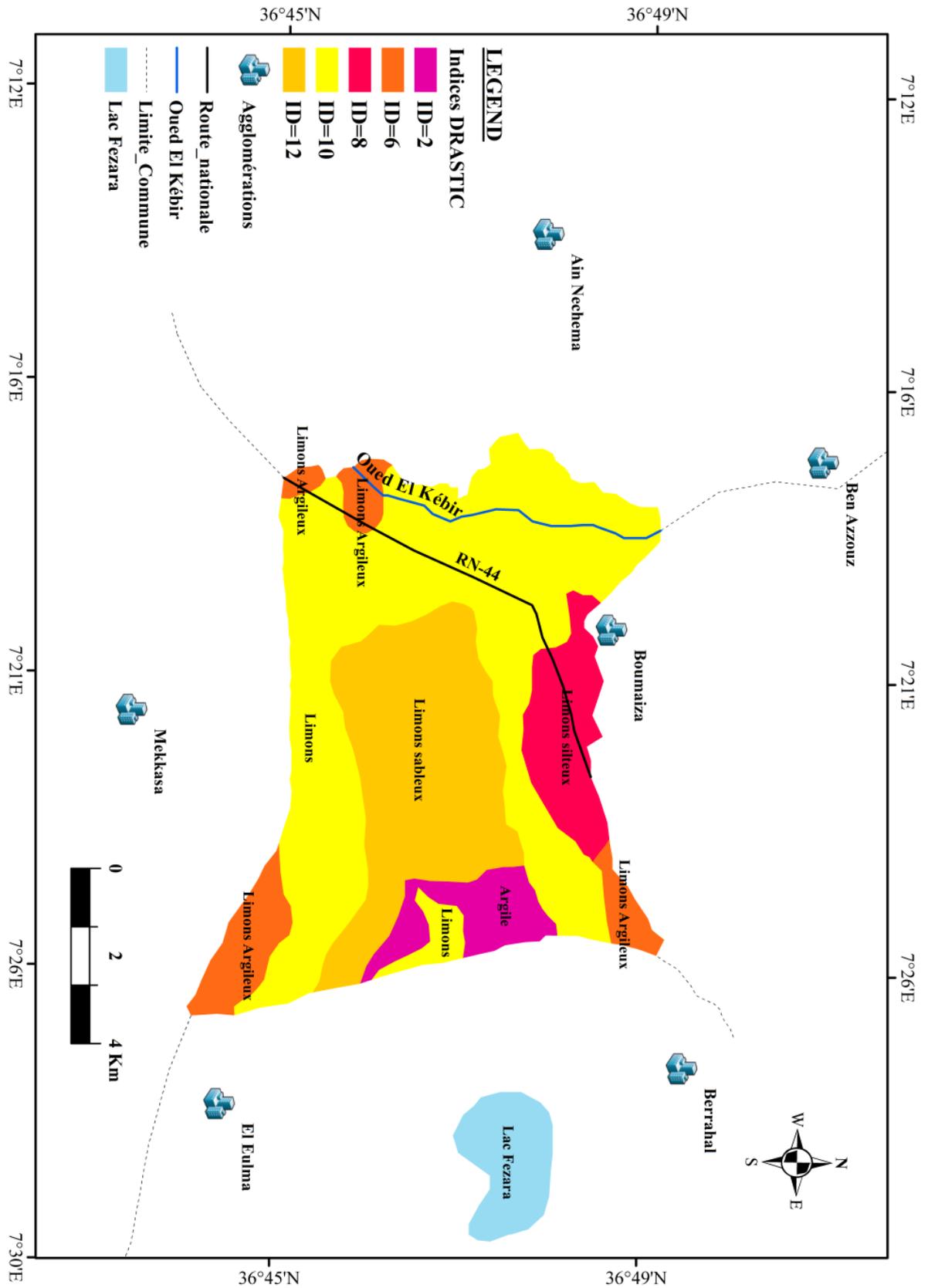


Figure 28 : Carte de répartition spatiale de l'indice DRASTIC pour la nature de sol

5.3.5. La topographie (T)

Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible. Les valeurs de pentes ont été estimées en se référant au modèle numérique du terrain MNT-STRM-3arc, et la projection de ce dernier sur un système de coordonnées prédéfinies sur ArcGis.

Tableau 29 : Différentes classes de pente et leurs indices DRASTIC

Classe	Cote	Poids	ID pente
0 - 2%	10	1	10
2 - 6%	9	1	9
6 - 12%	5	1	5
12 - 18%	3	1	3
18 - 31,5%	1	1	1

L'examen de la carte indicielle montre cinq plages de pente dont 98% représenté par les pentes oscillent entre 0-6% (ce qui caractérise la zone d'étude qu'est une plaine) et la donne un indice DRASTIC élevé de classe de 9 à 10. Les pentes varient entre 6% et 31,5% se localisent sur la partie extrême Sud-est et Nord Nord-ouest de la zone d'étude avec des indices DRASTIC faible entre 1 et 5.

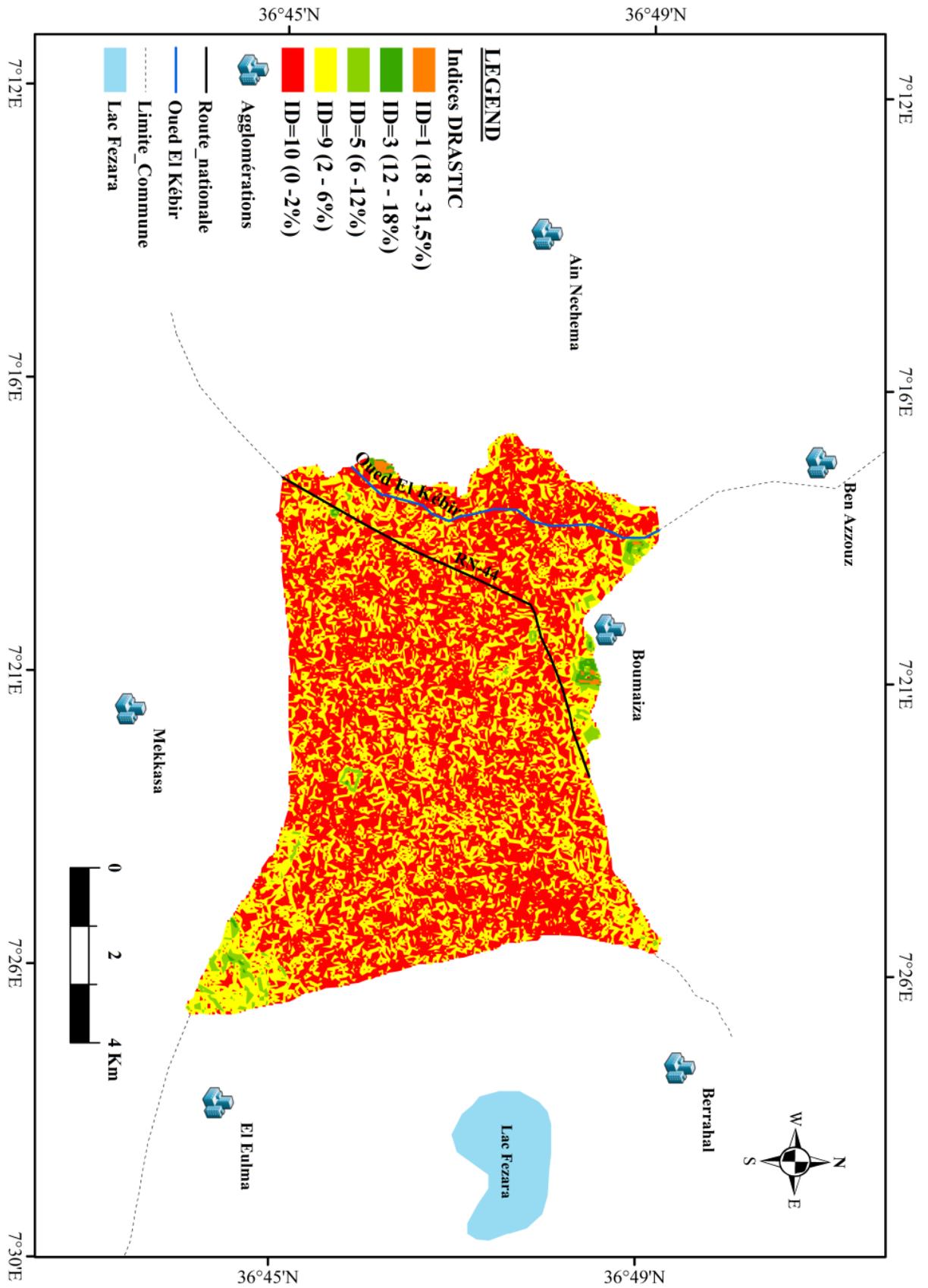


Figure 29 : Carte de répartition spatiale de l'indice DRASTIC pour la pente

5.3.6. Nature de la zone non saturée (I)

L'impact de la zone non saturée est considéré comme étant un paramètre très important dans l'application de la méthode DRASTIC avec un poids ($I_p = 5$). Ainsi cette partie du sol est le siège de nombreux phénomènes tels que l'oxydation, l'infiltration, l'évaporation ...etc. Son fonctionnement, ressemble à celui du milieu aquifère, autrement dit que l'atténuation des contaminants est liée principalement à la granulométrie des matériaux meubles ou au degré de fracturation de la roche.

La consultation des différents documents géologiques et géophysique (cartes et coupes), nous a permis de dire que le milieu non saturé est constitué par un matériau détritique de granulométrie très hétérogène couvre plus de 80% de superficie de la plaine (des limons, sables et argile sableux) et s'étend sur la partie centrale du Est-ouest avec un indice DRASTI $ID=40$ relativement très élevé avec une cote de 8 ; les formations métamorphiques qui se localisent au Nord ($ID=20$) et les grès et du marnes ($ID=30$) qui se localisent au sud-est de la plaine de Boumaiza présente 20% de sa superficie.

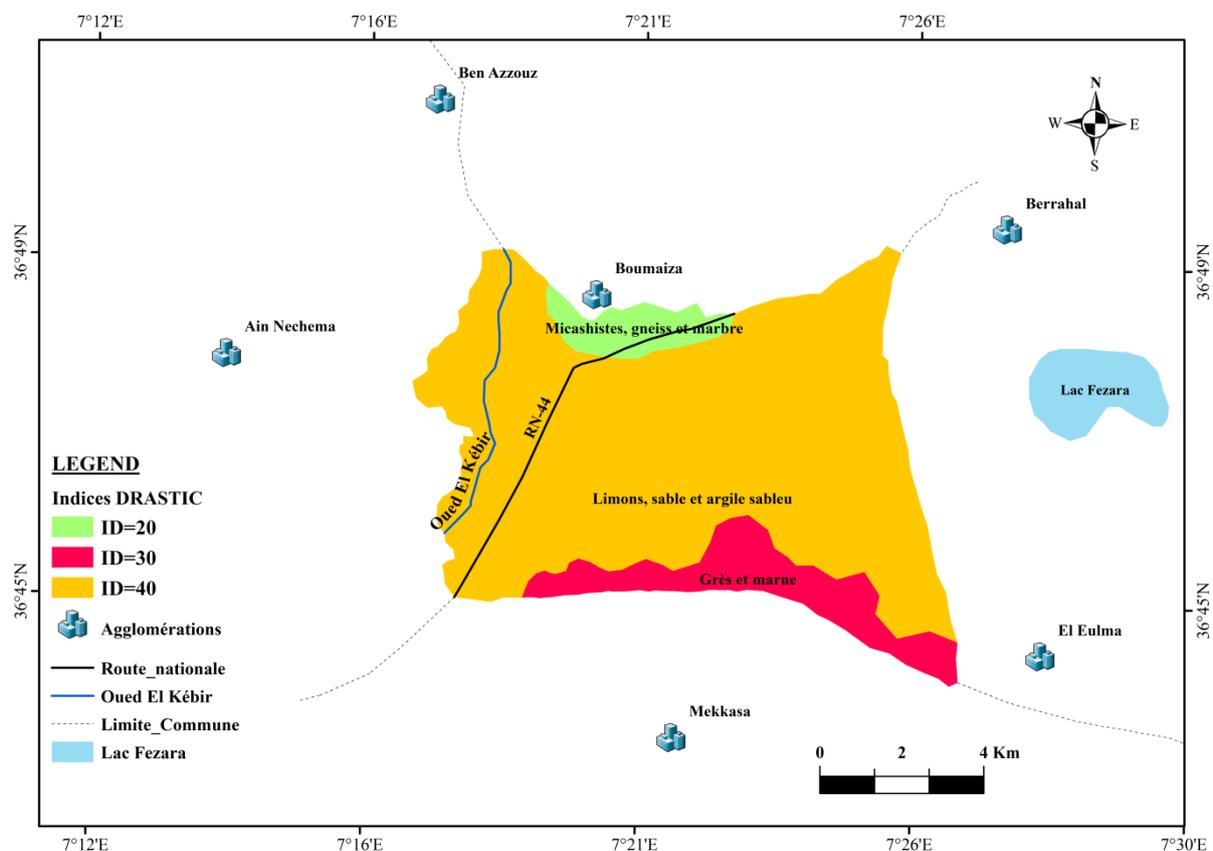


Figure 30 : Carte de répartition spatiale de l'indice DRASTIC pour zone non saturée de l'aquifère

5.3.7. Conductivité hydraulique (C)

La perméabilité de la couche aquifère nous renseigne sur la vitesse de propagation des polluants dans la nappe. Plus ce paramètre est important, plus le transfert des polluants est rapide. Les données sur la perméabilité de l'aquifère sont celles des résultats obtenues par C.KHAMMAR 1981 (Contribution à l'étude hydrogéologique de la vallée de l'oued kébir ouest, wilaya de Skikda –Algérie). A partir de ces données nous avons obtenu la couche d'information concernant la perméabilité par interpolation sous SIG. Les valeurs de perméabilité utilisées sont réparties sous une seule classe ; $9,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} < C < 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ dans toute la région avec une cote de 10 nous donne un indice DRASTIC ID=30 très élevé.

5.4. Carte de synthèse (vulnérabilité à la pollution)

Par la superposition des sept cartes pondérées nous avons obtenu la carte des indices DRASTIC. A partir de cette carte et à l'aide du module « Spatial Analyst » nous avons transformé la carte de répartition de l'indice DRASTIC en une carte de vulnérabilité, ce qui a permis par conséquent, la transformation des valeurs numériques en classe de degré de vulnérabilité.

L'indice DRASTIC (ID) de la plaine alluviale de Boumaiza s'échelonne de 144 à 202. Les basses valeurs de cet indice (144-160) sont enregistrées au niveau de la partie Nord sur une très petite superficie (0,64 km²). Les valeurs de cet indice oscillent entre 160 et 180 occupent une superficie de 37,86 Km² l'équivalent de 29,6% de la superficie totale de la zone d'étude. La plus grande partie (61,5 km², 69,65%) caractérisée par des indices DRASTIC très élevés varient entre 180-202 s'étale sur la majorité de la plaine de Boumaiza et occupe la partie centrale vers l'Est, Nord-est et Sud-est et de la partie centrale vers l'Ouest.

Pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité nous avons utilisé deux classes de vulnérabilité comme indiquée au tableau ci-dessous.

Tableau 30 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC

Indice de Vulnérabilité	Degré de vulnérabilité
< 100	Vulnérabilité faible
101 – 140	Vulnérabilité moyen
141 – 200	Vulnérabilité fort
>200	Vulnérabilité très fort

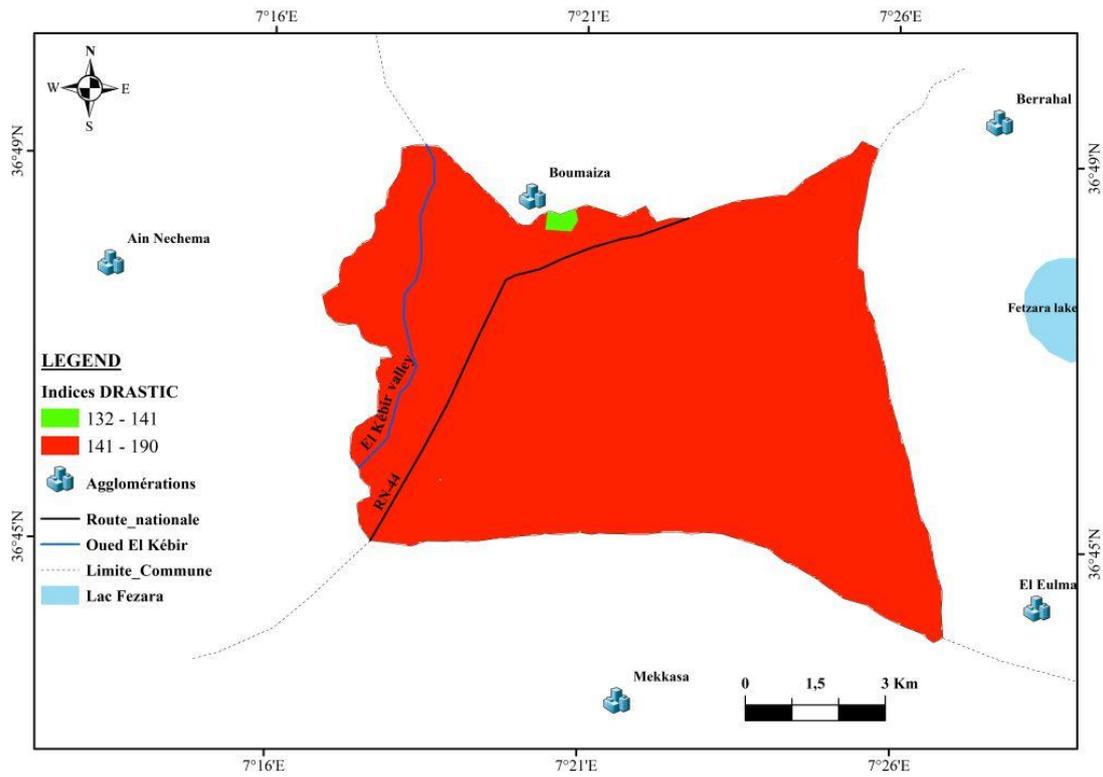


Figure 31 : Carte de répartition spatiale de l'indice DRASTIC

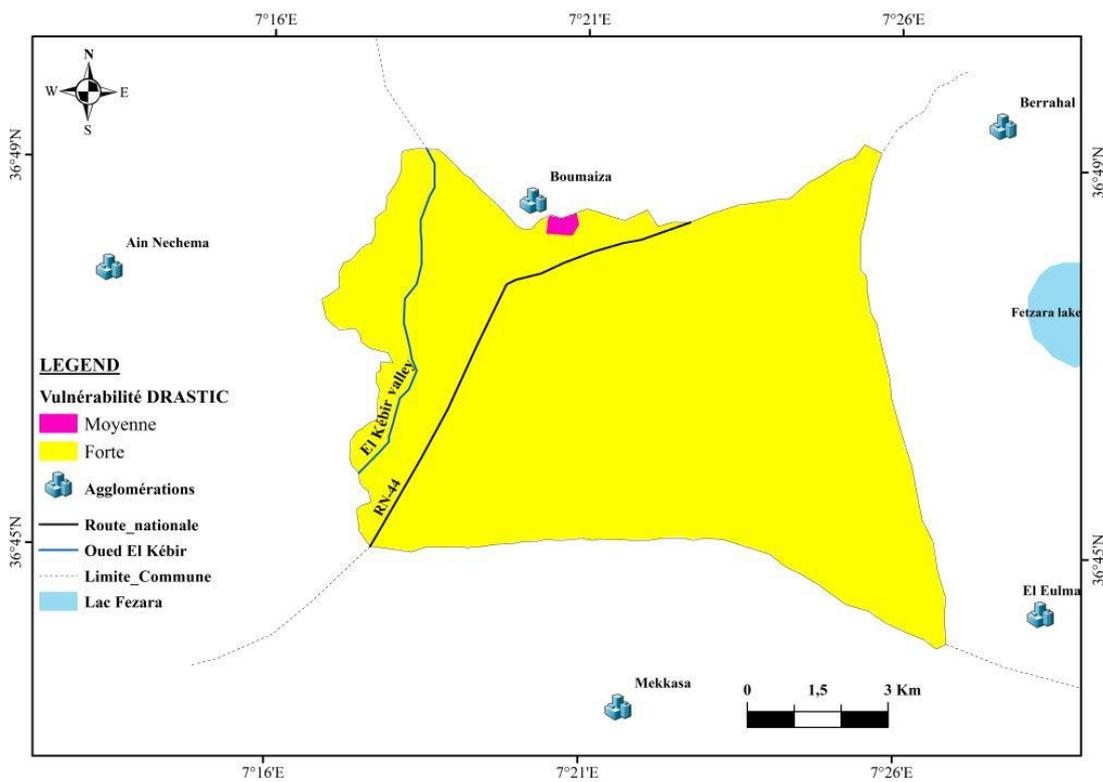


Figure 32 : Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe alluviale de Boumaiza avec la méthode DRASTIC

❖ A partir de la carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Boumaiza, on constate que cette nappe est caractérisée par l'étendue spatiale des terrains à forte vulnérabilité qui domine la superficie totale de la zone d'étude par 88,15 Km² soit un pourcentage de 99,71% d'où les indices DRASTIC se varient entre 141 à 190. Ces terrains sont des zones caractérisées par une zone non saturée perméable, une faible profondeur de la nappe et sols de limons et limons sableux ce qui peut augmenter leur risque de pollution.

❖ Le reste des terrains présentent 0.65 Km² soit un pourcentage de 0.29 % de superficie totale de la plaine de Boumaiza, où les indices DRASTIC varient entre 132 à 141, se sont des terrains d'une vulnérabilité moyenne.

6. Qualité des eaux de la nappe alluviale de Boumaiza

La mauvaise protection de différentes réserves hydriques, superficielles ou souterraines, particulièrement dans un milieu vulnérable à la pollution (cas de la plaine alluviale de Boumaiza), engendre une dégradation de la qualité de l'eau dans le milieu naturel.

La qualité des eaux de la région de Boumaiza, tenant compte l'intensité de l'activité agricole, ainsi que l'extension de l'industrie, est fortement exposé à la pollution. Il s'agit de rejets des usines, et les polluants dus à l'agriculture (engrais, produits phytosanitaires),

L'eau de la région de Boumaiza est exploitée pour différents domaines vitaux telle que l'agriculture, l'industrie et l'AEP, raison pour laquelle la qualité de cette eau doit être continuellement contrôlée.

On se basant sur les résultats obtenus par les auteurs, qui ont étudiés les caractéristiques chimiques des eaux souterraines de Boumaiza (Khammar C., 1981, Guechi S., 2004 et Hadj Said S., 2007), on va mettre en évidence la composition chimique, ainsi que la qualité d'eau de la région.

6.1. Les paramètres physico-chimiques

Ces paramètres sont au nombre de cinq et sont mesurés sur le terrain.

Tableau 31: Les paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe alluvial de Boumaiza

Paramètre	Température (T °C)	Oxygène dissous (OD) en mg/l	Potentiel d'hydrogène (pH)	Conductivité électrique (CE) en ms/cm	Potentiel d'oxydoréduction (Eh) en mV
Valeurs	12 à 25	0,7 à 5,1	6,97 à 8,02	920 à 2230	110 à 179

6.2. Caractéristiques chimiques des eaux souterraines

Les résultats d'analyses chimiques effectuées sur la nappe des graviers de Boumaiza (Khammar, campagne de 1979 et Mai 1980 ; Hadj Said, campagnes Juillet 1999, Août 2000, Octobre 2000 et Juin 2002 ; Guechi, campagne 2002), ont montrés l'existence de plusieurs facies chimiques dominantes :

- Facies chloruré-sodiques couvrent la presque totalité de la plaine. On les rencontre à la limite Sud du lac Fetzara, à l'Ouest et au Nord Ouest. Proviennent des argiles numidiennes ayant un caractère sodique.
- Faciès bicarbonaté-calcique se trouve en grande partie dans la zone de Hadjar Soud (partie Sud de Boumaiza). Ce faciès est lié aux formations calcaires du Lias.
- Faciès Chloruré-magnésien présent dans la partie Nord-Est de la plaine de Boumaiza en liaison avec les schistes métamorphiques et les dolomies du Rhétitien-Sinumurien.

6.3. Evolution des teneurs en nitrates dans le temps

L'évolution des concentrations des nitrates pour une durée de 5 ans, allant de 1998 jusqu'à 2002, a met en évidence un accroissement des concentrations atteignant un maximum de l'ordre de 64 mg/l durant la période de crue (période de la recharge de la nappe), par contre, des faible valeurs en période d'étiage. Ceci confirme l'origine des nitrates qui ne peut être que superficielle et due essentiellement à l'usage excessif des engrais riches en cet élément chimique pendant la période des semences (Guechi, 2004).

6.4. Aptitude des eaux à l'irrigation

L'activité agricole nécessite des grandes quantités d'eau afin de répondre aux besoins des diverses cultures, c'est le cas de la région de Boumaiza. Pour cela, la qualité des eaux utilisées doit présenter des paramètres physico-chimiques tolérables par les plantes, parce que les eaux trop minéralisées, spécialement les fortes teneurs du sodium peuvent nuisent les cultures et perturber leur croissance et par conséquence une diminution au rendement.

Le classement des eaux d'irrigation fait par le diagramme de Richard (1954), sur la base du taux d'absorption du sodium (SAR) en fonction de la conductivité électrique (en m s/cm à 25 °C) définit par la formule suivante : $SAR = Na / Ca + Mg / 2$ (meq/l).

L'analyse de résultats obtenus par Hadj Said (2007), a montré que dans l'ensemble, les eaux de la région conviennent à l'irrigation des diverses cultures. Dans la période de mois de juin, les eaux caractérisées par une qualité moyenne. Alors que pour le mois de mai sont d'une mauvaise qualité. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il y a eu une dilution des eaux pendant

le mois de juin, alors que pendant le mois de mai l'effet d'évaporation a provoqué une concentration des éléments ce qui a détérioré sa qualité chimique (Guechi, 2004).

7. Conclusion

L'étude de la vulnérabilité de la nappe alluviale de Boumaiza basée sur l'établissement de la carte d'estimation de la sensibilité de la nappe d'eau souterraine à la contamination de manière générale selon la méthode d'estimation DRASTIC et GOD.

Selon la méthode GOD, les facteurs de la profondeur du plan d'eau et la zone non saturé étaient les facteurs déterminants, vu l'homogénéité du troisième paramètre qui est le type de la nappe sur tout la zone d'étude avec un coefficient GOD de 0,6. Selon les valeurs de l'indice de GOD en distingue deux classes de vulnérabilité réparties sur la totalité de la plaine de Boumaiza :

- ❖ Classe d'une vulnérabilité faible occupe la partie Nord-ouest et la partie sud, sur une superficie de 18,2 Km² soit 20,5% de la superficie de la nappe étudiée.

- ❖ Classe d'une vulnérabilité modérée occupe la majorité de la partie centrale de la plaine et 70,6 Km² soit 79,5% de la superficie de la nappe étudiée.

Selon la méthode DRASTIC, considérer plus précise en raison du traitement de sept paramètres par rapport à la méthode GOD qui traite trois paramètres, quatre paramètres constatés décisifs à la détermination des différentes classes de vulnérabilité de la plaine alluviale de Boumaiza vu le poids des notes attribués à chaque paramètre (profondeur du plan d'eau, la recharge, ZNS de l'aquifère et la pente). Selon les valeurs de l'indice DRASTIC en distingue deux classes de vulnérabilité réparties sur la totalité de la plaine de Boumaiza :

- ❖ Classe de forte vulnérabilité couvre la majorité de la superficie de la plaine alluviale de Boumaiza par 88,15 Km² soit un pourcentage de 99,71%.

- ❖ Classe de moyenne vulnérabilité couvre 0,65 Km² soit un pourcentage de 0,29 % de superficie totale de la zone d'étude.

Les données nécessaires pour montrer la validité de la carte de vulnérabilité obtenue ne sont pas disponibles. Cependant la précision de la méthode DRASTIC dans l'élaboration de la vulnérabilité a été vérifiée par plusieurs auteurs dans différentes régions climatiques du monde (Mohamed *et al.*, 2007). Au Canada (Isabel *et al.*, 1990) ont vérifié la validité de la méthode sur des unités hydrogéologiques différentes. Le même auteur a constaté que les zones réellement contaminées correspondent à celles où les indices de vulnérabilité sont les

plus élevés. A la différence de la méthode DRASTIC, la méthode GOD utilise une approche où la vulnérabilité est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone non saturée, au sens de pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation que présente la couche sous-jacente à la zone saturée (Sinan *et al.*, 2007).

CHAPITRE VI

LES PERIMETRES DE PROTECTION

1. Introduction

L'eau douce nécessaire à l'alimentation des populations en eau potable, peut être soustraite de divers types de réservoirs tels qu'un cours d'eau, un lac de retenue naturelle ou artificielle ou une nappe d'eau souterraine. Le choix dépend des ressources locales mais porte de préférence sur les réservoirs les moins exposés aux contaminants que sont les nappes d'eau souterraines afin de bénéficier d'une eau brute ayant la meilleure qualité possible.

Tout apport de substances indésirables dans l'eau souterraine causé par les activités humaines est considéré comme une pollution. Ces substances sont susceptibles de s'infiltrer à travers le sol et la zone non saturée, puis d'atteindre la nappe. L'eau souterraine va alors disperser la pollution bien au-delà du lieu de contamination initiale. La contamination de l'eau souterraine sera alors difficile et parfois impossible à traiter.

De ce fait, la lutte contre la pollution des ressources en eau souterraines constitue un des moyens les plus faciles et les moins coûteux. Cette protection devra se faire à travers l'élaboration des cartes de vulnérabilité à la pollution de ces ressources et par la protection des captages d'eau par des périmètres de protection.

Le décret exécutif n° 07-399 du 14 Dhou El Hidja 1428 correspondant au 23 décembre 2007 relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eau (Journal officiel de la république Algérienne N°80, Chapitre 1-2, Article 01-23) impose la mise en œuvre de trois périmètres de protection (immédiat, rapproché et éloigné) autour des captages d'eau potable. Malheureusement, à ce jour aucun des captages d'eau n'est réellement protégé par ces périmètres de protection.

La nappe alluviale de Boumaiza (située au Nord Est de l'Algérie, s'étend sur une superficie de 88,8 Km²) considérée comme l'unique et principale réserve d'eau souterraine dans la région. Cette réserve joue un rôle capital pour le développement socio-économique et agricole de la région.

L'étude de la vulnérabilité de la nappe alluviale de Boumaiza, basée sur l'établissement de la carte de sensibilité de la nappe d'eau souterraine à la contamination selon la méthode d'estimation DRASTIC, a montré que cette dernière est caractérisée par une forte vulnérabilité ce qui la rend exposée à un très important danger de pollution. De ce fait, et vu l'intérêt de la nappe alluviale de Boumaiza au développement socio-économique de la région, il est devenu indispensable de préserver ces ressources en eau menacées par l'établissement des périmètres de protection des ouvrages de captages implantés dans la région.

2. Concept des périmètres de protection

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

La notion des périmètres de protection est largement traitée dans la littérature internationale (Lallemand-Barrés et Roux, 1999 ; Bussard T, 2005 ; Vernoux et al., 2007). 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.

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

Trois périmètres de protection des ressources en eau (forages, champs captant, barrages, sources, etc.) : le périmètre de protection immédiate ; le périmètre de protection rapprochée et le périmètre de protection éloignée.

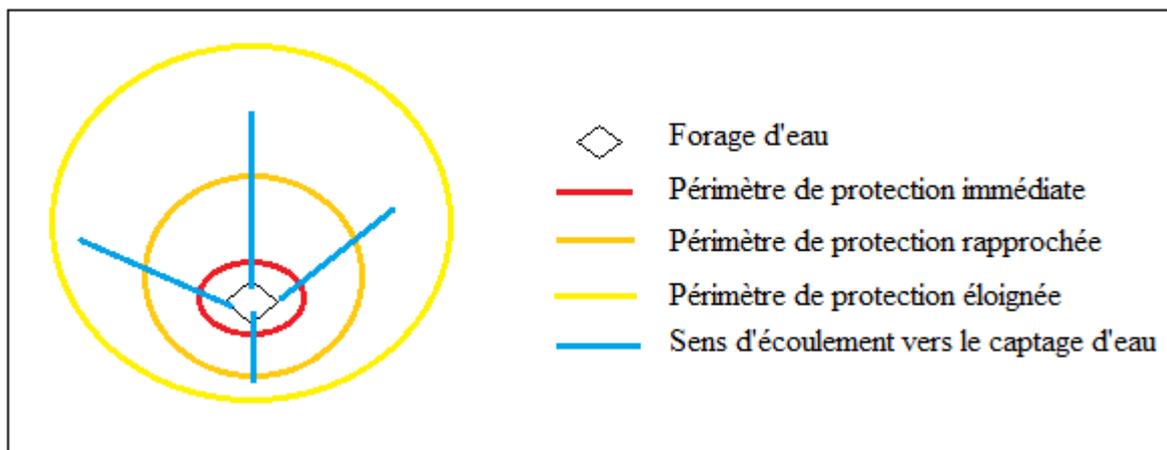


Figure 33 : Schéma représentatif des périmètres de protection

2.1. Le périmètre de protection immédiate (PPI)

Ce périmètre a pour but d'éviter les intrusions à proximité du captage et éviter les dégradations ou les déversements de substances polluantes au niveau de l'ouvrage. Il correspond à un contour minimal de 30 mètres au tour du captage, doit être délimité par un grillage haut de deux mètres autour du point de captage comportant un portillon pouvant être fermé à clef. Le terrain du périmètre de protection immédiate doit appartenir à une collectivité publique ou faire l'objet d'une convention entre le propriétaire et l'établissement public de coopération intercommunale. Toutes les activités y sont interdites hormis les activités liées à l'entretien et l'exploitation de l'ouvrage.

2.2. Le périmètre de protection rapprochée (PPR)

Le périmètre de protection rapprochée est un périmètre plus vaste où toutes les activités sont soumises à des prescriptions particulières. Il a pour but de prévenir la migration de polluants issus de pollutions ponctuelles vers l'ouvrage de captage (définie par un temps de transfert d'environ 50 jours pour aller jusqu'à l'ouvrage de captage, avec une distance d'au minimum 50 m depuis l'ouvrage). Il présente une zone intermédiaire, qui accepte des activités sans risques pour la ressource et le captage, ou des activités diminuant le risque de pollution. Sa surface varie selon la vulnérabilité du captage et de la ressource en eau. La zone de protection rapprochée doit garantir qu'aucun microorganisme pathogène ne parvienne dans l'eau potable et que l'eau souterraine ne soit pas contaminée ou bloquée sur le dernier tronçon qu'elle parcourt avant le captage.

2.3. Le périmètre de protection éloignée (PPE)

Généralement délimitée par la totalité du bassin d'alimentation. Il prolonge éventuellement le précédent pour renforcer la protection contre les pollutions permanentes ou diffuses. Ce périmètre se trouve entre la limite du périmètre de protection rapprochée et la limite de l'aire d'alimentation de la nappe aquifère. Il sera créé si l'on considère que l'application de la réglementation générale, même renforcée, n'est pas suffisante, en particulier s'il existe un risque potentiel de pollution que la nature des terrains traversés ne permet pas de réduire en toute sécurité, malgré l'éloignement du point de prélèvement. La zone de protection éloignée doit garantir que l'on dispose, en cas d'accident, de suffisamment de temps et d'espace pour écarter tout danger pour l'eau potable exploitée. Les entreprises qui représentent une menace pour les eaux souterraines (les stations d'essence par exemple) ne sont donc pas admises dans la zone de protection éloignée. Il est également interdit d'y laisser s'infiltrer les eaux usées et d'y extraire du gravier.

3. Textes juridiques et procédures de protection Algérienne

Le législateur Algérien, depuis la loi n° 83 du 16 Juillet 1983 portant le code des eaux (J.O.R.A. N°30, 1983) jusqu'au le décret exécutif n° 10-73 du 21 Safer 1431 correspondant au 06 Février 2010 relatif à la protection quantitative des nappes aquifères (J.O.R.A. N°11, 2010), a adopté plusieurs textes législatifs relatifs à l'eau, dont le but principale est de protéger les ressources en eau.

Le premier texte législatif qui a défini la protection des captages par des périmètres de protection, c'était la loi n° 83 du 16 Juillet 1983 portant le code des eaux, par 16 articles (art.109 jusqu'à art.124). Il a interdit ou réglementé toutes les activités à l'intérieur des périmètres de protection (PP c'est le contour délimitant un domaine géographique) qui peuvent polluer les ressources en eau souterraine telle que l'installation de canalisation des d'hydrocarbures, ou bien des eaux usées de toutes natures, l'épandage de fumier ou engrais pour fertilisation des sols et les dépôts des produits susceptibles d'altérer la qualité de l'eau.

En 2005, les articles 38 – 52 de la loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relatif à l'eau, vient pour adopter la protection des ressources en eau souterraines soit qualitative ou quantitative, par 'établissement des zone de protection qualitative. Elle a déterminée les règles et les interdictions de toute activités à l'intérieur de cette zone telle que le déversement ou le rejet d'eau usées dans les ouvrages de captages des eaux souterraines, le dépôts ou l'enfouissement de matières insalubres susceptible de polluer les eaux souterraines, et d'autre coté l'obligation des unité industrielle de prévoir des installation d'épuration appropriées.

En 2007, le décret exécutif n° 07-399 du 23 Décembre 2007 relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eaux, vient pour fixer les conditions et les modalités de création et de délimitation des périmètres de protection qualitative des ressources en eau, la nomenclature des périmètres de protection requis pour chaque type d'ouvrage ou d'installation de mobilisation, de traitement et de stockage d'eau, ainsi que les mesures de réglementation d'activités dans chaque périmètre de protection qualitative. la protection qualitative des ressources en eau est assurée par trois types de périmètres de protection :

- ✓ le périmètre de protection immédiate qui a pour but d'empêcher l'introduction directe de substances polluantes dans l'eau. Son étendue est constituée par les terrains d'emprise des ouvrages et installations de mobilisation, de traitement et de stockage d'eau ;

✓ le périmètre de protection rapprochée qui a pour but d'empêcher la dégradation de la qualité de l'eau par migration souterraine ou superficielle de substances dangereuses, toxiques ou indésirables à partir des lieux d'émission des pollutions. Son étendue est déterminée notamment sur la base du temps de migration entre le lieu d'émission de la pollution et le point de prélèvement de la ressource en eau ; celle-ci correspond, pour les eaux souterraines, à la zone d'appel du captage ;

✓ le périmètre de protection éloignée qui a pour but de prolonger le périmètre de protection rapprochée pour renforcer la protection contre les risques de pollutions chroniques, diffuses ou accidentelles. Son étendue correspond à la surface comprise entre la limite du périmètre de protection rapprochée et la limite du bassin versant pour les eaux superficielles ou du bassin d'alimentation pour les nappes d'eau souterraine.

Le décret a fixé les conditions, ainsi que la modalité de création et de délimitation des périmètres de protection en deux sections : le champ d'application et la procédure d'instauration des périmètres de protection qualitative.

En 2010, le décret exécutif n° 10-73 du 6 Février 2010, vient pour objet de fixer les modalités de délimitation des périmètres de protection qualitative des nappes aquifères ainsi que les conditions spécifiques d'utilisation de leurs ressources en eau. L'objet d'un dispositif de protection quantitative est d'assurer la prévention des ressources soit par des prélèvements d'eau raisonnables par rapport à la capacité renouvelable de l'aquifère soit l'évitement de la surexploitation de la nappe aquifère.

4. Les périmètres de protection à travers le monde

Les procédures nationales de protection des eaux souterraines contre les polluants définies dans divers pays sont représentées dans le tableau 32 ci-dessous.

D'une manière générale, le concept actuel des zones de protection des eaux souterraines est basé sur les paramètres suivants : temps de transit (à cause des germes) et distance depuis l'ouvrage de captage.

La protection la plus répandue à travers le monde contient le zonage suivant :

Zone I : Protection immédiate, contre une dégradation physique ou une introduction directe de polluants dans le captage (10 à 30 m depuis l'ouvrage de captage).

Zone II : Protection rapprochée, contre une pollution bactériale ou virale (définie par un temps de transit d'environ 50 jours pour aller jusqu'à l'ouvrage de captage, avec une distance d'au minimum 50 m depuis l'ouvrage).

Zone III : Protection éloignée, contre les polluants persistants (généralement délimitée par la totalité du bassin d'alimentation).

Tableau 32 : Les périmètres de protection (Amérique du Nord et Europe) d'après Bussard, 2005

Régions	Protection immédiate	Protection rapprochée	Protection éloignée		Référence		
Amérique du Nord	Québec	30 m	Bassin d'alimentation		(MEF, 1995)		
	Colombie Brit.		1 année		(BCMELP, 2000)		
	USA	> 30 m (Z I)	> 50 jours, > 150 m (Z II)	> 15 ans (Z III)			
Europe	Angleterre		50 jours, > 50 m (Z I)	400 jours, 25 % du bassin d'alim (Z II)	Bassin d'alim. (Z III)	(Harris, 2001)	
	Allemagne	10 m (Z I)	50 jours (Z II)	2000 m (Z IIIA)	Bassin d'alim. (Z IIIB)	(Gramel et Urban, 2001)	
	Danemark	10 m	300 m	ZP spécifique au site basée sur une cartographie de la vulnérabilité	Bassin d'alim.	(Thomsen et al., 2004)	
	France	environ 15 m	environ 50 jours	ZP non obligatoire, elle peut couvrir une surface très variable		(Office International de l'Eau, 2000)	
	Belgique	10 m	1 jour ou 35 m autour d'un puits, 25 m de part et d'autre de l'axe d'une galerie	50 jours ou 1000 m pour un aquifère de fissures ou karstique, 500 m pour un aquifère graveleux, 100 m pour un aquifère sableux		(Gouvernement Wallon, 1992)	
	Pays-Bas	30 m	60 jours	10 ans, > 800 m	25 ans, > 1200 m	Bassin d'alim.	(USEPA, 1987)
	Suisse	10 m (S1)	10 jours, > 100 m (S2)	Extension double de la S2 (S3)		aire Zu: zone qui contribue à env. 90% du débit capté	(OFEFP, 2004)

5. Notions du bassin d'alimentation des captages et portion de nappe alimentant le captage (BAC et PNAC)

5.1. Bassin d'alimentation des captages (BAC)

Le bassin hydrogéologique d'un aquifère (Figure 37) est la partie d'un aquifère, simple ou complexe, dans laquelle les eaux souterraines s'écoulent vers un même exutoire ou groupe d'exutoires (Vernoux et al., 2007) ; il est délimité par une ligne de partage des eaux souterraines qui, à l'encontre de celle des bassins de surface peut être migrante ; c'est l'homologue souterrain d'un bassin versant pour les eaux de surface (Castany et Margat, 1977). Ce système correspond à la partie souterraine contenant de l'eau, d'une portion, de la totalité ou de plusieurs bassins hydrologiques (Gilli et al., 2008).

Le bassin d'alimentation des captages (BAC) est le lieu des points de la surface du sol qui contribuent à l'alimentation du captage. A l'intérieur d'un bassin versant souterrain, on peut définir une portion de la nappe d'eau souterraine alimentant le captage (PNAC) ; elle représente des particules d'eau située en un endroit quelconque de la zone saturée qui termineront leur course dans le captage (Fig.36).

Dans les cas simples, le bassin d'alimentation concerne un seul aquifère et correspond à la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage. C'est ce que montre la

figure 37, en considérant que la surface située entre la crête topographique et la crête piézométrique est infiltrant.

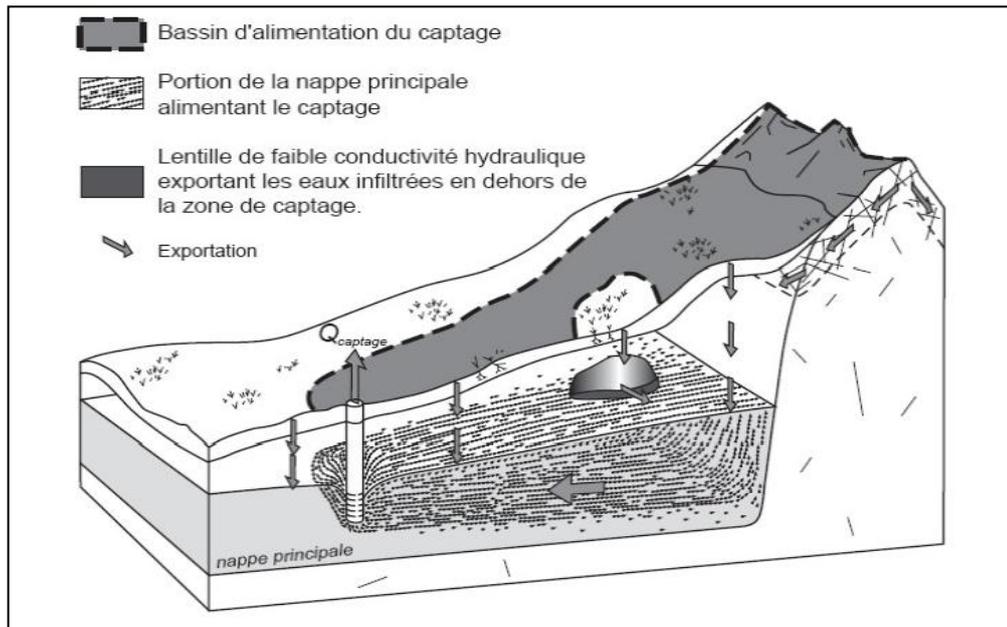


Figure 34 : Le BAC et le PNAC

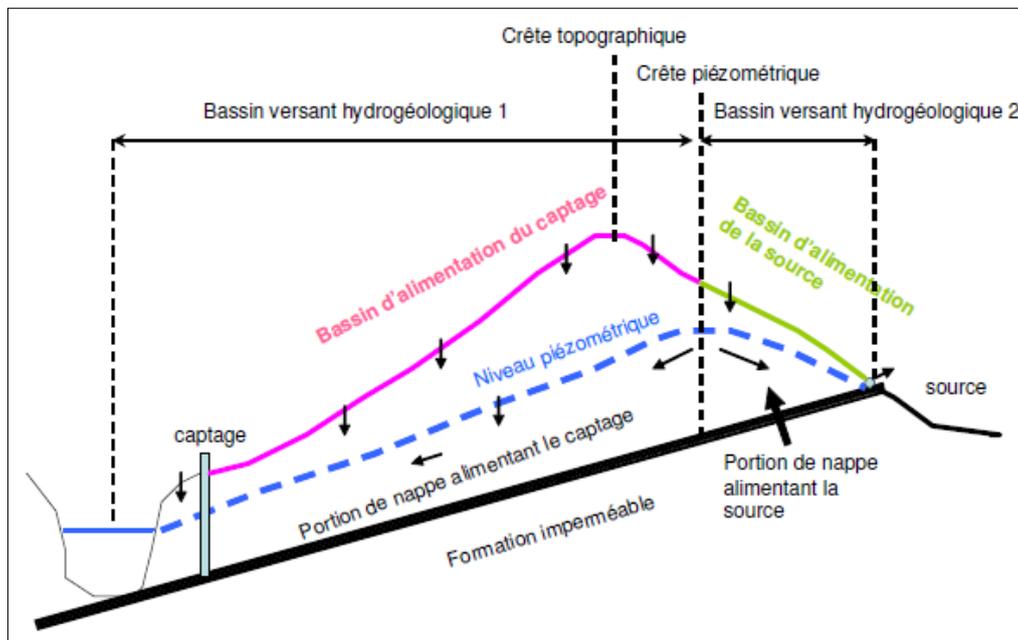


Figure 35 : Bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage (BAC)

Si cette surface était imperméable, le bassin d'alimentation du captage serait plus réduit et à l'inverse le bassin d'alimentation de la source serait plus étendu. Dans la pratique une surface étant rarement totalement ruisselante ou infiltrant, la zone située entre la crête topographique

et la crête piézométrique devrait être prise en compte pour les deux bassins, les deux BAC ayant alors une partie commune.

Dans des cas plus complexes le bassin hydrogéologique prend en compte plusieurs aquifères. Le bassin d'alimentation du captage est toujours compris à l'intérieur du bassin hydrogéologique de l'aquifère principal mais il peut alors s'étendre au-delà de l'extension structurale de l'aquifère principal.

Le bassin d'alimentation d'un captage qui, rappelons le, est le secteur en surface qui participe à l'alimentation du captage par l'infiltration directe des eaux ou par l'infiltration de cours d'eau, suit généralement la projection directe des eaux ou par l'infiltration de cours d'eau, suit généralement la projection verticale de la portion de la nappe qui alimente le captage, mais il peut en différer par ajout ou retrait de zones en surface.

5.2. Portion de la nappe alimentant le captage (PNAC)

La portion de nappe alimentant le captage peut être délimité à partir des lignes de courant convergeant vers l'exutoire, dans le cas où le captage se situe à l'exutoire du bassin hydrogéologique. Elle est peu dépendante du débit du captage. Dans les autres cas, elle correspond aux lignes de courant qui sont détournées vers le captage en fonction du débit. La portion de nappe alimentant le captage ne doit pas être confondu avec la zone d'influence ou la zone d'appel de captage (Fig. 38).

La zone d'influence du captage correspond à la zone d'abaissement de la surface piézométrique lié au pompage.

La zone d'appel correspond à 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 choisit.

A 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.

Le temps du transfert est le temps nécessaire pour la migration des substances polluantes vers le captage au niveau de la nappe, il est déterminé soit par le calcul (méthode de HOFMANN et Lillich, méthode de Wyssling ou bien celle de EPA) soit par des abaques (mises au point par (Sauty & Thiery).

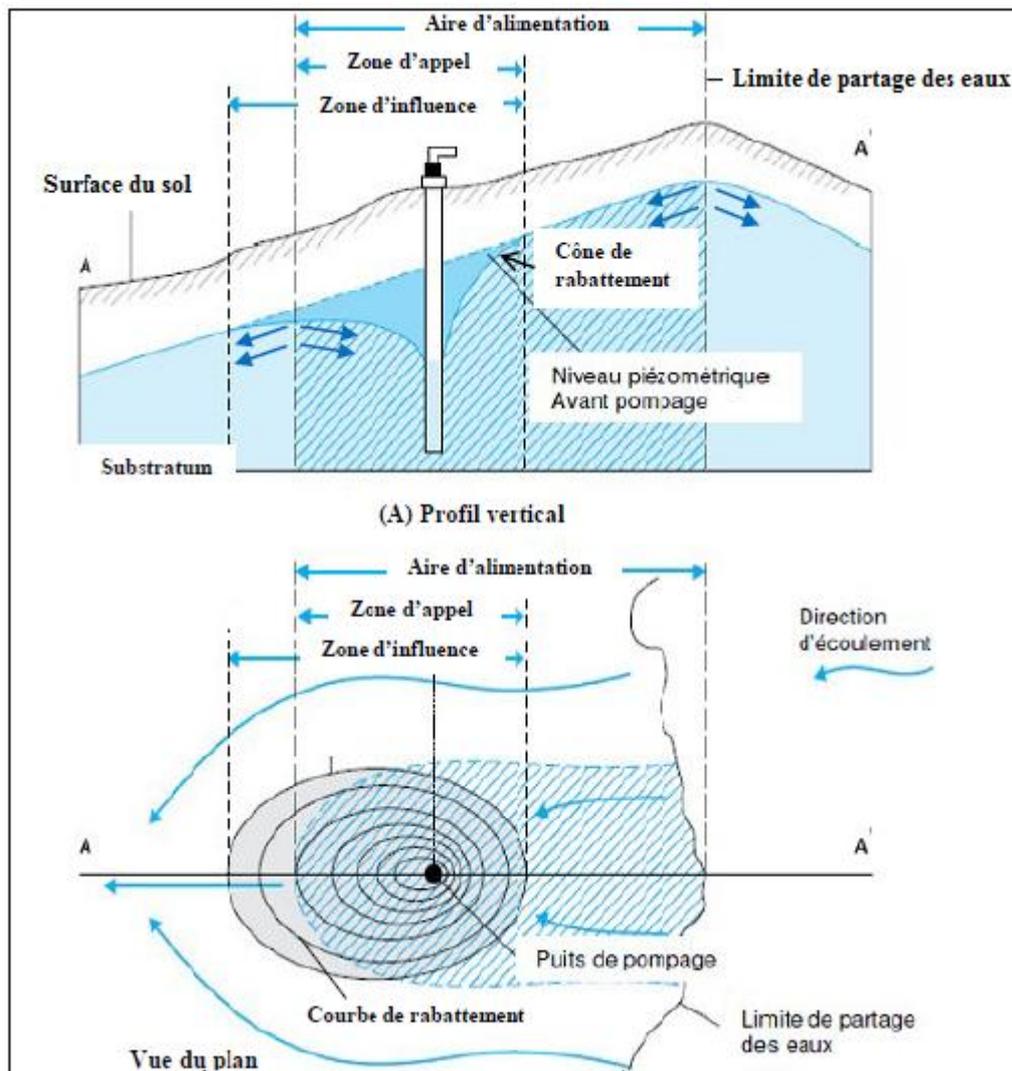


Figure 36 : Distinction entre aire d'alimentation, zone d'influence et zone d'appel
(Vernoux, 2007)

6. Méthodes de détermination des périmètres de protection (PDP)

Il existe plusieurs méthodes de détermination des PDP. Certaines méthodes s'appliquent aussi bien pour des puits et des sources, tandis que d'autres sont spécifiques à l'un ou l'autre de ces types de captage.

Ces méthodes varient de simples d'application à des méthodes très complexes et onéreuses. De façon générale, plus la méthode permet l'intégration des caractéristiques géologiques, hydrologique et hydrogéologiques du milieu, plus elle est précise.

Ces méthodes peuvent être classées selon leur procédure d'application ou le type d'équations résolues.

6.1. Méthodes géométriques (La Formule de cylindre ; Rayon Calculé)

La méthode est basée sur une analyse en deux dimensions de l'équilibre de l'eau en supposant un écoulement régional (flux directionnel dans l'aquifère) négligeable. Si un flux est supposé radiale au ouvrage de captage dans un aquifère saturé d'épaisseur (b) constante, le cylindre qui correspond une isochrone de temps de transfert (t) présente un rayon déterminé (R) de telle sorte que toute particules dans ce cylindre, ou cela et au sein, prendre un maximum de t jours avant être pompé dans l'ouvrage de captage.

Alors, L'équation du cylindre est un bilan de masse entre le volume d'eau extrait par l'ouvrage de captage pour un temps donnée t le volume d'eau contenu à l'intérieur d'un cylindre équivalent de l'aquifère entourant le captage.

$$r = \sqrt{Qt / \pi e \Omega}$$

Avec :

r : rayon du cylindre (m)

Qt = Volume d'eau (m³) prélevé pendant la durée t de pompage (t généralement de 50 jours)

e = épaisseur de la nappe (m)

Ω = porosité efficace

6.2. Méthodes analytiques

Ces méthodes sont moins générales que les précédentes, car elles supposent un milieu homogène. Il existe un grand nombre de méthodes analytiques (Chapuis, 1999, USEPA, 1987 et 1998, de Marsily, 1986, Spitz et Moreno, 1996), dont l'objet est de calculer en tout point le rabattement induit par le captage. La portion de nappe qui alimente le captage peut ainsi être délimitée sur la base de ce cône d'influence et du gradient hydraulique naturel. Il s'agit de formules intégrant exactement l'équation de continuité mais sous des hypothèses simplificatrices fortes. Typiquement, l'équation de Dupuit suppose un aquifère horizontal, homogène, isotrope, d'extension latérale infinie, d'épaisseur constante, non rechargé par des précipitations et muni d'un puits complet qui occasionne un rabattement faible par rapport à la puissance de l'aquifère. De telles hypothèses ne sont jamais vérifiées quoique parfois acceptables par approximation.

La méthode de Thiem (1906) est directement dérivée de la méthode de Dupuit dans le cas où on dispose de piézomètres d'observation - il en faut au minimum deux selon Chapuis (1999).

De Glee (1930 et 1951) et Hantush et Jacob (1955) donnent des solutions pour les aquifères à nappe semi-captive réalimentés par drainance. Todd (1980) traite le cas d'un puits à nappe libre réalimenté par infiltration efficace.

Ces méthodes partent toutes de l'hypothèse que le gradient naturel est nul. Elles sont ainsi rarement représentatives des conditions réelles d'écoulement souterrain.

6.2.1. Méthode de Bear et Jacob (1965)

La plupart des guides sur la délimitation des zones de protection (USEPA, 1987; BCMELP, 2000; Rasmussen et Rouleau, 2003) proposent d'utiliser cette méthode. Ces derniers ont montré que dans un aquifère idéal (milieu poreux homogène et isotrope), avec un écoulement naturel uniforme, la zone d'appel prend une forme parabolique en U. Les calculs bidimensionnels supposent une recharge nulle et un puits unique complet. Les formulations ont été initialement développées pour le cas d'une nappe captive horizontale, mais elles sont également applicables pour le cas d'une nappe libre (Grubb, 1993). Le point de stagnation en aval (x_L) et la demi-largeur maximale en amont (y_L) sont donnés par les équations suivantes :

En nappe captive

$$x_L = \left(\frac{Q}{2\pi K b i} \right)$$

$$y_L = \left(\frac{Q}{2K b i} \right)$$

En nappe libre

$$x_L = \left(\frac{QL}{\pi K (h_1^2 - h_2^2)} \right)$$

$$y_L = \left(\frac{QL}{K (h_1^2 - h_2^2)} \right)$$

Avec :

y : largeur de la zone d'alimentation (m) a la distance x (m) du captage

x : distance au captage

K = perméabilité en m/s

b = épaisseur de l'aquifère (m)

i = gradient hydraulique

h_1 et h_2 : charges hydrauliques amont et aval le long d'une ligne de courant avant la mise en pompage

L : distance horizontale entre ces points [m].

Q = débit du puits (m^3/s)

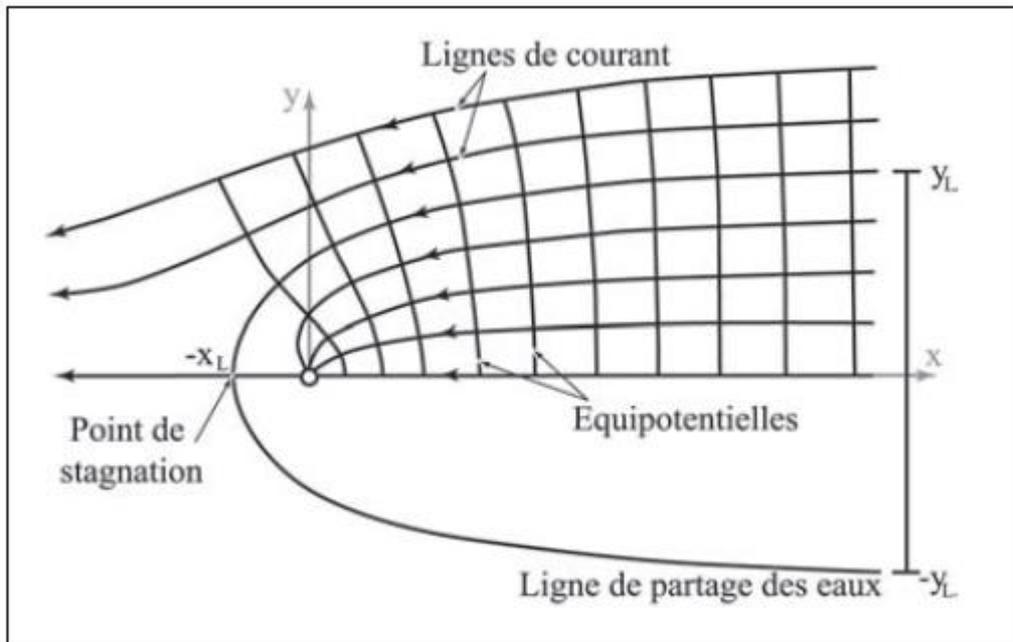


Figure 37 : Méthode de Bear et Jacob (1965)

6.2.2. La méthode de Wyssling (1979) à Lallemand-Barrès et Roux (1989)

C'est la dérivée de celle de Bear et Jacob. Elle permet de calculer le temps de transfert d'une goutte d'eau souterraine située sur un point quelconque de l'aquifère jusqu'au captage et ainsi délimiter les isochrones nécessaires pour la définition des périmètres de protection en tenant compte du contexte hydrogéologique.

Il a été conçu pour le dimensionnement des périmètres de protection dans les aquifères poreux est homogène mais présente un inconvénient de ne pas prendre en compte les hétérogénéités d'aquifère, il est donc moins précis pour les zones les plus reculées de l'absorption.

Pour résoudre la formule de Wyssling (1979) il faut d'abord connaître la valeur des paramètres hydrauliques suivants : gradient hydraulique i (sans dimension), débit d'exploitation Q (en m^3/s), conductivité hydraulique de l'aquifère K (en m/s), porosité efficace de l'aquifère ne (sans dimension) et épaisseur de l'aquifère saturé b (en m).

Dans un premiers temps, on détermine la zone d'appel par le calcul de B (la largeur du front d'appel) :

$$Q = B \times K \times b \times i \quad \text{D'où: } B = \frac{Q}{Kbi}$$

Le rayon d'appel:

$$X_0 = Q / 2\pi K b i$$

La largeur du front d'appel à la hauteur du captage :

$$\hat{B} = B/2 = Q / 2K b i$$

D'autre part, la vitesse effective U est égale à :

$$U = K i / \omega$$

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 50 jours, à savoir l'isochrone 50 jours. Cette distance est calculée par les formules suivantes :

$$S_0 \text{ ou } S_u = \frac{\pm l + \sqrt{l(l + 8x_0)}}{2}$$

S_0 : distance en amont du captage depuis le puits jusqu'à la distance correspondant au temps t souhaité en m.

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

$$l = U t$$

Cette formule donne une valeur approchée de S_0 et S_u .

Cette méthode est simple à utiliser. Elle demande un pompage d'essai et les données exposées précédemment.

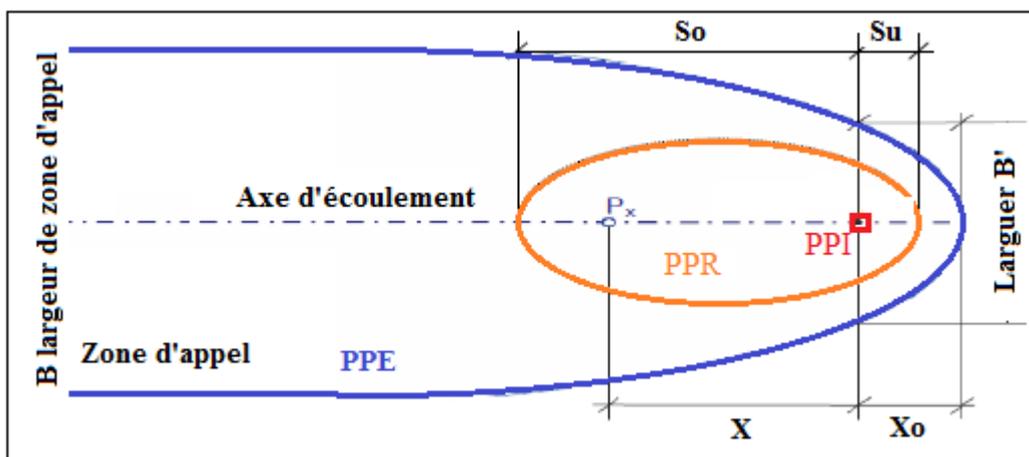


Figure 38 : Détermination des isochrones (méthode de Wyssling)

6.3. Modèles numériques

Les modèles numériques utilisent des techniques numériques pour approximer spatialement et temporellement les équations d'écoulement de l'eau souterraine et de transport des solutés. Une grande variété de modèles numériques est disponible commercialement ou sous licence publique.

Les modèles numériques sont particulièrement utiles pour déterminer les PDP lorsque les limites et le contexte hydrogéologiques sont très complexes. Ces modèles sont généralement très flexibles et permettent la représentation de tous les paramètres d'écoulement et de transport. Parmi les modèles numériques les plus répandus, nous comptons MODFLOW (McDonald et Harbaugh, 1988) qui est un modèle par différences finies et FEMWATER (Lin et al., 1997) qui est un modèle par éléments finis.

6.4. Méthode hydrodynamique graphique

Cette méthode est basée sur un tracé de la surface piézométrique et des lignes de partage des eaux souterraines. Elle n'est valable que dans les cas où la conductivité hydraulique est isotrope, ce qui est le cas des aquifères poreux mais rarement celui des aquifères fissurés et encore moins karstiques.

La méthode est par conséquent bien adaptée aux captages en domaine alluvial et sédimentaire non karstique. Mais il est souvent difficile de déterminer graphiquement leur zone d'appel, à moins de disposer de nombreux piézomètres à proximité du captage qui reste assez rare.

6.5. Méthodes combinées

Cette catégorie de méthodes regroupe toutes les méthodes qui utilisent de façon complémentaire les méthodes avec calculs simples et la cartographie hydrogéologique.

La méthode de 3A2E est une adaptation d'une méthode proposée par le Cape Cod Planning and Economic Development commission (USEPA, 1987). Le nom donné à cette méthode est un acronyme formé des 5 étapes qu'exige cette méthode (Aval, Amont, Aire, Ecoulement, Ellipses).

La méthode originale a été modifiée pour être utilisées sans carte piézométrique et pour permettre la définition des PDP éloignés en plus des PDP rapprochés. Ainsi, la carte piézométrique et le planimètre originellement utilisés pour le calcul de la superficie du PDP, sont remplacés par une ellipse dont la superficie se calcule soit par l'équation d'infiltration ou par celle du cylindre, selon le type de PDP.

La détermination des PDP par la méthode 3A2E exige cinq étapes :

Étape 1 : implique la détermination de la limite aval. Les équations d'écoulement uniforme, de temps de transport avec la loi de Darcy ou la cartographie hydrogéologique peuvent être utilisées.

Étape 2 : Implique la détermination de la distance amont. Les équations de temps de transport de Bear et Jacob (1965), de temps de transport avec la loi de Darcy ou la cartographie hydrogéologique peuvent être utilisées.

Étape 3 : Implique le calcul de l'aire du PDP. Les équations d'infiltration et du cylindre sont respectivement utilisées pour la détermination des périmètres éloignés et rapprochés.

Étape 4 : Implique la détermination de la direction de l'écoulement régional à l'aide d'une carte piézométrique ou d'au moins trois mesures de niveaux d'eau dans trois puits d'observations disposés en triangle.

Étape 5 : Implique le dessin d'une ellipse de superficie totale correspondant à celle calculée à l'étape 3 et dont les extrémités d'un des axes de l'ellipse ont orientées dans le sens de l'écoulement régional déterminé à l'étape 4 et correspondent aux limites aval (étape 1) et amont (étape 2).

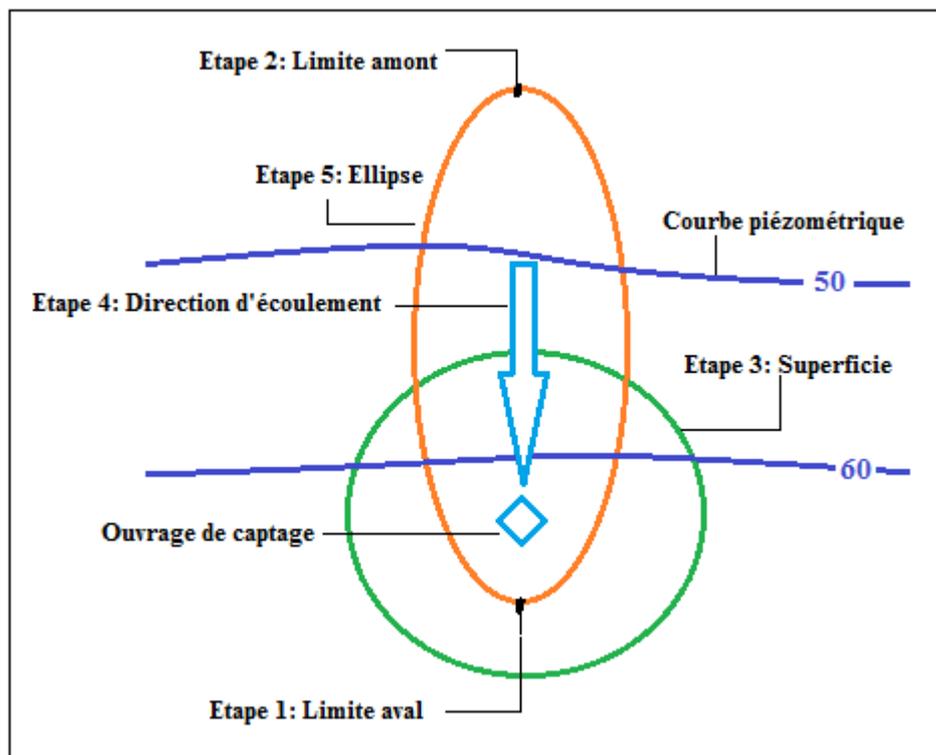


Figure 39 : Détermination d'un périmètre de protection par la méthode 3A2E

7. Conclusion

Le but final de détermination des périmètres de protection est de délivrer aux différents consommateurs (AEP, agriculture et industries) une eau répondant aux normes que la législation impose. La diversité des méthodes de délimitation des PDP nous donne l'opportunité pour choisir la méthode à appliquer vis-à-vis des données et le matériel disponible. Les avantages et inconvénients des différentes méthodes présentées sont résumés dans Tab. 33. On insiste sur le fait, qu'il est préférable de combiner plusieurs méthodes plutôt que de se limiter à une seule et qu'elles ne doivent en aucun cas se substituer à l'étude géologique et hydrogéologique du site.

Tableau 33 : Avantages et inconvénients des différentes méthodes pour détermination des PDP

Méthodes	Hypothèses	Données requises	Avantages	Désavantages
Géométrique	- Milieux isotrope et homogène.	- Débit de pompage; - Épaisseur saturée de l'aquifère ; - Porosité.	- Facile d'utilisation; - Peut coûteuse. - Considère certaines caractéristiques physiques du milieu.	- Basée sur des hypothèses simples et peu communes
Analytiques	- Milieux isotrope et homogène ; - Ecoulement horizontale uniforme en régime permanent ; - Lignes de partage des eaux correspondent à la limite de l'aire d'alimentation.	- Débit de pompage ; - transmissivité ; - Gradient hydraulique ; - Porosité ; - Lignes des partages des eaux.	- Facile d'utilisation; - Peut coûteuse ; - Considère certaines caractéristiques physiques du milieu.	Basée sur des hypothèses simples et peu communes
Hydrodynamique graphique	- Le sens d'écoulement de l'eau suit la topographie du terrain.	- Limite de l'aquifère ; - Courbes piézométriques ; - Courbes topographique ; - Géologie locale.	- Considère plusieurs caractéristiques physiques du milieu.	- Modérément coûteuse ; - Nécessite beaucoup de données.
Modèles numériques	- Variable selon le modèle utilisé.	- Limite de l'aquifère ; - Niveau piézométriques ; - Transmissivité et conductivité ; - Géologie locale ; - Condition aux limites.	- Considère plusieurs caractéristiques physiques du milieu ; - Permet de varier rapidement les paramètres d'outils prévisionnels.	- Coûteuse ; - Nécessite beaucoup de données.

CHAPITRE VII

LES PERIMETRES DE PROTECTION

DES CAPTAGES DE LA NAPPE

ALLUVIALE DE BOUMAIZA

1. Introduction

La plaine alluviale de Boumaiza appartient administrativement au territoire de la wilaya de Skikda, à l'extrême Nord -Est Algérien. Elle s'étend sur une superficie de 88,8 Km² et renferme une nappe profonde d'une grande importance, alimentée essentiellement par les précipitations atmosphériques.

Compte tenu de l'augmentation de l'activité industrielle et de l'extension agricole dans la région d'étude, la délimitation des périmètres de protection (PDP) devient une nécessité majeure afin de protéger la qualité de l'eau contre les risques de pollution chronique, diffuse ou accidentelle.

D'une manière générale, le concept actuel des périmètres de protection des eaux souterraines est basé sur le temps de transfert et la distance depuis l'ouvrage de captage.

La protection la plus répandue à travers le monde, ainsi que l'Algérie, renferme trois périmètres qui sont :

- Le Périmètre de Protection Immédiate (*PPI*), défini par le législateur Algérien comme étant de 30 m autour du captage.

- Le Périmètre de Protection Rapprochée (*PPR*), défini par le temps de transfert d'environ 50 jours pour que le polluant arrive jusqu'à l'ouvrage de captage (isochrone 50 jours).

- Le Périmètre de Protection Eloignée (*PPE*), délimité par la totalité du bassin d'alimentation, ou bien le temps de transfert de 100 jours.

La détermination de PDP comporte toujours une part d'incertitude étant donné que la précision de l'information requise n'est jamais absolue et que le niveau des connaissances hydrogéologiques sur un système aquifère évolue avec le temps à mesure que des données supplémentaires deviennent disponibles.

Par ailleurs, le degré de précision varie d'une méthode à l'autre ; plus la méthode permet l'intégration des caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu, plus elle est précise. Pour cela, la combinaison de plusieurs méthodes est privilégiée.

Compte tenu des données disponibles, nous avons procédé à la détermination des PDP par les méthodes d'infiltration, du Cylindre, de Wyssling et la méthode de la cartographie hydrogéologique.

2. Détermination théorique des périmètres de protection

2.1. Périmètres de protection immédiate (PPI)

Le décret exécutif n° 07-399 du 14 Dhou El Hidja 1428 correspondant au 23 décembre 2007 relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eau (Journal officielle de la république Algérienne N°80, Chapitre 1-2, Article 01-23) impose la mise en œuvre d'un périmètre de protection immédiate de l'ordre de 30 m autour de tout les ouvrages de captage (Fig. 42).

A l'intérieur de ce périmètre, dont les limites sont établies afin d'interdire toute introduction directe de substances polluantes dans l'eau prélevée et d'empêcher la dégradation des ouvrages, les terrains sont clôturés et sont régulièrement entretenus.

Tous les travaux, installations, activités, dépôts, ouvrages, aménagement ou occupation des sols y sont interdits, en dehors de ceux qui sont explicitement autorisés pour les besoins du captage et de ses installations.

Malheureusement, l'investigation sur site a montré qu'un seul ouvrage (Forage Azzaba 1) dispose d'une clôture dans les normes (Fig. 43) ; les autres forages d'AEP Annaba et Boumaiza, ont des clôtures de 5 mètres mais pour protéger les équipements de forage ce n'est pas le captage (Fig. 44).

Les forages implantés dans les fermes sont dans des situations catastrophiques, ce n'est pas parce qu'il n'y a pas un PPI seulement, mais aussi les rejets des bétails et des vaches aux alentours des forages.

Les forages industriels, sont implantés au sein même des usines sans aucun PPI.

Les autres forages privés (agricole), implantés aux centres des parcelles agricoles sont complètement dépourvus d'un PPI (Fig. 45).

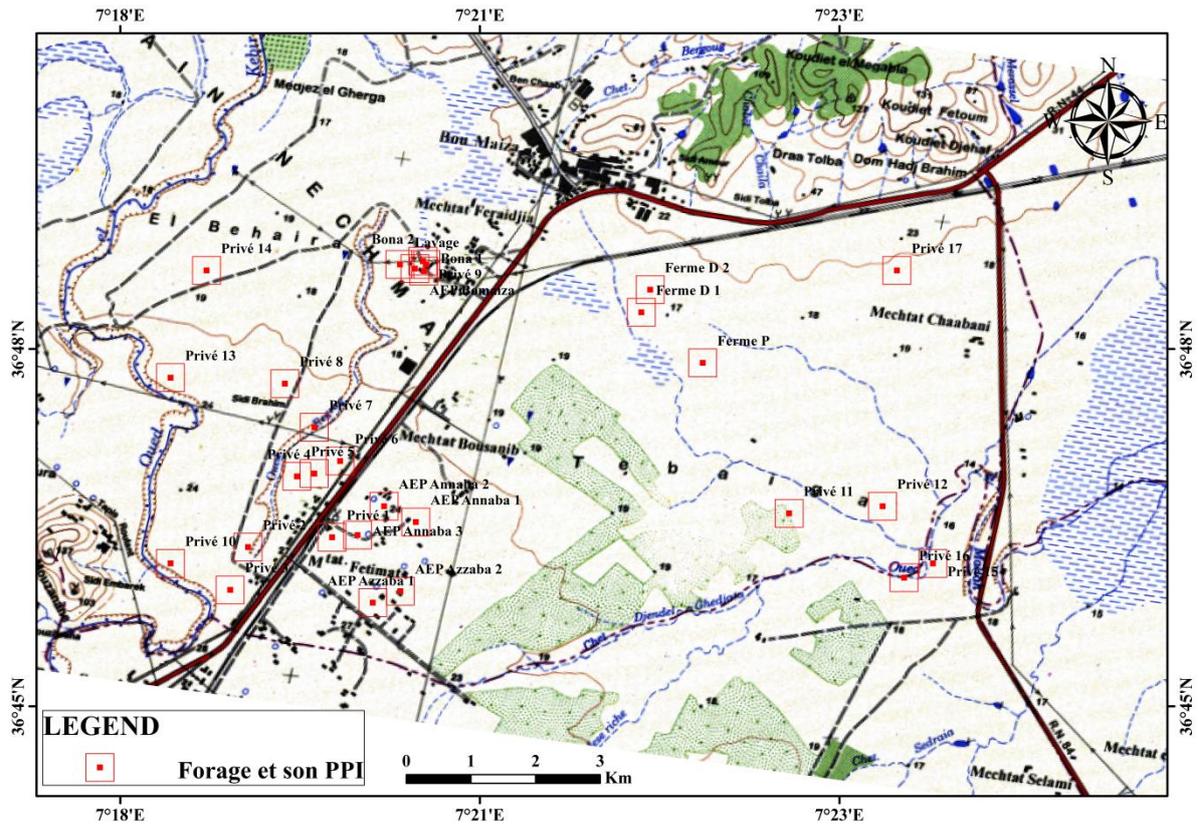


Figure 40 : Le PPI pour les forages implantés dans la nappe alluviale de Boumaiza



Figure 41: PPI du forage Azzaba 1



Figure 42: Forages d'AEP implantés dans des parcelles d'agricultures sans PPI



Figure 43: Forages privés implantés au centre des parcelles agricoles sans PPI

2.2. Périmètres de protection rapprochée (PPR)

2.2.1. Méthode du cylindre

La méthode consiste à établir un bilan de masse entre le volume d'eau extrait du captage pendant la durée de pompage (t) et le volume d'eau dans un cylindre traversant la nappe captée. Le rayon du cylindre est assimilé à celui du PPR.

Un exemple de calcul est appliqué pour la détermination du PPR du forage de la ferme Dahoui 1 pour un débit de pompage de 1296 m³/j, une porosité efficace de 0.07, et une épaisseur saturée de 48 m et pour un temps de 50 jours.

$$r = \sqrt{Qt / \pi e \Omega}$$

$$r = \sqrt{\frac{1296 * 50}{3.1416 * 48 * 0.07}} = 78.35 \text{ m}$$

La limitation de cette méthode est qu'elle ne prend pas en compte le débit d'eau souterraine régional, provoquant un gradient hydraulique. Le cône de dépression due au pompage sera alors un cercle autour de l'ouvrage de captage.

Le tableau 2 ci-dessous présente les résultats d'application de cette méthode pour tous les ouvrages de captage dans la région d'étude.

Tableau 34 : Détermination des PPR par la méthode du cylindre

F o r a g e s	E (m)	Débit (m ³ /j)	ω	r (50j o u r s)	A (5 0 j r s)
F e r m e D a h o u i 1	4 8	1 2 9 6	0,07	78,350617	19285,714
F e r m e D a h o u i 2	3 8	1 2 9 6	0,07	88,058491	24360,902
F e r m e P r i v é	4 5	6 9 1 , 2	0,07	59,095736	10971,429
B o n a 1	3 5	1 7 2 8	0,07	105,94937	35265,306
B o n a 2	4 0	1 7 2 8	0,07	99,106562	30857,143
L a v a g e	3 0	5 1 8 4	0,07	198,21312	123428,57
A E P A z z a b a 1	4 0	2 0 7 3 , 6	0,07	108,5658	37028,571
A E P A z z a b a 2	4 5	1 9 0 0 , 8	0,07	97,999192	30171,429
A E P A n n a b a 1	4 8	1 9 0 0 , 8	0,07	94,887309	28285,714
A E P A n n a b a 2	3 9	3 4 5 6	0,07	141,94337	63296,703
A E P A n n a b a 3	3 5	2 9 3 7 , 6	0,07	138,14108	59951,02
A E P B o u m a i z a	3 9	2 1 6 0	0,07	112,21608	39560,44
P r i v é 1	2 0	7 7 7 , 6	0,07	94,02074	27771,429
P r i v é 2	2 5	7 7 7 , 6	0,07	84,094707	22217,143
P r i v é 3	3 0	7 7 7 , 6	0,07	76,767613	18514,286
P r i v é 4	2 4	8 6 4	0,07	90,471499	25714,286
P r i v é 5	2 3	1 2 9 6	0,07	113,18767	40248,447
P r i v é 6	2 0	1 2 9 6	0,07	121,38025	46285,714
P r i v é 7	2 9	6 0 4 , 8	0,07	68,860065	14896,552
P r i v é 8	2 5	3 0 2 4	0,07	165,837	86400
P r i v é 9	3 0	6 9 1 , 2	0,07	72,3772	16457,143
P r i v é 1 0	3 1	1 0 3 6 , 8	0,07	87,202149	23889,401
P r i v é 1 1	2 6	1 0 3 6 , 8	0,07	95,218505	28483,516
P r i v é 1 2	2 1	5 1 8 , 4	0,07	74,917519	17632,653
P r i v é 1 3	2 0	6 9 1 , 2	0,07	88,643604	24685,714
P r i v é 1 4	2 8	6 9 1 , 2	0,07	74,917519	17632,653
P r i v é 1 5	2 7	7 7 7 , 6	0,07	80,920169	20571,429
P r i v é 1 6	2 2	7 7 7 , 6	0,07	89,645258	25246,753
P r i v é 1 7	2 0	8 6 4	0,07	99,106562	30857,143

2.2.2. Méthode de Wyssling

Selon les hypothèses énoncées précédemment, il est possible de déterminer de façon analytique l'enveloppe de l'aire d'alimentation ainsi que les courbes d'égal temps de transfert (isochrones) vers l'ouvrage de captage. Les isochrones 50 jours représentent les périmètres de protection rapprochée.

Un exemple de calcul est appliqué pour la détermination du PPR du forage de la ferme Dahoui 1, avec un débit $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$, une porosité effective $ne = 0,07$, un gradient hydraulique $i = 0,003$ et l'épaisseur saturée $E = 48 \text{ m}$, une perméabilité $k = 2,08\text{E}-05$ et un temps de transfert $T = 50$ jours.

- La largeur du front d'appel en amont de l'ouvrage de captage (B) :

$$B = \frac{Q}{KEI} ; B = \frac{0,0015}{2,08\text{E}-05 * 48 * 0,003} = 501.28 \text{ m}$$

- La largeur du front d'appel en aval d'ouvrage captant (B') :

$$B' = \frac{B}{2} = \frac{501.28}{2} = 250.64 \text{ m}$$

- Le rayon d'appel (X_0) :

$$X_0 = \frac{Q}{2\pi KEI} = \frac{0,0015}{2 * 3.14 * 2,08\text{E} - 05 * 48 * 0,003} = 79.82 \text{ m.}$$

- La vitesse effective :

$$U = \frac{KI}{\omega} = \frac{2,08\text{E} - 05 * 0,003}{0.07} = 8,91\text{E} - 06 \text{ m/s.}$$

- La distance en amont sur l'axe d'écoulement (S_0)

$$S_0 = L + \sqrt{\frac{L(L + 8x_0)}{2}} = 38,47 + \sqrt{\frac{38,47(38,47 + 8 * 79.82)}{2}} = 99.93 \text{ m.}$$

- La distance en aval sur l'axe d'écoulement (S_u) :

$$S_u = -L + \sqrt{\frac{L(L + 8x_0)}{2}} = -38,47 + \sqrt{\frac{38,47(38,47 + 8 * 79.82)}{2}} = 80.70 \text{ m.}$$

- La distance du centre du puits à la limite de la zone d'appel L_1 :

$$L_1 = X_0 + 2 * S_0 = 79.82 + (2 * 99.93) = 279.69 \text{ m}$$

Les résultats de l'application de cette méthode sur l'ensemble des ouvrages de captage de la plaine alluviale de Boumaiza, sont représentés dans les tableaux 35 et 36.

Tableau 35 : Détermination des PPR par la méthode de Wyssling

F o r a g e s	E (m)	K (m/s)	Gradient I (%)	Q (m ³ /s)	ω	B = Q / KEI	B' = B / 2	$x_0 = Q / 2 \pi KEI$
Ferme Dahoui1	4 8	2,08E-05	3 , 0 0 E - 0 2	0 , 0 1 5	0,07	5 0 1 , 2 8	2 5 0 , 6 4	7 9 , 8 2
Ferme Dahoui 2	3 8	2,05E-05	3 , 0 0 E - 0 2	0 , 0 1 5	0,07	6 4 2 , 1 6	3 2 1 , 0 8	1 0 2 , 2 6
Ferme Privé	4 5	2,03E-05	4 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 0 8	0,07	1 9 4 , 6 1	9 7 , 3 1	3 0 , 9 9
B o n a 1	3 5	1,98E-05	4 , 0 0 E - 0 2	0 , 0 2	0,07	7 2 0 , 4 1	3 6 0 , 2 0	1 1 4 , 7 1
B o n a 2	4 0	1,97E-05	4 , 0 0 E - 0 2	0 , 0 2	0,07	6 3 3 , 2 3	3 1 6 , 6 2	1 0 0 , 8 3
L a v a g e	3 0	1,99E-05	4 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 6	0,07	2 2 3 6 , 7 6	1 1 1 8 , 3 8	3 5 6 , 1 7
AEP Azzaba 1	4 0	1,74E-05	1 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 2 4	0,07	2 2 9 8 , 8 5	1 1 4 9 , 4 3	3 6 6 , 0 6
AEP Azzaba 2	4 5	1,70E-05	1 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 2 2	0,07	1 9 2 2 , 8 7	9 6 1 , 4 3	3 0 6 , 1 9
AEP Annaba 1	4 8	1,77E-05	1 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 2 2	0,07	1 7 2 2 , 4 1	8 6 1 , 2 1	2 7 4 , 2 7
AEP Annaba 2	3 9	1,77E-05	1 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 4	0,07	3 8 6 3 , 0 5	1 9 3 1 , 5 3	6 1 5 , 1 4
AEP Annaba 3	3 5	1,74E-05	1 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 3 4	0,07	3 7 3 2 , 6 7	1 8 6 6 , 3 4	5 9 4 , 3 7
AEP Boumaiza	3 9	2,01E-05	4 , 0 0 E - 0 2	0 , 0 2 5	0,07	7 9 5 , 7 1	3 9 7 , 8 6	1 2 6 , 7 1
P r i v é 1	2 0	1,75E-05	1 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 0 9	0,07	1 7 1 6 , 2 5	8 5 8 , 1 2	2 7 3 , 2 9
P r i v é 2	2 5	1,71E-05	2 , 0 0 E - 0 2	0 , 0 0 9	0,07	1 0 5 3 , 8 6	5 2 6 , 9 3	1 6 7 , 8 1
P r i v é 3	3 0	1,68E-05	2 , 0 0 E - 0 2	0 , 0 0 9	0,07	8 9 0 , 7 4	4 4 5 , 3 7	1 4 1 , 8 4
P r i v é 4	2 4	1,76E-05	2 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 1	0,07	9 4 6 , 9 7	4 7 3 , 4 8	1 5 0 , 7 9
P r i v é 5	2 3	1,77E-05	2 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 1 5	0,07	1 4 7 1 , 3 5	7 3 5 , 6 7	2 3 4 , 2 9
P r i v é 6	2 0	1,79E-05	2 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 1 5	0,07	1 6 7 3 , 1 7	8 3 6 , 5 9	2 6 6 , 4 3
P r i v é 7	2 9	1,80E-05	2 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 0 7	0,07	5 3 5 , 2 1	2 6 7 , 6 0	8 5 , 2 2
P r i v é 8	2 5	1,83E-05	3 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 3 5	0,07	2 1 9 0 , 5 8	1 0 9 5 , 2 9	3 4 8 , 8 2
P r i v é 9	3 0	1,69E-05	4 , 0 0 E - 0 2	0 , 0 0 8	0,07	3 9 4 , 4 8	1 9 7 , 2 4	6 2 , 8 1
P r i v é 10	3 1	1,66E-05	1 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 1 2	0,07	1 5 5 4 , 6 1	7 7 7 , 3 0	2 4 7 , 5 5
P r i v é 11	2 6	1,94E-05	1 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 1 2	0,07	1 5 8 6 , 0 4	7 9 3 , 0 2	2 5 2 , 5 5
P r i v é 12	2 1	1,97E-05	1 , 0 0 E - 0 2	0 , 0 0 6	0,07	1 4 5 1 , 8 0	7 2 5 , 9 0	2 3 1 , 1 8
P r i v é 13	2 0	1,80E-05	1 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 0 8	0,07	1 4 8 5 , 6 1	7 4 2 , 8 0	2 3 6 , 5 6
P r i v é 14	2 8	2,03E-05	1 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 0 8	0,07	9 3 8 , 7 7	4 6 9 , 3 8	1 4 9 , 4 9
P r i v é 15	2 7	1,93E-05	1 , 0 0 E - 0 2	0 , 0 0 9	0,07	1 7 2 6 , 2 2	8 6 3 , 1 1	2 7 4 , 8 8
P r i v é 16	2 2	1,92E-05	1 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 0 9	0,07	1 4 2 0 , 4 5	7 1 0 , 2 3	2 2 6 , 1 9
P r i v é 17	2 0	2,23E-05	1 , 5 0 E - 0 2	0 , 0 1	0,07	1 4 9 2 , 0 9	7 4 6 , 0 5	2 3 7 , 5 9

Tableau 36 : Détermination des PPR par la méthode de Wyssling

F o r a g e s	5 0 J o u r s		1 0 0 J o u r s	
	S u	S o	S u	S o
Ferme Dahoui 1	80,70	99,93	78,85	155,79
Ferme Dahoui 2	90,10	109,07	92,28	168,15
Ferme Privé	65,49	93,68	44,45	157,20
B o n a 1	108,77	133,24	108,71	206,62
B o n a 2	102,08	126,45	99,69	197,15
L a v a g e	200,17	227,77	230,58	340,95
A E P A z z a b a 1	108,89	116,95	138,31	170,52
A E P A z z a b a 2	98,34	106,18	123,82	155,20
A E P A n n a b a 1	95,27	103,48	118,80	151,65
A E P A n n a b a 3	138,41	146,44	180,01	212,13
A E P B o u m a i z a	114,96	139,82	116,62	216,06
P r i v é 1	94,39	102,48	117,80	150,16
P r i v é 2	84,77	95,31	99,73	141,89
P r i v é 3	77,49	87,88	89,78	131,35
P r i v é 4	91,51	105,08	103,67	157,98
P r i v é 5	114,04	127,72	135,08	189,79
P r i v é 6	122,20	136,03	146,25	201,58
P r i v é 7	70,27	84,19	73,47	129,14
P r i v é 8	167,05	186,77	198,44	277,32
P r i v é 9	75,34	96,20	68,84	152,28
P r i v é 1 0	87,56	95,25	108,94	139,67
P r i v é 1 1	95,67	104,64	117,93	153,84
P r i v é 1 2	75,18	81,25	94,52	118,82
P r i v é 1 3	89,05	97,36	109,87	143,11
P r i v é 1 4	75,52	84,91	88,85	126,41
P r i v é 1 5	81,16	87,12	103,17	127,00
P r i v é 1 6	90,11	98,99	110,28	145,82
P r i v é 1 7	99,67	110,01	121,03	162,39

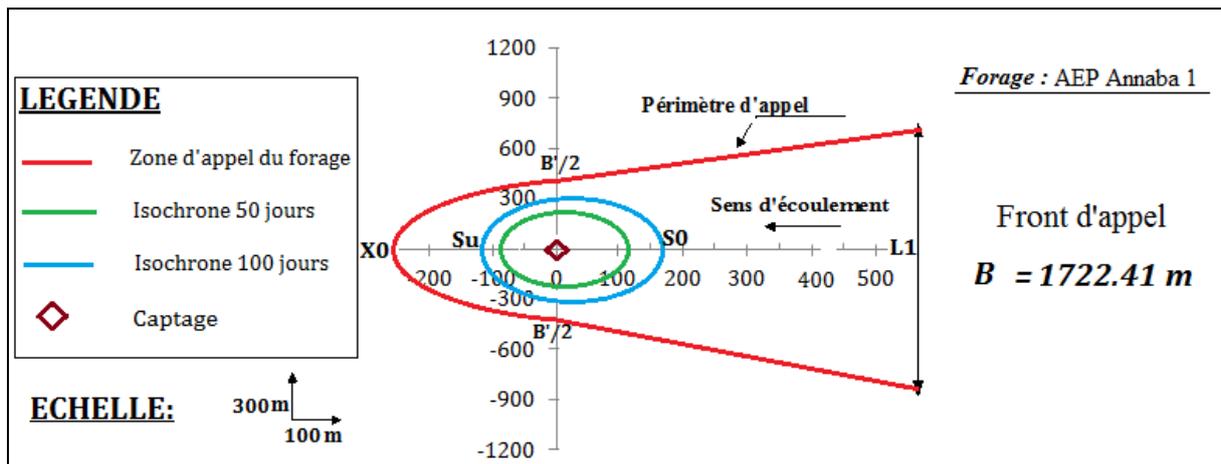


Figure 44 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage AEP Annaba 1

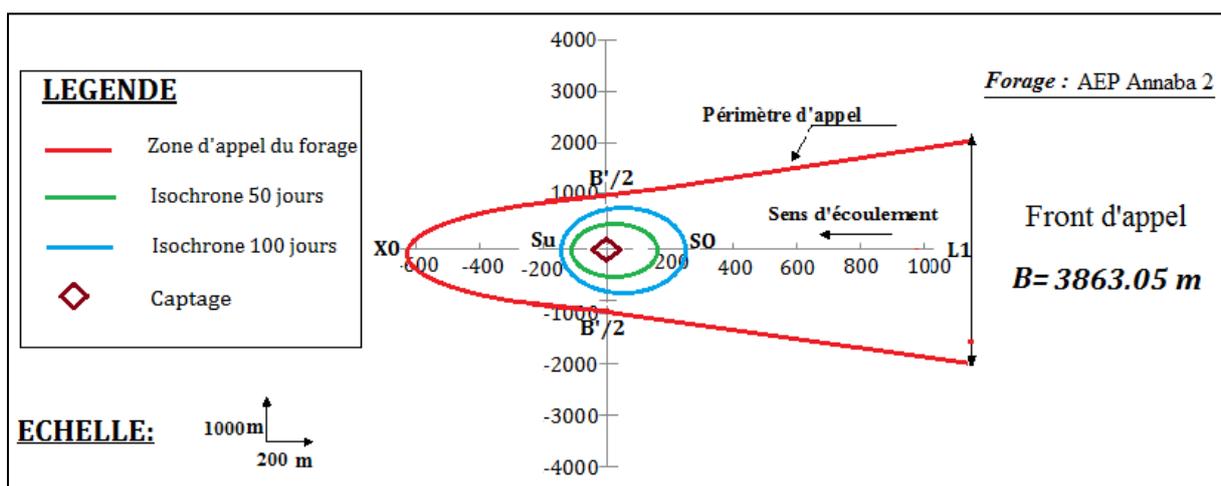


Figure 45 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage AEP Annaba 2

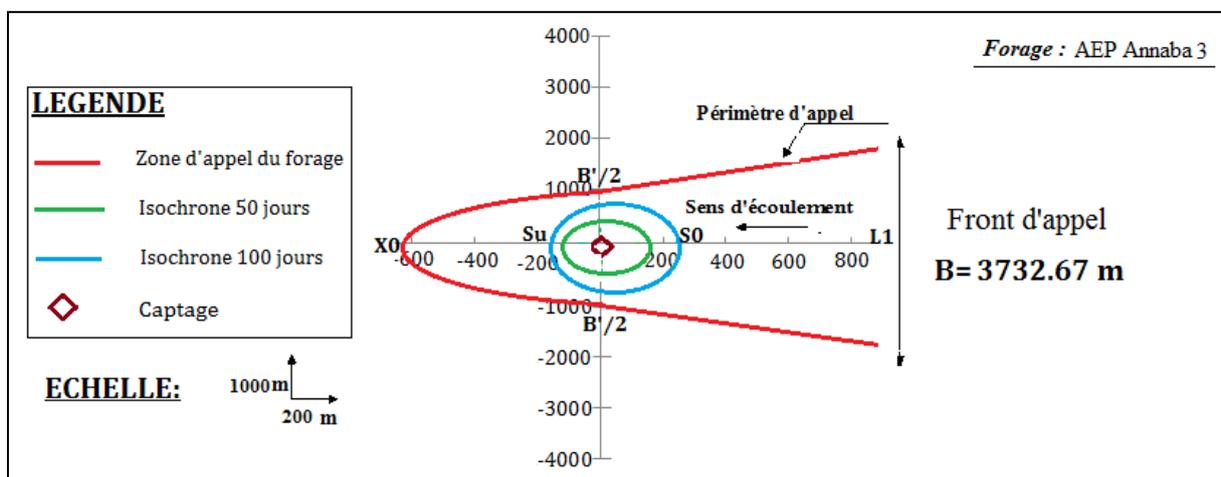


Figure 46 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage AEP Annaba 3

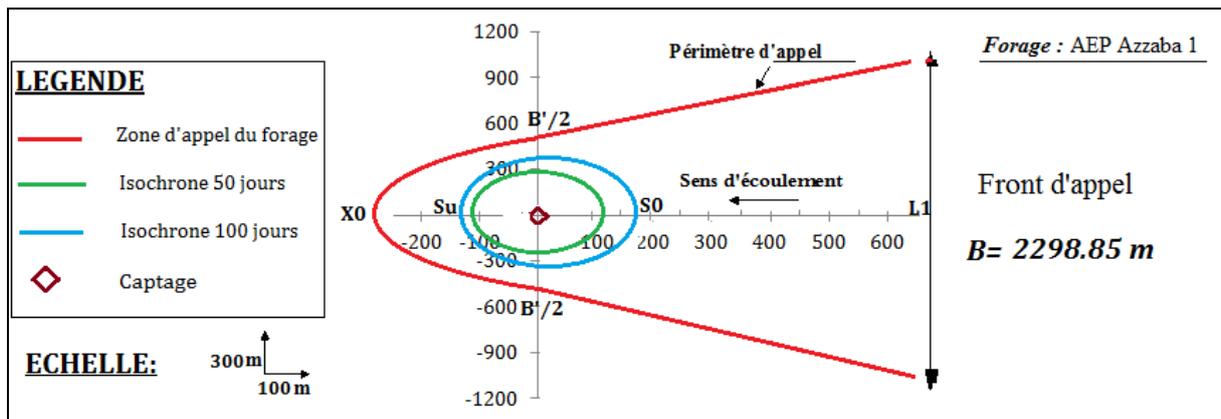


Figure 47 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage AEP Azzaba 1

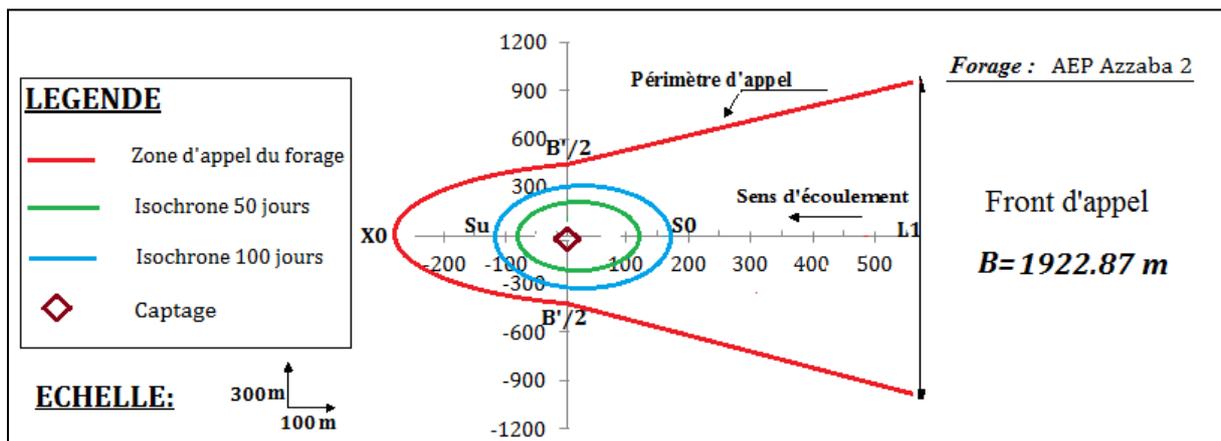


Figure 48 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage AEP Azzaba 2

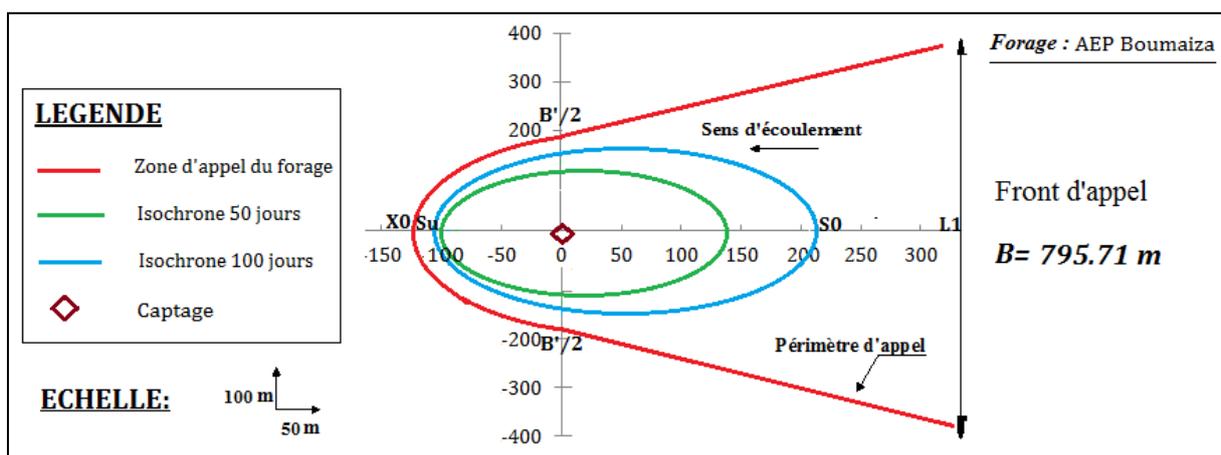


Figure 49 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage AEP Boumaiza

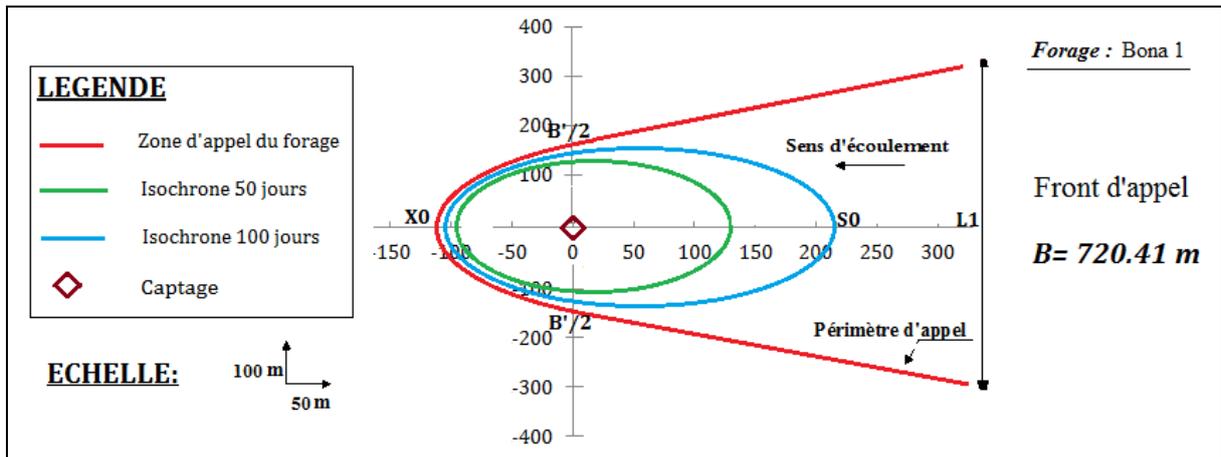


Figure 50 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage Bona 1

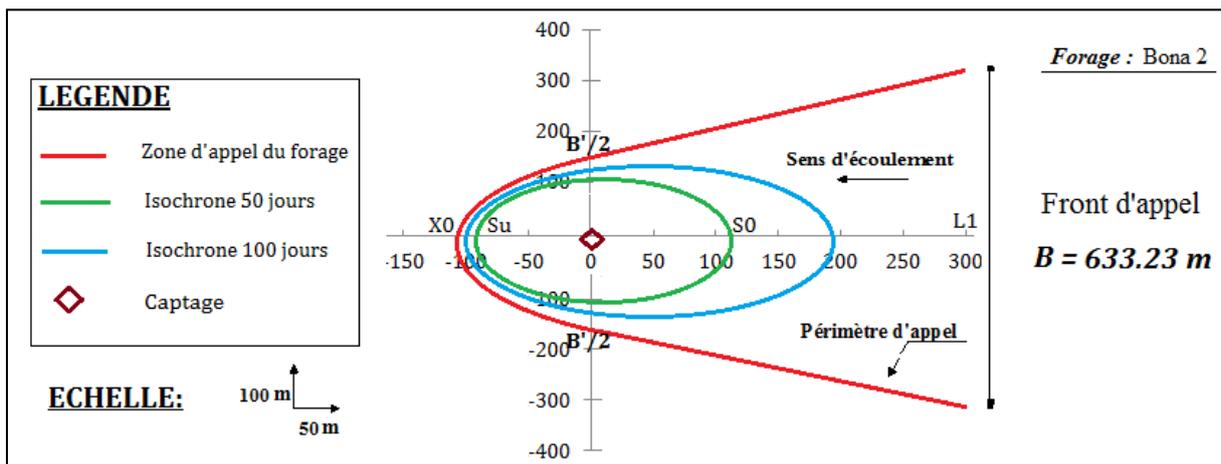


Figure 51 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage Bona 2

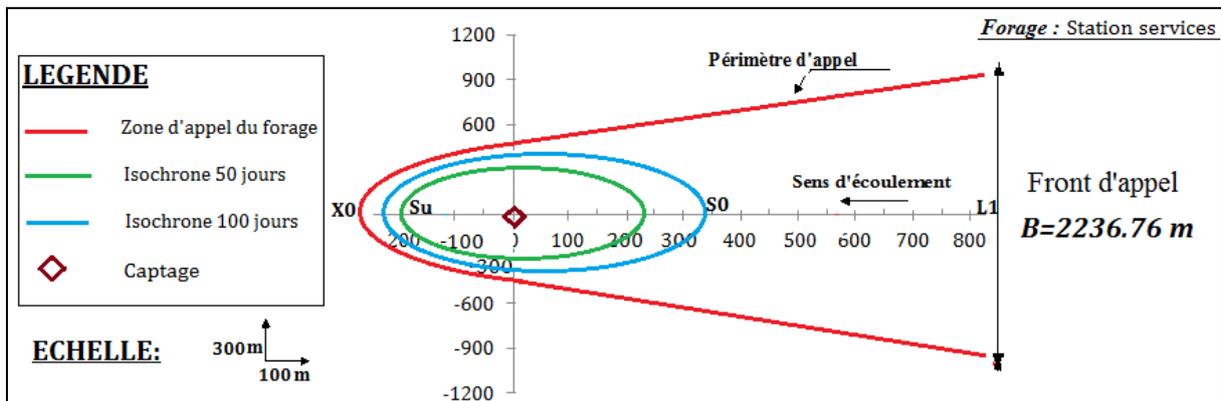


Figure 52 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage station services

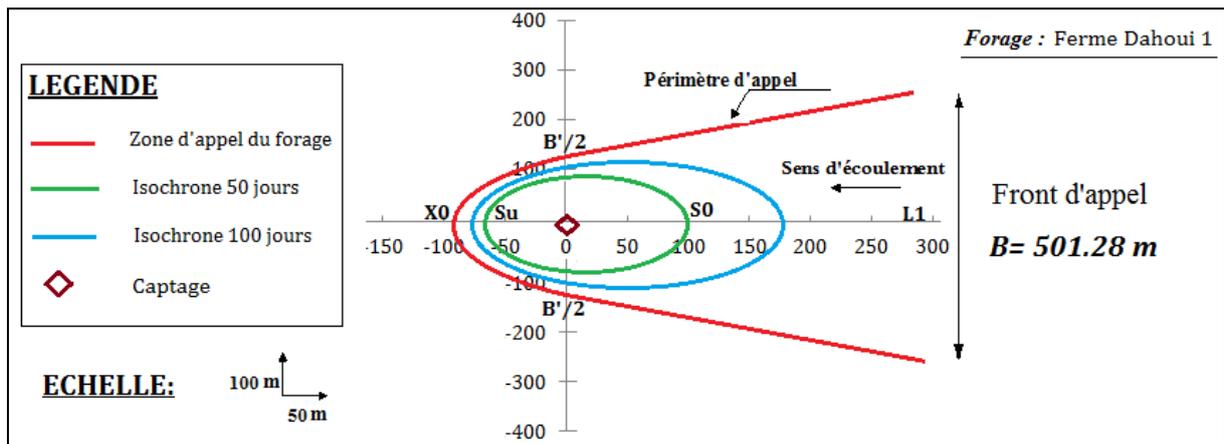


Figure 53 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage Ferme Dahoui 1

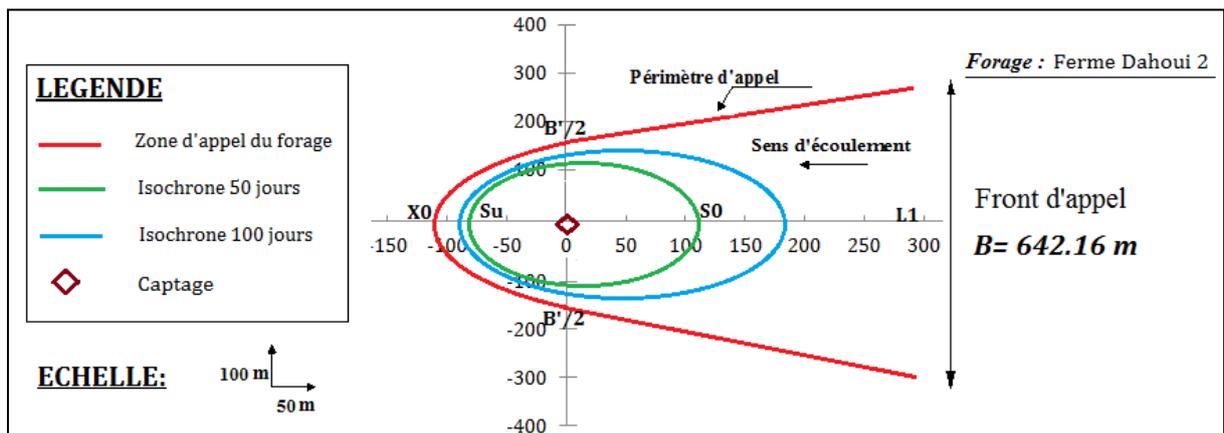


Figure 54 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage Ferme Dahoui 2

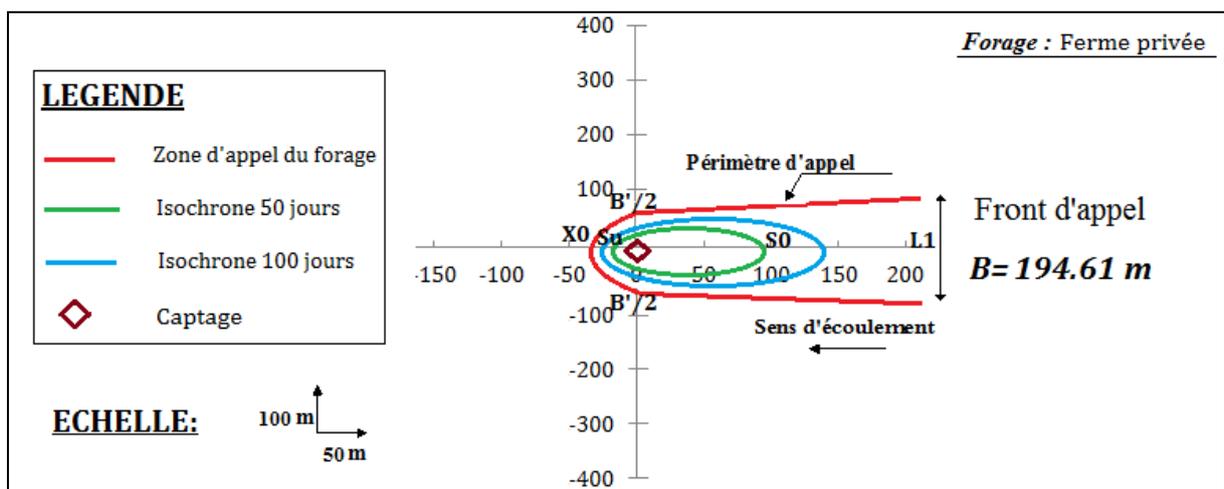


Figure 55 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage Ferme privée

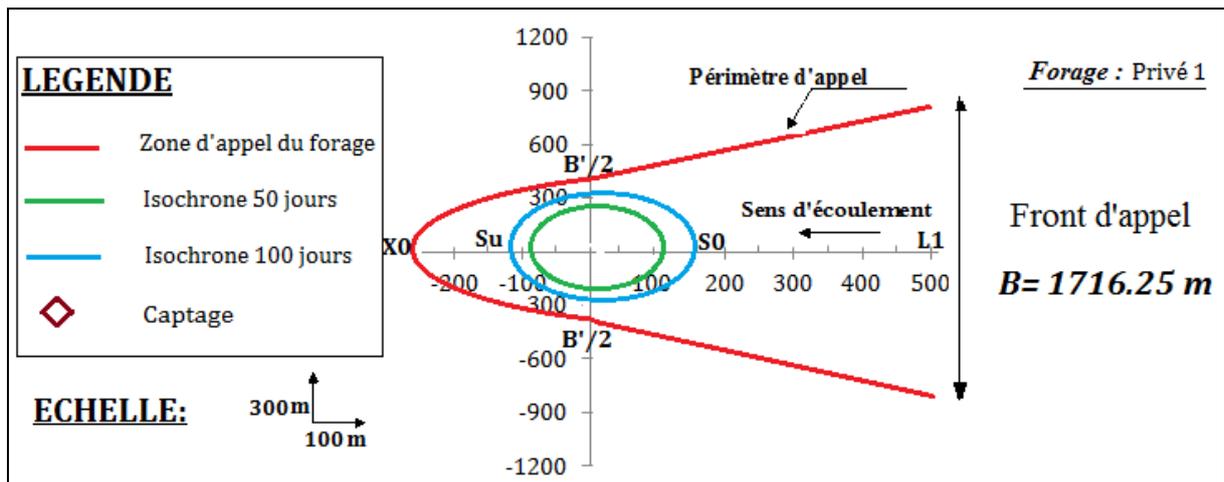


Figure 56 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 1

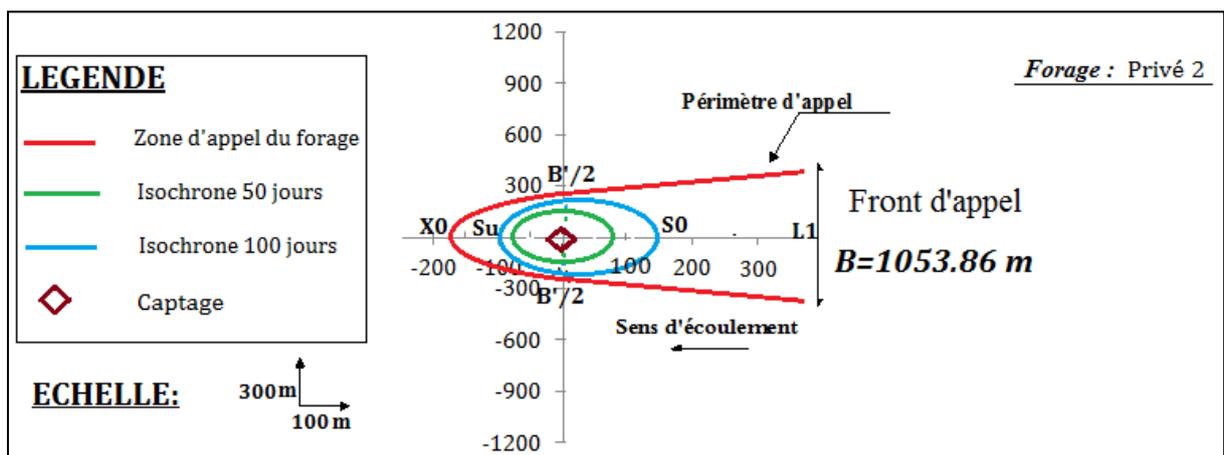


Figure 57: Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 2

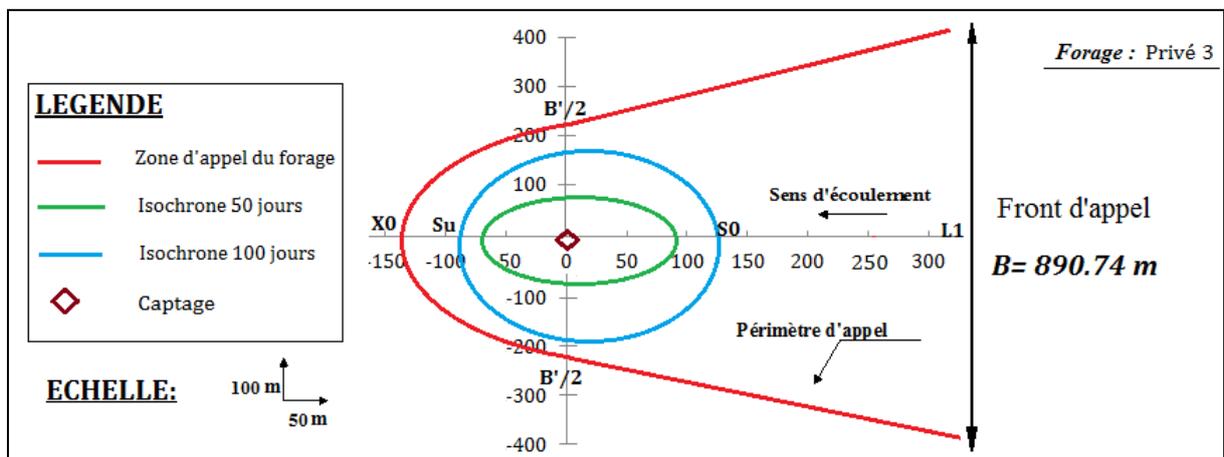


Figure 58 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 3

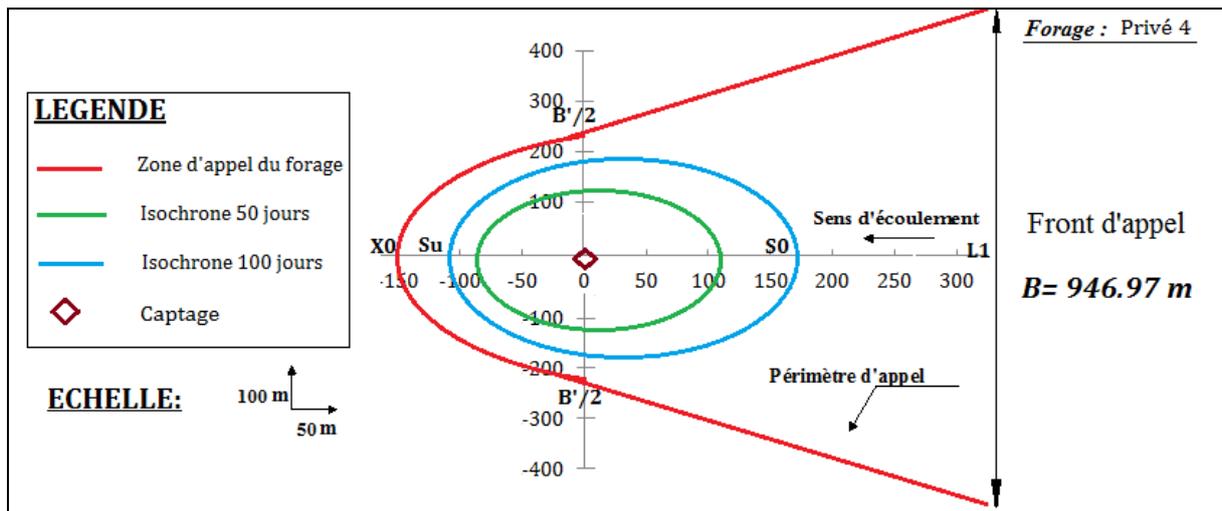


Figure 59 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 4

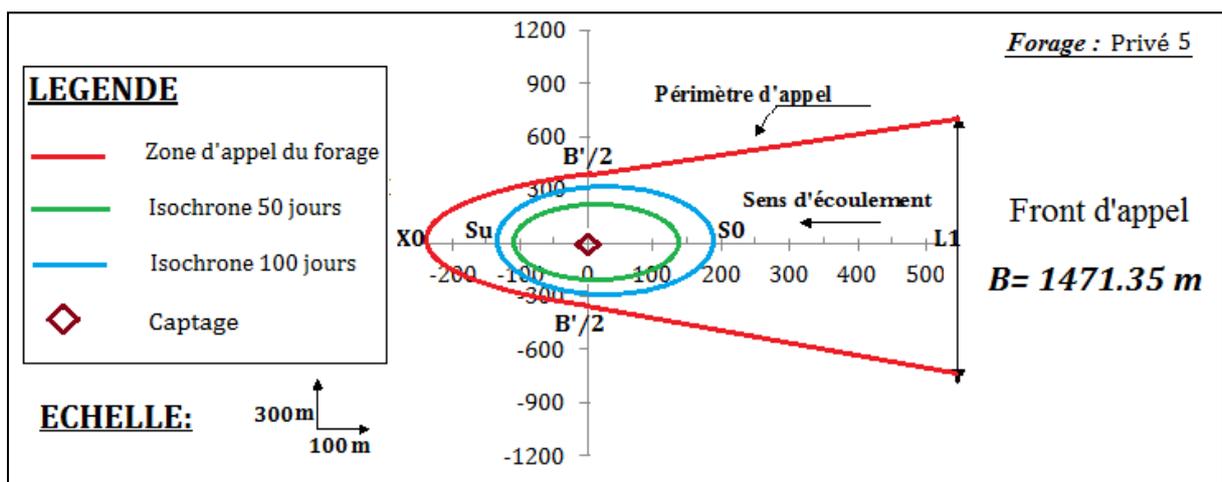


Figure 60 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 5

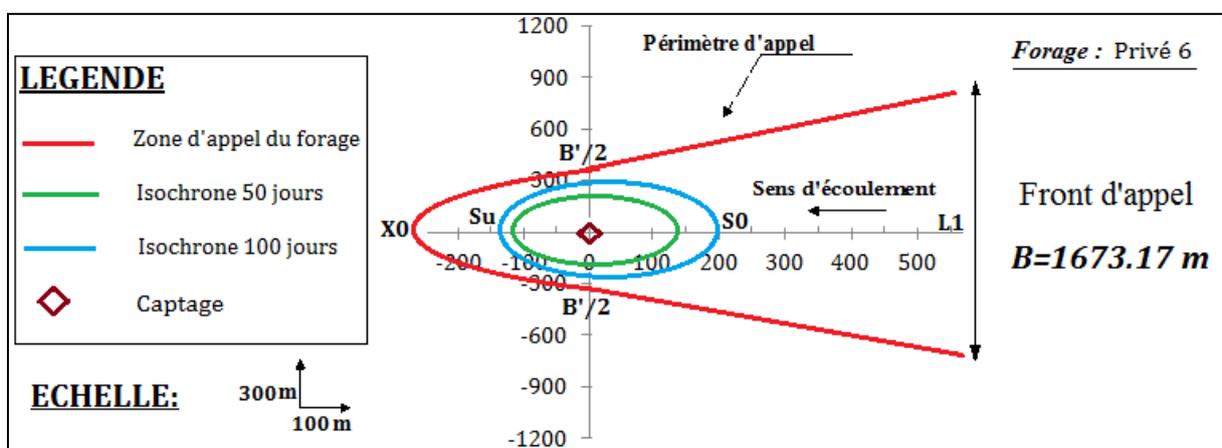
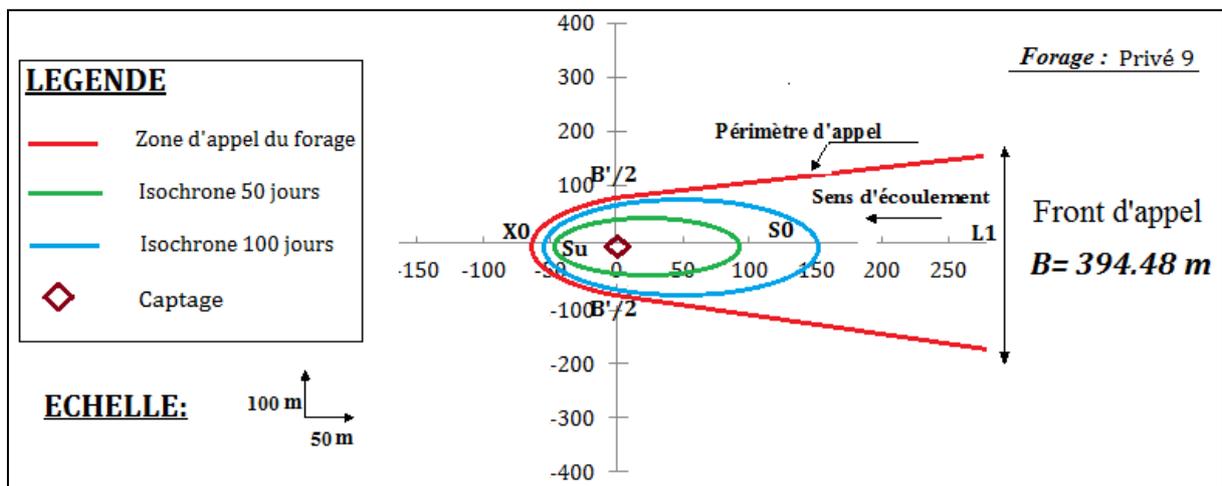
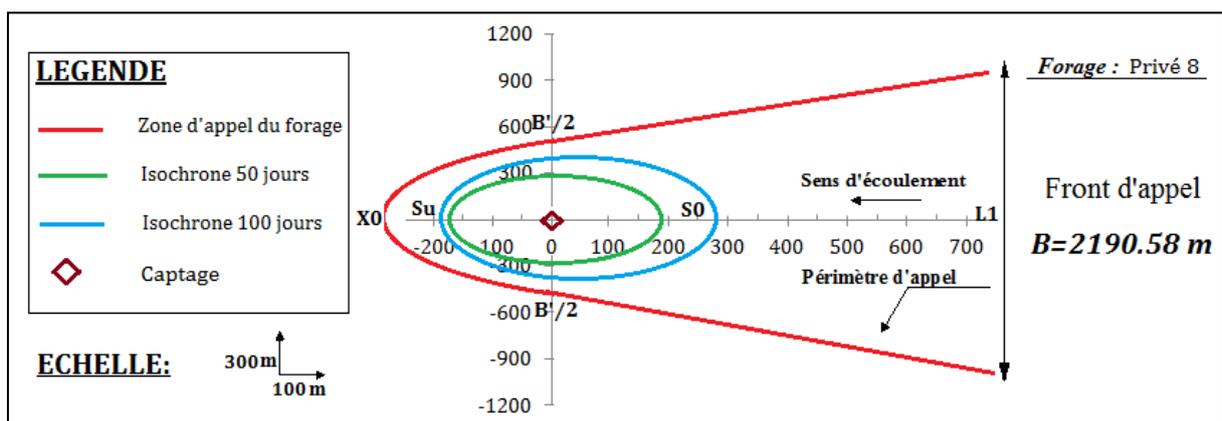
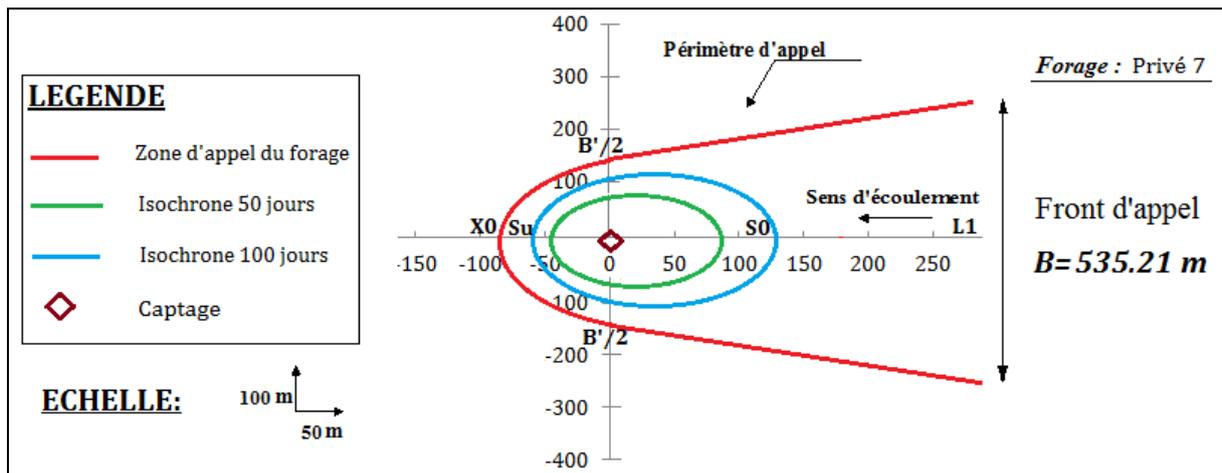


Figure 61 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 6



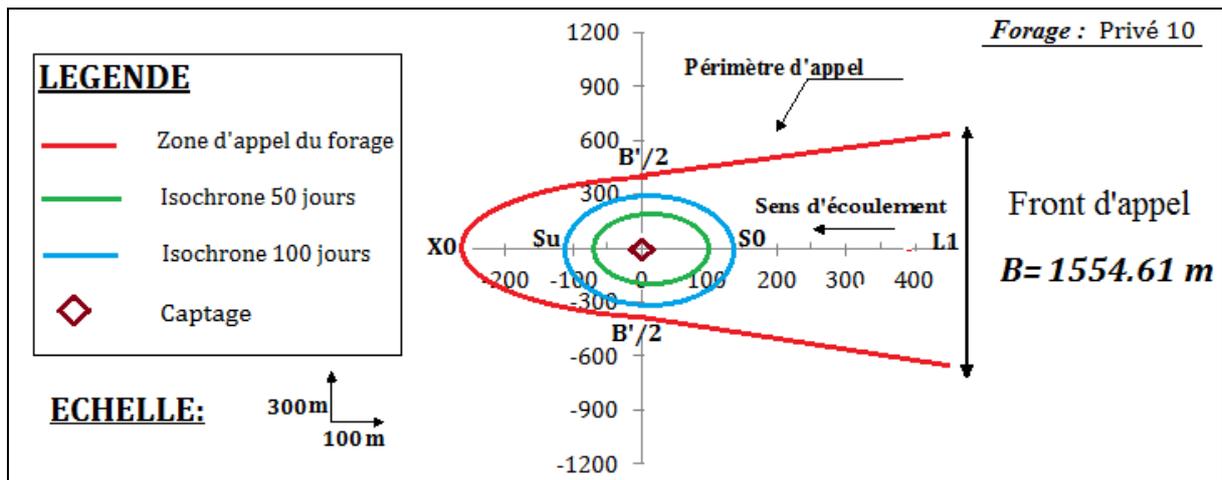


Figure 65 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 10

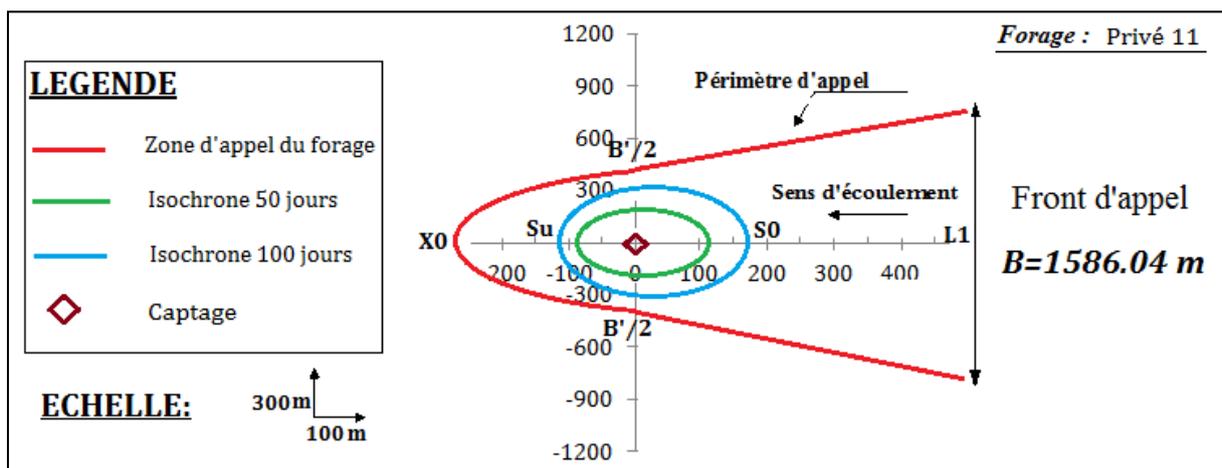


Figure 66 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 11

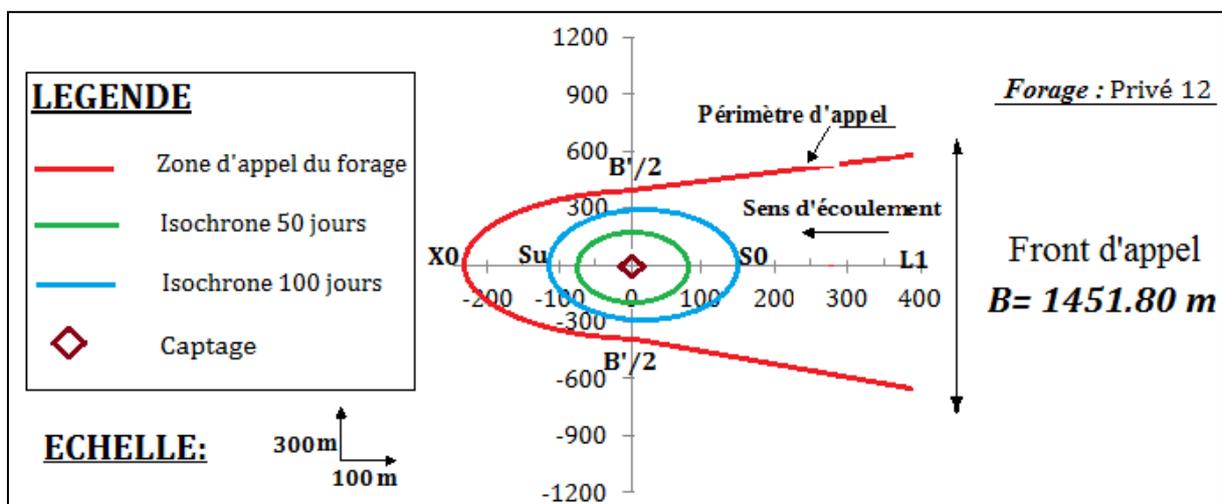


Figure 67 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 12

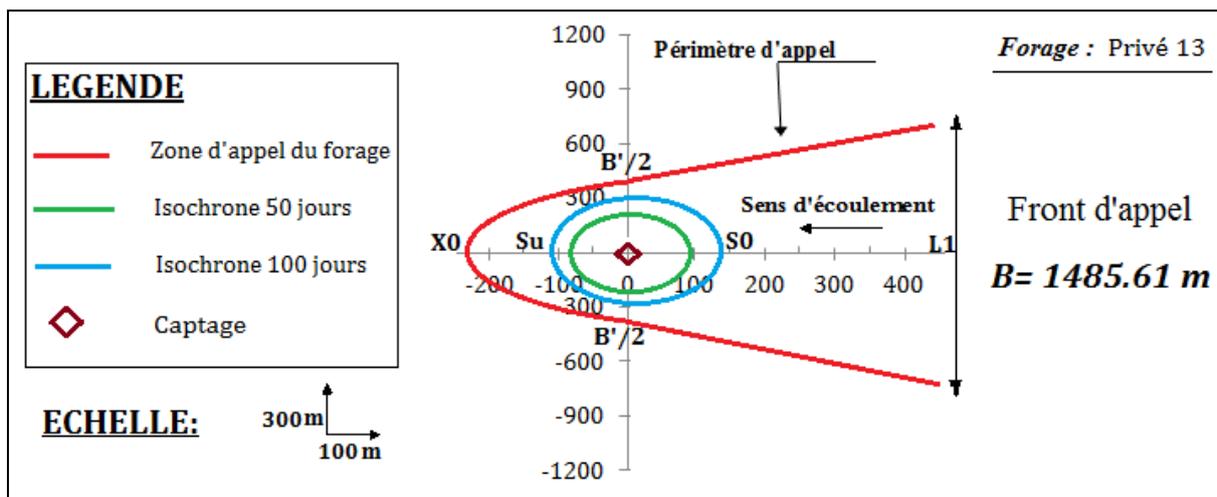


Figure 68 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 13

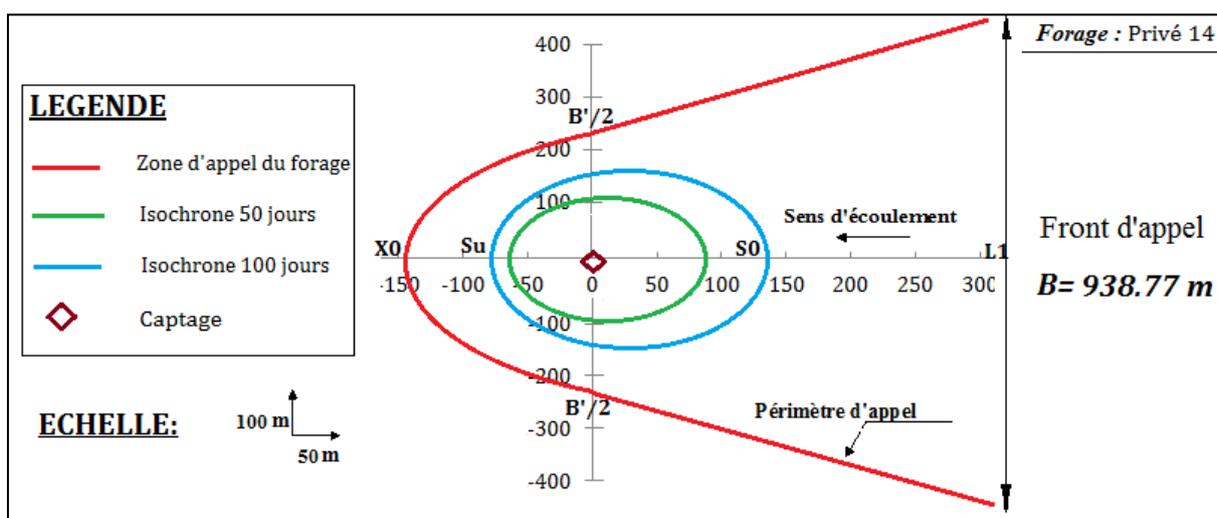


Figure 69 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 14

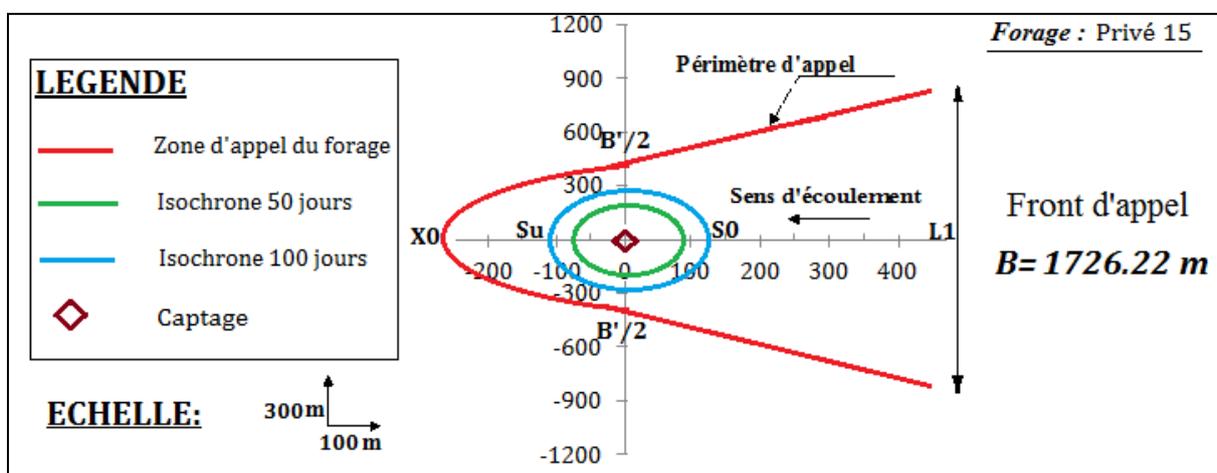


Figure 70 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 15

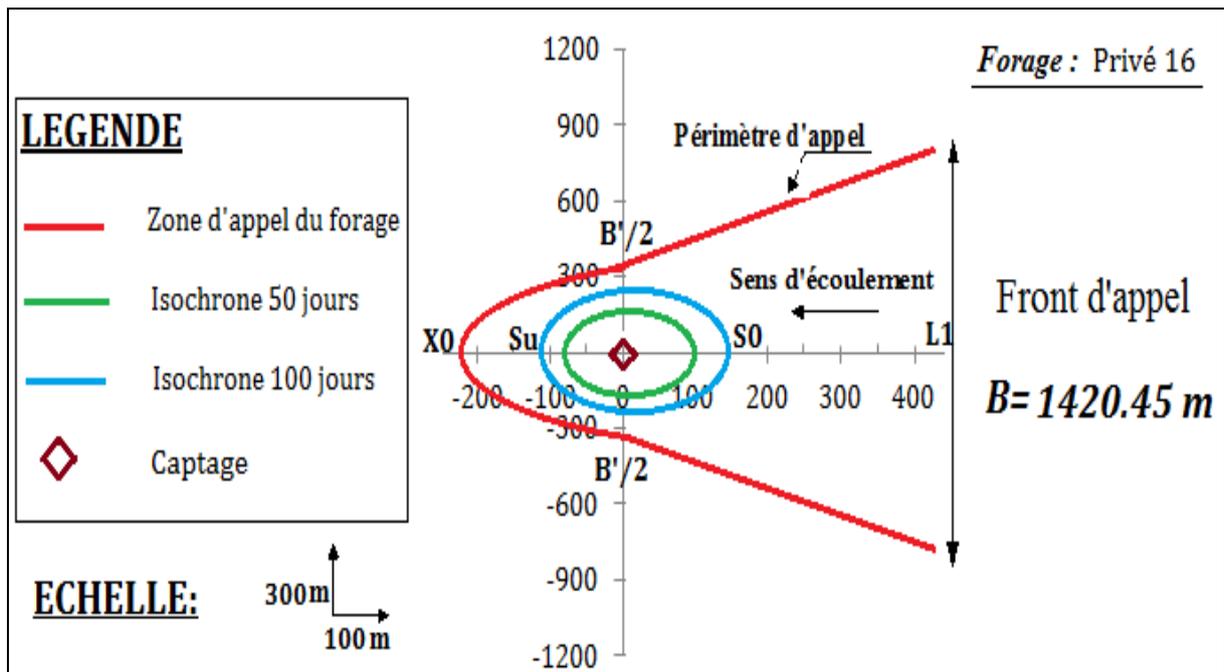


Figure 71 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 16

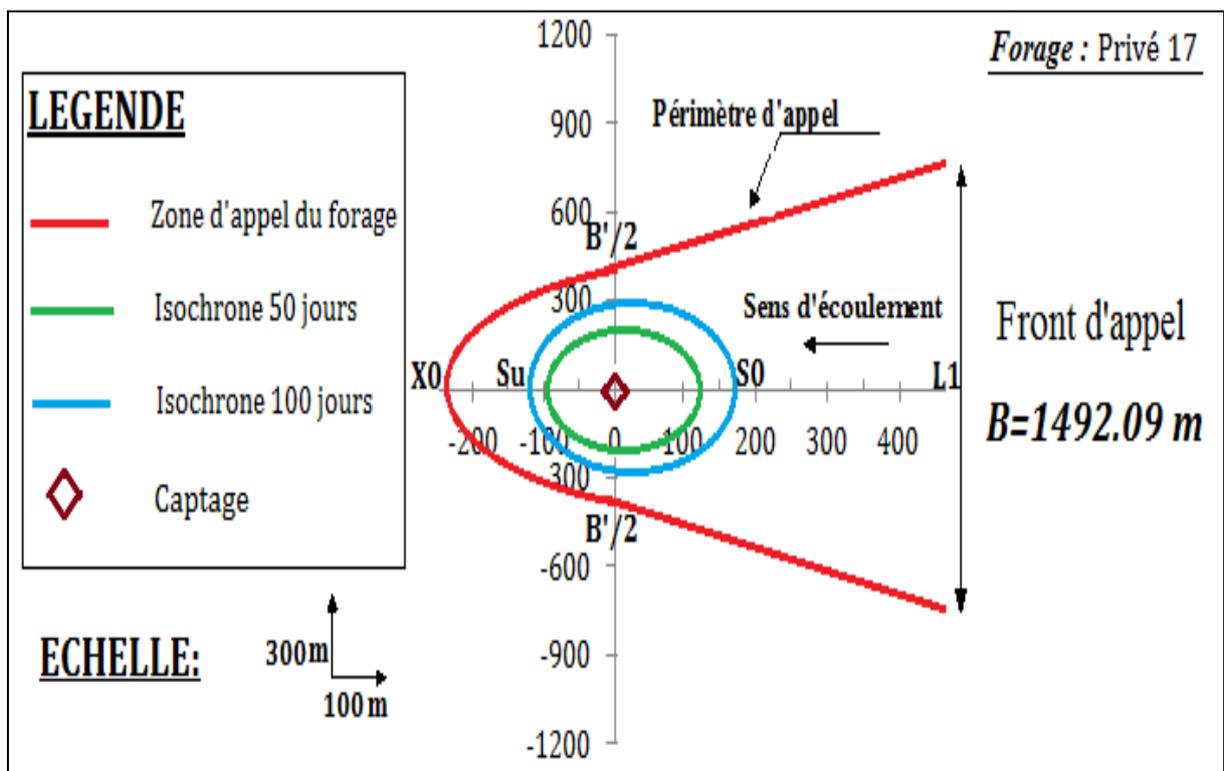


Figure 72 : Périmètres d'appel et isochrones 50 et 100 jours pour le forage privé 17

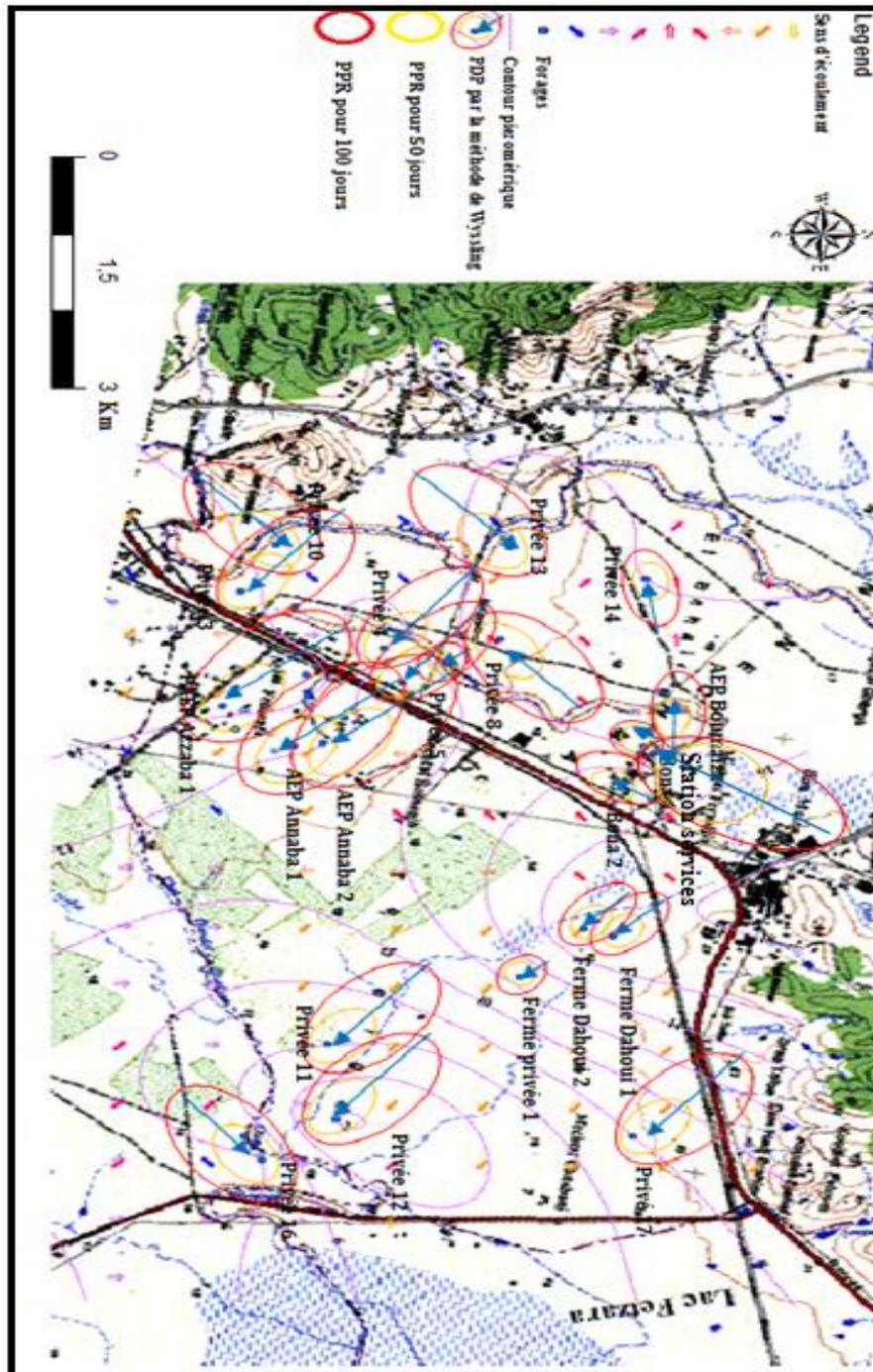


Figure 73 : PPR par la méthode de Wyssling sur la carte topographique du Berrahal 1/50000

2.2.4. Interprétation des résultats

A l'aide de deux méthodes différentes (cylindre et Wyssling), nous avons pu déterminer les périmètres de protection rapprochée pour les ouvrages des captages implantés dans la nappe alluviale de Boumaiza (Tab.37).

Tableau 37 : Les PPR par les méthodes du cylindre et Wyssling

	C y l i n d r e	W y s s l i n g	
F o r a g e s	r 5 0 j o u r s	S u 5 0 J r s	S o 5 0 J r s
F e r m e D a h o u i 1	7 8 , 3 5	8 0 , 7 0	9 9 , 9 3
F e r m e D a h o u i 2	8 8 , 0 6	9 0 , 1 0	1 0 9 , 0 7
F e r m e P r i v é	5 9 , 1 0	6 5 , 4 9	9 3 , 6 8
B o n a 1	1 0 5 , 9 5	1 0 8 , 7 7	1 3 3 , 2 4
B o n a 2	9 9 , 1 1	1 0 2 , 0 8	1 2 6 , 4 5
L a v a g e	1 9 8 , 2 1	2 0 0 , 1 7	2 2 7 , 7 7
A E P A z z a b a 1	1 0 8 , 5 7	1 0 8 , 8 9	1 1 6 , 9 5
A E P A z z a b a 2	9 8 , 0 0	9 8 , 3 4	1 0 6 , 1 8
A E P A n n a b a 1	9 4 , 8 9	9 5 , 2 7	1 0 3 , 4 8
A E P A n n a b a 2	1 4 1 , 9 4	1 4 2 , 2 2	1 5 0 , 4 1
A E P A n n a b a 3	1 3 8 , 1 4	1 3 8 , 4 1	1 4 6 , 4 4
A E P B o u m a i z a	1 1 2 , 2 2	1 1 4 , 9 6	1 3 9 , 8 2
P r i v é 1	9 4 , 0 2	9 4 , 3 9	1 0 2 , 4 8
P r i v é 2	8 4 , 0 9	8 4 , 7 7	9 5 , 3 1
P r i v é 3	7 6 , 7 7	7 7 , 4 9	8 7 , 8 8
P r i v é 4	9 0 , 4 7	9 1 , 5 1	1 0 5 , 0 8
P r i v é 5	1 1 3 , 1 9	1 1 4 , 0 4	1 2 7 , 7 2
P r i v é 6	1 2 1 , 3 8	1 2 2 , 2 0	1 3 6 , 0 3
P r i v é 7	6 8 , 8 6	7 0 , 2 7	8 4 , 1 9
P r i v é 8	1 6 5 , 8 4	1 6 7 , 0 5	1 8 6 , 7 7
P r i v é 9	7 2 , 3 8	7 5 , 3 4	9 6 , 2 0
P r i v é 1 0	8 7 , 2 0	8 7 , 5 6	9 5 , 2 5
P r i v é 1 1	9 5 , 2 2	9 5 , 6 7	1 0 4 , 6 4
P r i v é 1 2	7 4 , 9 2	7 5 , 1 8	8 1 , 2 5
P r i v é 1 3	8 8 , 6 4	8 9 , 0 5	9 7 , 3 6
P r i v é 1 4	7 4 , 9 2	7 5 , 5 2	8 4 , 9 1
P r i v é 1 5	8 0 , 9 2	8 1 , 1 6	8 7 , 1 2
P r i v é 1 6	8 9 , 6 5	9 0 , 1 1	9 8 , 9 9
P r i v é 1 7	9 9 , 1 1	9 9 , 6 7	1 1 0 , 0 1
M o y e n n e	1 0 0 , 0 0	1 0 1 , 2 5	1 1 4 , 9 9

Les résultats obtenus par les deux méthodes, du cylindre et celle de Wyssling, sont très proches, avec des rayons moyens de 100 m et 108 m successive, à partir du centre du puits.

Ces valeurs sont conformes aux normes internationales définit par un rayon de 100 m ou un temps de transport de 60 jours (Paradis, 2000).

Le rayon du périmètre de protection minimal est enregistré au niveau du forage de la ferme privée, situé dans la partie Nord-Est de la région d'étude, avec 59,10 et 79, 58 m pour les deux méthodes respectivement.

Le rayon du périmètre de protection maximal est observé au niveau du forage de la station service, située dans la partie Nord-centre de la région d'étude, avec 198.2 à 213.97 m pour les deux méthodes respectivement (Fig.75).

2.3. Périmètre de protection éloignée (PPE)

2.3.1. Méthode de cartographie hydrogéologique

Le périmètre de protection éloignée a pour but de prolonger le périmètre de protection rapprochée pour renforcer la protection contre les risques de pollutions chroniques, diffuses ou accidentelles. Son étendue correspond à la surface comprise entre la limite du périmètre de protection rapprochée et la limite du bassin versant pour les eaux superficielles ou du bassin d'alimentation pour les nappes d'eau souterraine. Dans ce sens, et avant de délimiter le BAC qui correspond au lieu des points de la surface du sol qui contribuent à l'alimentation du captage, on doit d'abord déterminer la portion de la nappe d'eau souterraine alimentant le captage (PNAC) qui représente des particules d'eau située en un endroit quelconque de la zone saturée qui termineront leur course dans le captage. Le bassin d'alimentation concerne un seul aquifère et correspond à la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage.

Les premières méthodes de délimitation du BAC ont été proposées par l'USEPA (Agence de Protection Environnementale des Etats-Unis) dans le cadre de la mise en place des périmètres de protection des captages. L'USEPA a élaboré un guide pour la délimitation des périmètres de protection des captages (USEPA, 1987) ainsi qu'un guide adapté aux milieux fracturés (USEPA, 1991) et un manuel sur la protection des captages et des eaux souterraines (USEPA, 1994).

La nappe alluviale de Boumaiza est caractérisée par des alluvions d'épaisseur maximale de 110 m répartie sur la totalité de la plaine. Limons, argiles et argiles sableuse séparent les sols argileux en surface des dépôts de graviers qui caractérisent la nappe profonde, ce qui lui confère un caractère d'un milieu continu.

La méthode hydrodynamique graphique qui est basée sur le tracé de la surface piézométrique et les lignes de partage des eaux, est bien adaptée aux captages en domaine alluvial et sédimentaire non karstique (Vernoux et al., 2007).

La délimitation a été réalisée sur la base des deux cartes piézométriques basées chacune sur 30 mesures de niveau réalisées en périodes de hautes et basse eaux.

Les étapes de la cartographie sont :

- Tracé des courbes isopièzes à l'aide du logiciel ArcGIS 10.3 ;
- Détermination du sens d'écoulement sous la fenêtre Arc Toolbox → Spatial Analyste Tools → Hydrologie → FLOW DIRECTION.
- Délimitation du PNAC sous la fenêtre Arc Toolbox → Spatial Analyste Tools → Hydrologie → FLOW Accumulation → Bassin.
- Par la projection du PNAC sur un fond topographique (carte topographique de Berrahal 1/50000), on obtient le bassin d'alimentation du captage (BAC).

L'application de cette méthode nous a donné deux cartes des BAC dans la plaine alluviale de Boumaiza, pour les deux périodes de mesure.

La période des hautes eaux (Avril 2017) caractérisée par deux directions du sens d'écoulement, et par conséquent deux bassins d'alimentation des captages ont été délimités (Fig.76 et Fig.77).

Le premier BAC s'étend sur une superficie de 76,1 Km², soit 86,4 % de la superficie totale, dans lequel les eaux proviennent du Nord Nord-Est, Sud Sud-Est, et Sud Est pour l'alimentation du lac Fetzara.

Le deuxième BAC s'étend sur une superficie de 12, 7 Km², soit 13,6 % de la superficie totale, dans lequel les flux des eaux sont de direction Sud Sud-Est au niveau de l'oued Kébir vers la partie extrême Nord-Ouest de la zone d'étude.

La période des basses eaux, présente un seul sens d'écoulement vers la partie Sud-Est de la plaine. Dans ce cas, le BAC représente la totalité de la plaine, soit 88,8 Km² (Fig.78 et Fig.79).

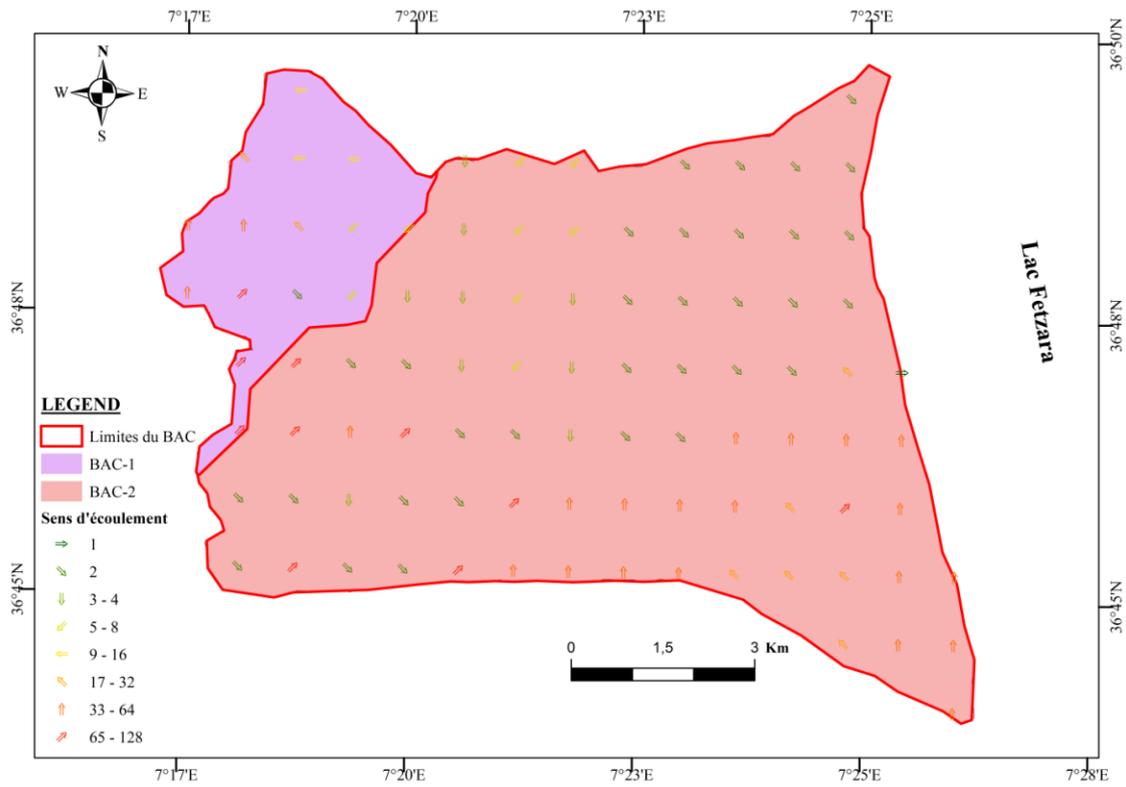


Figure 74 : Carte de délimitation du BAC pour la période des hautes eaux (Avril 2017)

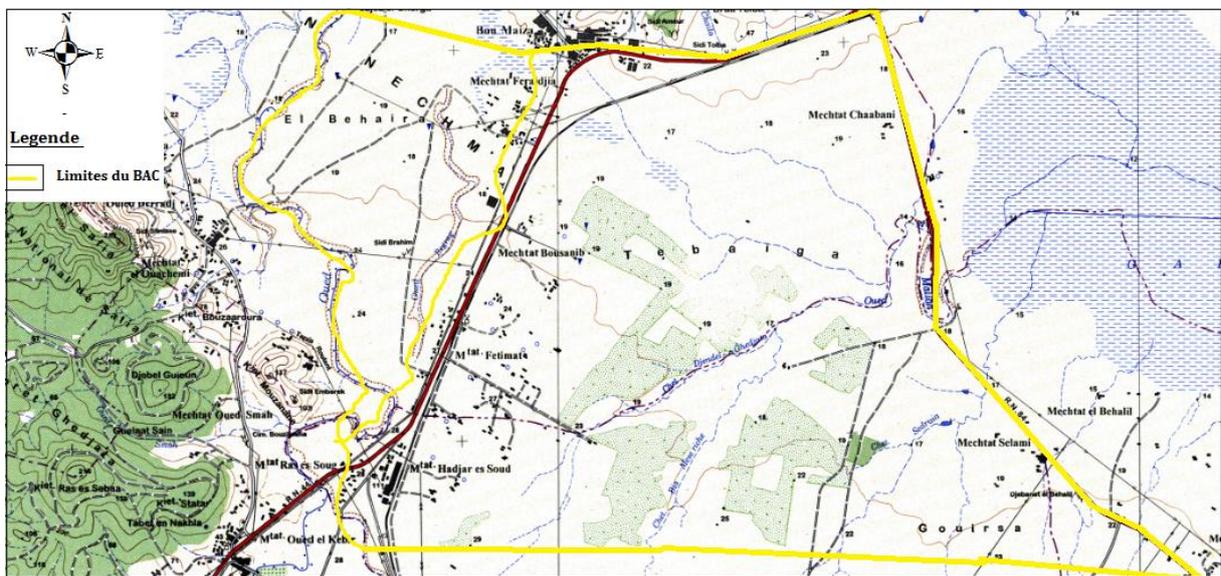


Figure 75 : Représentation du BAC sur la carte topographique du Berrahal 1/50000

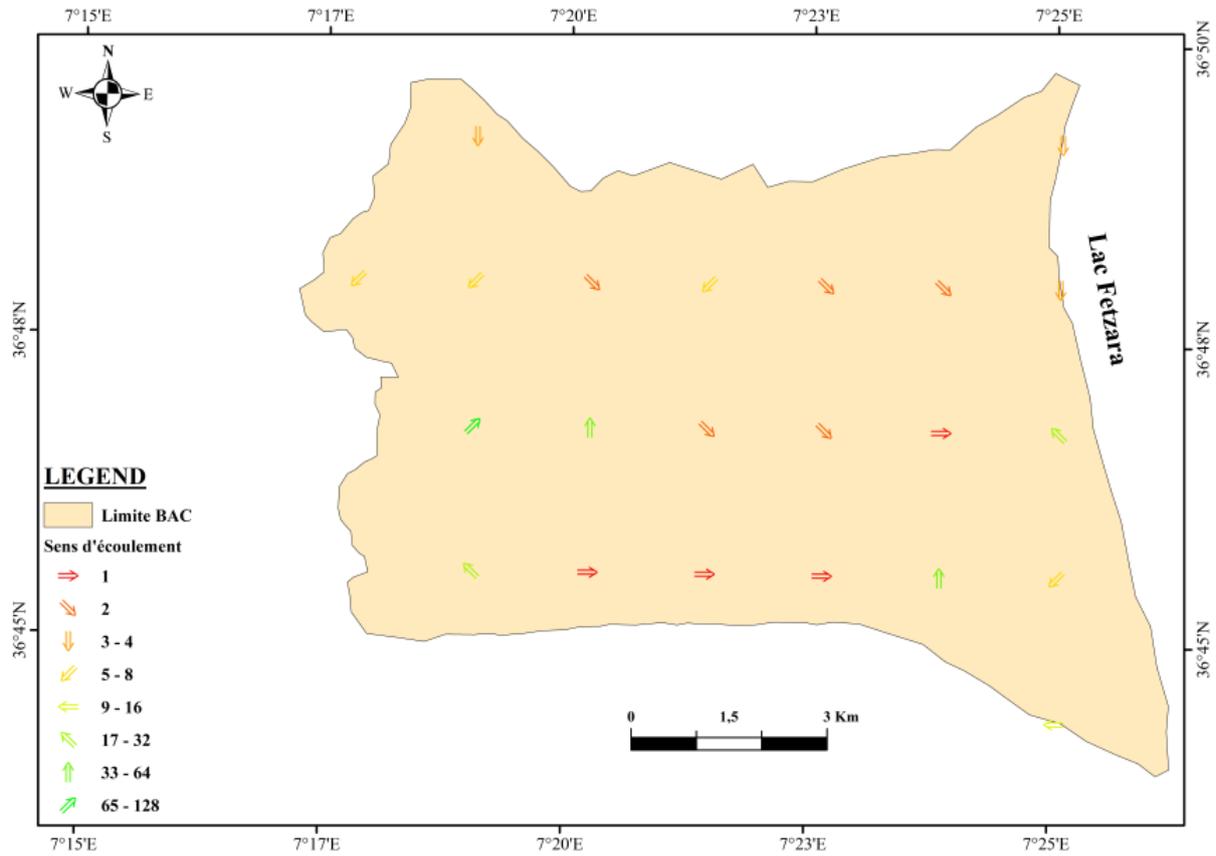


Figure 76 : Carte de délimitation du BAC pour la période des basses eaux (Janvier 2018)

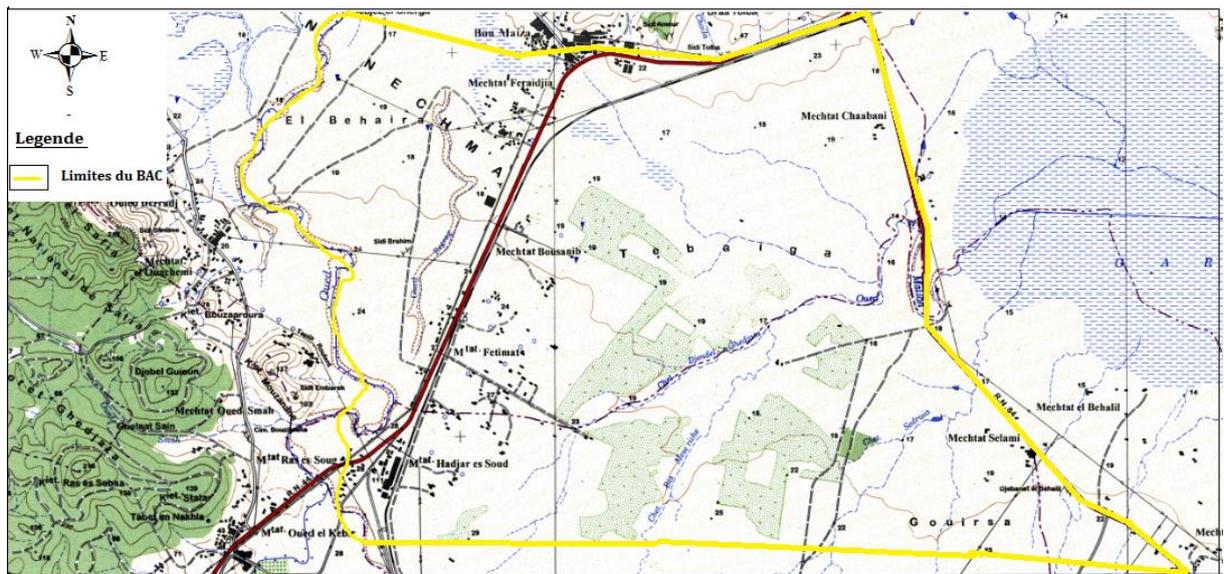


Figure 77 : Représentation du BAC sur la carte topographique du Berrahal 1/50000

Généralement, la méthode de cartographie hydrogéologique est précise lorsqu'on utilise plusieurs points de contrôle piézométrique (Bradbury, 1991; Paradis, 2000).

2.3.1. Méthode de l'infiltration

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

$$r = \sqrt{\frac{Q}{\pi R}}$$

$$A = \frac{Q}{\pi R}$$

Avec :

r : rayon de l'aire de recharge de la nappe équilibrant le débit prélevé (m) ;

Q : débit maximum prélevé dans le captage (m³/an) ;

R : recharge de la nappe (m/an) équilibrant le débit prélevé dans le captage (de l'ordre de 0.1 m/an d'après l'étude hydroclimatologique) ;

A : superficie de la zone d'alimentation du captage (m²).

La méthode est facile à appliquer et s'articule sur des principes hydrogéologiques simples. Cependant, elle tend à surprotéger la zone en amont et en aval parce qu'elle ne tient pas compte de l'écoulement régional (Kingman et Ferreira, 2001).

Les résultats des calculs sont représentés dans le tableau 38.

Cette méthode n'est pas précise car la représentation du PPE par un cercle est indépendante de la configuration de l'écoulement. Dans un aquifère avec un gradient hydraulique très faible, la forme du PDP peut être assimilée à un cercle. Cependant, dans un aquifère avec un gradient hydraulique non négligeable le PDE ne peut pas être représenté par un cercle (Paradis, 2000).

Tableau 38 : Détermination des PPR par la méthode d'infiltration

Forages	Q (m3/an)	r	Superficie (m ²)	Superficie (km ²)
Ferme Dahoui1	473040	1227,39	4730400	4,73
Ferme Dahoui 2	473040	1227,39	4730400	4,73
Ferme Privé	252288	896,36	2522880	2,52
Bona 1	630720	1417,27	6307200	6,31
Bona 2	630720	1417,27	6307200	6,31
Lavage	1892160	2454,79	18921600	18,92
AEP Azzaba 1	756864	1552,54	7568640	7,57
AEP Azzaba 2	693792	1486,45	6937920	6,94
AEP Annaba 1	693792	1486,45	6937920	6,94
AEP Annaba 2	1261440	2004,33	12614400	12,61
AEP Annaba 3	1072224	1847,90	10722240	10,72
AEP Boumaiza	788400	1584,56	7884000	7,88
Privé 1	283824	950,74	2838240	2,84
Privé 2	283824	950,74	2838240	2,84
Privé 3	283824	950,74	2838240	2,84
Privé 4	315360	1002,16	3153600	3,15
Privé 5	473040	1227,39	4730400	4,73
Privé 6	473040	1227,39	4730400	4,73
Privé 7	220752	838,47	2207520	2,21
Privé 8	1103760	1874,88	11037600	11,04
Privé 9	252288	896,36	2522880	2,52
Privé 10	378432	1097,81	3784320	3,78
Privé 11	378432	1097,81	3784320	3,78
Privé 12	189216	776,27	1892160	1,89
Privé 13	252288	896,36	2522880	2,52
Privé 14	252288	896,36	2522880	2,52
Privé 15	283824	950,74	2838240	2,84
Privé 16	283824	950,74	2838240	2,84
Privé 17	315360	1002,16	3153600	3,15

3. Instauration pratique des périmètres de protection

L'instauration des périmètres de protection sur terrain est très difficile et compliquée, compte tenu de l'étendue spatiale de ces derniers qui sont de l'ordre de centaines de mètres. Même si on arrive à l'élaborer, il reste difficile à les contrôler en parallèle avec la nature de l'activité agricole intense qui caractérise la région ainsi que l'activité industrielle.

De ce fait, on doit trouver des solutions pour réaliser la valeur réelle du périmètre de protection pour la protection de la nappe alluviale de Boumaiza, afin de bénéficier d'une eau brute ayant la meilleure qualité possible.

3.1. Représentation pratique des PDP

La réalisation des PPI et PPE (bien défini par le législateur Algérien : 30 m autour du captage et le BAC, respectivement) est faisable.

La délimitation théorique des PPR (Fig.75), qui est basée sur des données hydrogéologiques (porosité, gradient hydraulique et épaisseur de l'aquifère), représente les particules d'eau délimitées par les isochrones 50 jours de la zone saturée qui termineront leur course dans le captage. La projection en surface de cette zone, ne prend pas en considération les différentes structures que ce soit immeuble, agglomération, oued, usine, route, chemin de fer, parcelle agricole...etc.

De ce fait, la projection de PPR (résultats obtenus par la méthode de Wyssling) sur un plan cadastral est une nécessité majeure afin de bien délimiter les secteurs à protéger en dehors des différents secteurs cités précédemment.

- La 1^{ère} étape est la projection des PPR sur un extrait du plan cadastral de la commune de Ben Azzouz d'une échelle de 1/5000 m (fig.80).
- La 2^{ème} étape est l'assemblage des PPR qui se superposent et joint des parties commun pour un seul périmètre défini par les limites extérieures de chaque enveloppe (Fig. 81).
- La 3^{ème} étape est la délimitation des PPR selon le découpage des parcelles administrativement, en tenant compte des routes, oued, chemin de fer...etc.

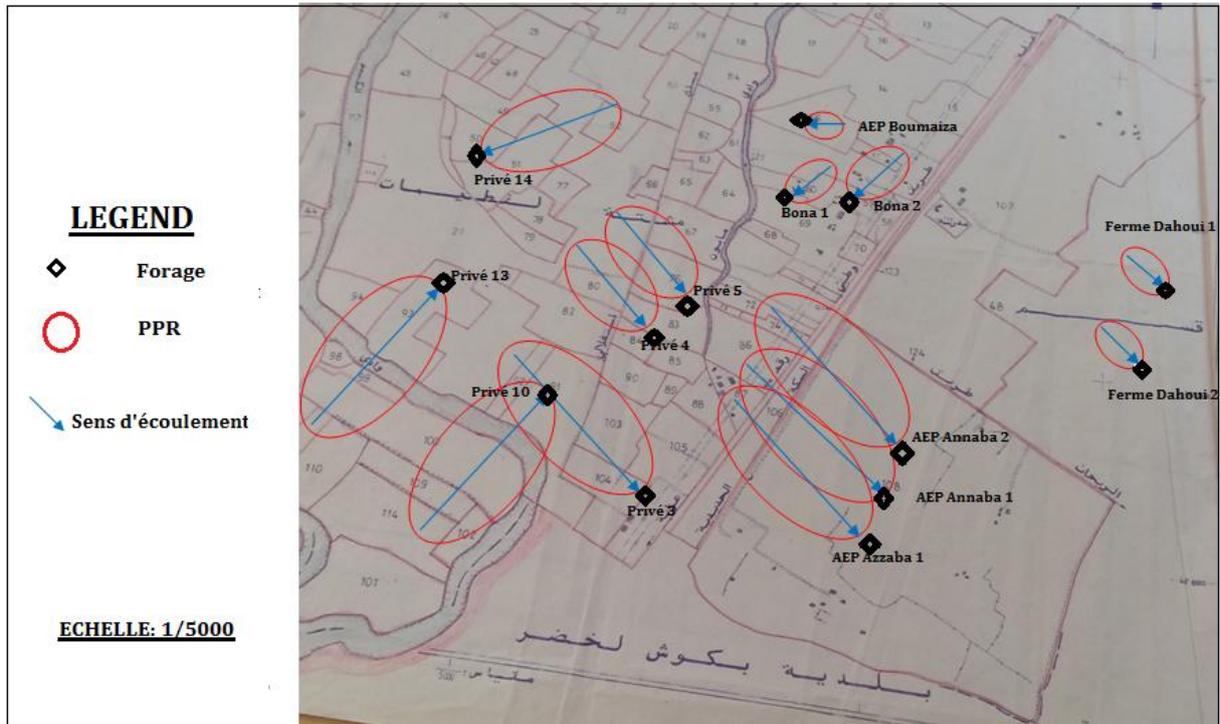


Figure 78 : PPR sur un extrait du plan cadastral de la commune de Ben Azzouz échelle 1/5000

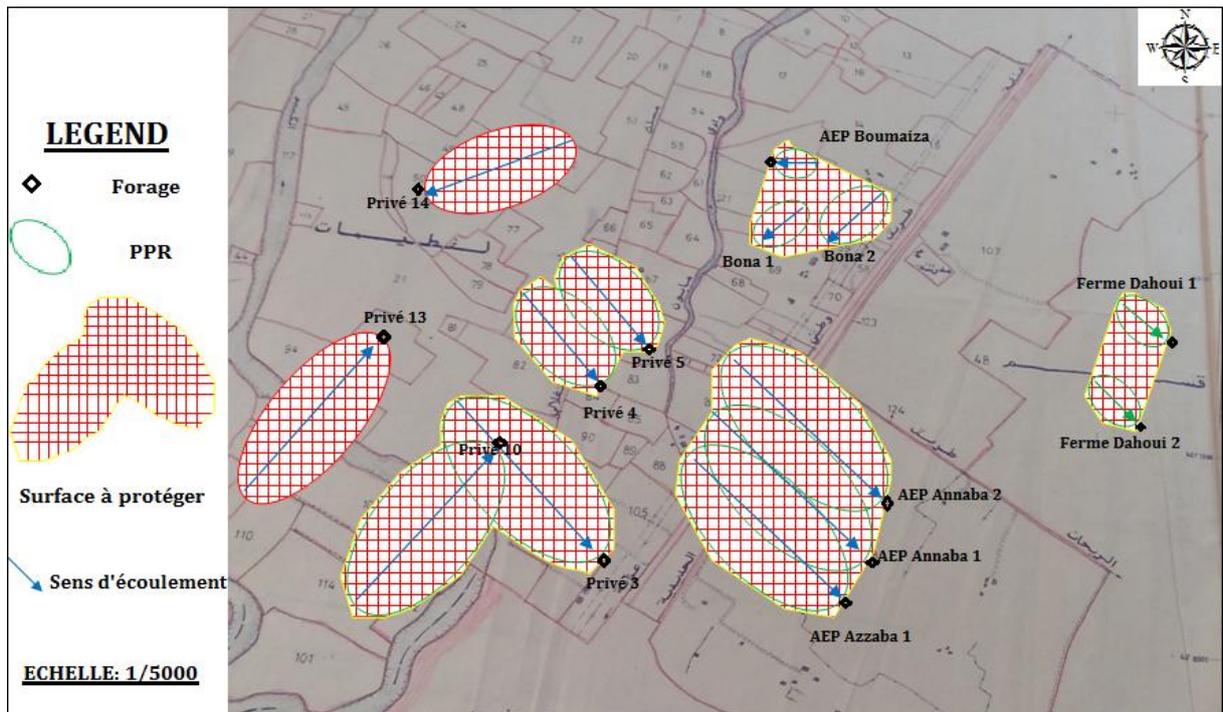


Figure 79 : l'assemblage des PPR sur un extrait du plan cadastral de la commune de Ben Azzouz, échelle 1/5000

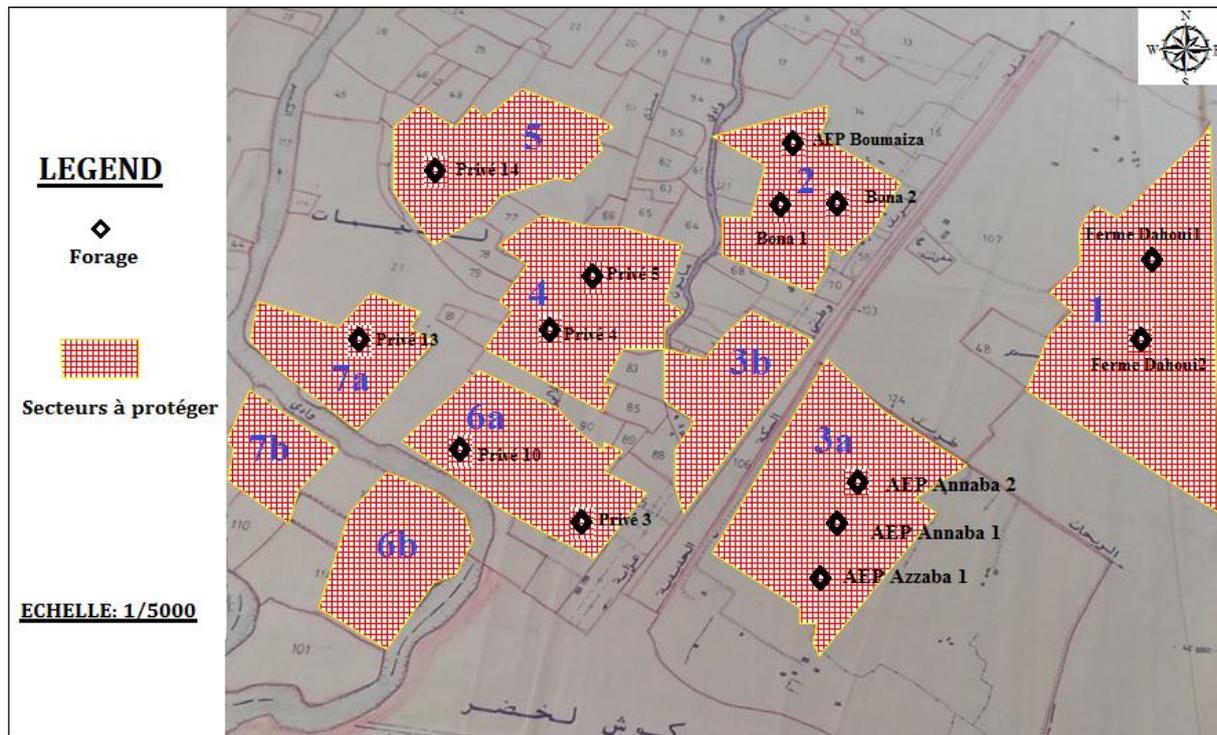


Figure 80 : Les PPR réels à appliquer dans la plaine alluviale de Boumaiza

D'après la figure 82, nous avons pu distinguer sept secteurs qui doivent être protégés, dont trois secteurs sont divisés en deux (un secteur traversé par un chemin de fer et la route nationale RN 44, et les deux autres secteurs sont traversés par l'oued Kébir ouest).

Cinq secteurs (2, 4, 5, 6, 7) se localisent dans la partie Ouest de la RN 44 et occupent la partie Nord-Ouest à Sud-Ouest, où on trouve les forages de Bona 1 et 2, AEP Boumaiza, conserverie de Ben Amor et plus de six forages privés destinés à l'irrigation agricole.

Les deux autres secteurs (1 et 3) se situent dans la partie Est de la RN 44 et occupent la partie Nord-Est à Sud-Est de la plaine alluviale de Boumaiza et couvrent les puits de la Ferme Dahoui 1 et 2, ainsi que les forages AEP Annaba 1, 2, 3, et forages AEP Azzaba 1 et 2.

A l'intérieur de ces secteurs, il est interdit de faire des travaux, installations, activités, dépôts, ouvrages, aménagement ou occupation des sols susceptibles d'entraîner une pollution de nature à rendre l'eau impropre à la consommation humaine.

Les autres travaux, installations, activités, dépôts, ouvrages, aménagement ou occupation des sols peuvent faire l'objet de prescriptions, et sont soumis à une surveillance particulière.

4. Risque de pollution dans les périmètres de protection

Une pollution résulte de l'apport d'éléments extérieurs dans un milieu. Il convient d'en distinguer deux types : pollution ponctuelle et pollution diffuse.

Une pollution dite ponctuelle (ou accidentelle) provient d'un point unique et identifiable. Ce type de pollution est le plus connu et souvent le plus visible à court terme. Depuis la prise de conscience générale des problèmes liés à l'eau, plusieurs programmes gouvernementaux et lois ont été mis en place afin de diminuer ces rejets polluants dans l'environnement.

A l'inverse, une pollution dite diffuse est issue de toute la surface d'un territoire et transmise aux milieux aquatiques de façon indirecte, sous l'influence de la force d'entraînement des eaux de ruissèlement (précipitation ou irrigation).

Les pratiques agricoles sont généralement à l'origine de pollution diffuse par lessivage des produits polluants. Cette pollution est de ce fait plus difficile à contrôler que la pollution ponctuelle parce qu'elle est liée à une multitude de sources réparties sur l'ensemble du territoire (Bonn et al., 2003).

Les eaux souterraines sont plutôt vulnérables aux pollutions diffuses, dont l'effet arrive généralement tardivement après un temps d'accumulation. Lorsqu'une dégradation est constatée, la restauration de la qualité est longue et difficile et peut prendre des dizaines d'années.

4.1. La pollution ponctuelle

4.1.1. Les fosses septiques

L'investigation sur terrain, a montré l'existence d'une agglomération isolée de la région de Boumaiza qui s'appelle Riahine. Cette dernière ne possède pas un réseau d'assainissement du fait de son éloignement. De plus, sur la ligne principale d'assainissement ; les habitants utilisent jusqu'à présent les fosses septiques depuis longtemps.

Ces fosses septiques sont implantés dans le secteur 1 (Fig. 82) qui se localise dans la partie Nord-Est et englobe les forages de la ferme Dahoui 1 et 2, ainsi que quelque forages privés destinés à l'irrigation.

Pour bien protéger ce secteur du risque de pollution, l'intervention des autorités locales dans les meilleurs délais est nécessaire, pour l'enfouissement de ces fosses et l'installation d'un réseau d'assainissement pour cette agglomération est une obligation.

4.1.2. Liquide s'écoulant de la tomate pourrie durant la période de livraison à l'usine Amor Benamor

La région de Ben Azzouz est classée première à l'échelle nationale pour la production de tomate industrielle. Les quantités énormes produites, sont absorbées par trois grandes unités

de transformation qui sont EZZAIM (Oued El Kébir), IZDIHAR (Ain Nechema) et Amor Benamor qui se situe à Boumaiza (partie Nord-Ouest de la région d'étude dans le secteur 2).

Sur une période de deux mois (Juillet à Aout), la saison de récolte de la tomate atteint son maximum, et une chaîne de tracteurs munis de remorques se prolonge sur plusieurs centaines de mètres le long de la RN 44 vers Azzaba.

Le problème est que la tomate destinée à l'usine, sous l'effet de haute température (environ 40 °C) et de la durée d'attente qui dépasse une semaine et parfois deux semaines, entraînent la perte de la moitié de son poids sous forme d'un liquide de très mauvaise odeur (Fig. 83). Ce liquide se propage sur les bordures de la route et s'écoule vers les parcelles agricoles et touche directement les secteurs 3a et 3b (Fig.82).



Figure 81 : Liquide de la tomate pourrie

Après cette période (été), et sous l'effet des premières précipitations de l'automne, certaines quantités de ce polluant vont ruisseler puis s'infiltrer dans le sol pour atteindre la nappe d'eau souterraine.

Avant de prendre n'importe quel dispositif pour lutter contre ce polluant persistant (deux mois par an en moyenne), une analyse chimique est fortement recommandée pour étudier le contenu de ce liquide.

Aussi, les autorités locales doivent intervenir pour trouver des solutions pour réduire la durée d'attente devant l'usine de conserverie Amor Benamor, soit par :

- L'augmentation de la capacité de l'usine vue les quantités de tomate reçues chaque année, et qui proviennent même des régions voisines (Guelma, Annaba, El Tarf) ;
- La sensibilisation des agriculteurs pour l'utilisation des différentes variétés de tomate, où le temps de récolte est différent. De ce fait, la livraison de tomate se fera dans de bonnes conditions en réduisant le taux de liquide écoulé de la tomate pourrie de moitié.

4.2. La pollution diffuse

L'eau et l'agriculture sont deux éléments aux relations particulièrement ambiguës. L'eau intervient comme une ressource naturelle de base pour le développement de l'activité agricole, alors que l'agriculture est devenue, avec l'intensification des systèmes de production, une des principales sources de pollution et d'abaissement du niveau des nappes d'eau.

La région de Boumaiza est caractérisée par une surface agricole totale de près de 7100 ha (80 % de surface totale). L'activité principale est la culture de la tomate industrielle (le rendement varie de 50 à 70 tonnes par hectare) et le poivron saisonnier (le rendement varie de 20 à 40 tonnes par hectare).

Afin d'être considérée comme potable, une eau doit respecter un certain nombre de normes, notamment en matière de concentrations en nitrates et produits phytosanitaires. Les gestionnaires sont alors bien souvent amenés à utiliser des traitements coûteux pour assurer la distribution d'une eau conforme, alors qu'une intervention à la source serait préférable, ce qui est assurée par le législateur Algérien.

Les enjeux liés à l'agriculture sur les secteurs à protéger sont notables puisque les eaux captées sont principalement situées en milieu des parcelles agricoles.

L'usage de produits chimiques dans l'agriculture participe activement à l'altération de la ressource en eau :

- Les nitrates proviennent des produits fertilisants tels que les engrais, utilisés par les agriculteurs comme source d'alimentation des plantes (pour la tomate et le poivron, les agriculteurs de Boumaiza utilisent de 800 kg à 1000 kg/hectare, d'où les normes recommander par l'institut technique des cultures maraichères industrielles ITCMI, 2002 sont de l'ordre de 800 kg/ha pour l'irrigation à la raie et de 400 kg/ha pour l'irrigation goutte à goutte). Cette substance est très soluble et rapidement dirigée vers les nappes d'eau et sont alors potentiellement présents dans l'eau captée. Si les nitrates font l'objet des plus vives

attentions, c'est qu'ils constituent, à forte dose, à la fois un risque pour la qualité de l'eau et pour la santé humaine.

➤ Les produits phytosanitaires qui sont utilisés excessivement, dès la première pose des plantes, jusqu'à la phase finale de récolte. La cause principale de cette intense utilisation des pesticides est le changement climatique. Le phénomène d'effet de serre sert à influencer fortement le climat et cela par des changements climatiques brusques et par conséquent l'apparition de maladies en relation directe à ce phénomène tel que le Mildiou, le développement des champignons que soit à l'extérieur du sol qui provoque l'usure des fruits, ou à l'intérieur du sol qui provoque l'usure des racines. Le tableau ci-dessous présente les différents pesticides utilisés par les agriculteurs de la région de Boumaiza, afin d'atteindre les rendements cités précédemment (60 à 80 tonne / hectare).

Tableau 39 : Les différents pesticides utilisés par les agriculteurs de la région de Boumaiza

Pesticides	Maladies	Substance active
<ul style="list-style-type: none"> • Revus Garden • Ortiva • Dithane® WG 	MILIDIOU	<ul style="list-style-type: none"> • Mandipropamide • Azoxybstrobine • Mancozèbe • Difénoconazole • manèbe
<ul style="list-style-type: none"> • Cuprex garden • Contans WG • Bouillie bordelaise 	LA SCLEROTINIOSE (Pourriture blanche)	<ul style="list-style-type: none"> • oxychlorure de cuivre • sulfate de cuivre
<ul style="list-style-type: none"> • Insecticide Plus AVEVE • Okapi garden • Axoris®Quick-Sticks11 	PARASITES ET NUISIBLES	<ul style="list-style-type: none"> • Acétamipride • lambdacyhalothrine et pirimicarbe • Thiaméthoxam

La mise en œuvre des mesures préventives pour protéger la nappe d'eau souterraine de cette pollution diffuse, implique une multitude d'acteurs au niveau local (collectivités, établissements publics, profession agricole, opérateurs fonciers...), aussi bien sur les plans financiers que techniques. Dans ce contexte, les solutions proposées sont :

4.2.1. Utilisation du système d'irrigation goutte à goutte

L'irrigation goutte à goutte de surface et souterraine sont considérées comme les moyens les plus efficaces pour fournir de l'eau et les nutriments sans gaspillage et sans excès, directement aux plantes en quantité nécessaire et suffisante, seulement quand et où il faut pour augmenter la productivité des plantes.

Plusieurs travaux ont été réalisés sur ce système d'irrigation à travers le monde tels que la Tunisie (Thompson *et al.*, 2002, 2003 ; Douh et Boujelben, 2007), Maroc (R. Bourziza, A. Hammani, 2016), France (J.C. Mailhol et P. Ruelle, 2013) ; Canada (Mahmoud Karimi Youch, 2010) et autres.

L'ensemble des auteurs, ont confirmés l'effet positif de l'irrigation goutte à goutte sur le rendement d'une culture, et l'économie de l'eau (10 à 20 % par rapport au système d'aspersion, et plus de 50 % par rapport à l'irrigation à la raie qui est le système pratiqué par les agriculteurs de Boumaiza).

Les agriculteurs de la région de Boumaiza, utilise l'irrigation gravitaire (à la raie) (Figure 84). Cette méthode caractérisée par un coût d'investissement faible à la parcelle pour l'agriculteur, et ne nécessite pas un grand équipement (moteur de refoulement et la tuyauterie). D'autre part, elle connue des pertes d'eau importantes, faible efficacité, estimation du volume réellement consommé difficile et aide à la diffusion des polluants.

De ce fait, l'utilisation du système d'irrigation goutte à goutte surface ou souterraine est bien recommander. Ce dernier (irrigation goutte à goutte souterraine SDI, Subsurface drip irrigation), connue des équipements innovants en particulier les gaines en polyéthylène diffusées par certains fabricants, ont bénéficié de perfectionnements qui permettent de les enterrer (Fig.84), à une profondeur inférieure à celle du labour (30 cm environ). En effet, ces gaines sont équipées de goutteurs (espacés de 30 à ou 40 cm, en général) présentant un débit qui reste proche du débit nominal, et avec une bonne uniformité, lorsqu'ils fonctionnent dans la plage de variation de pression (0,5-1 bar) recommandée par le fabricant. Le caractère innovant de cet équipement réside dans le fait qu'il s'oppose à l'intrusion dans les goutteurs des particules du sol et des racines. De plus, les goutteurs sont dotés d'un système anti-siphon et la gaine se vidange automatiquement sitôt l'eau coupée. Enfin, d'après les constructeurs, la durée de vie serait de l'ordre de quinze ans pour ce SDI.

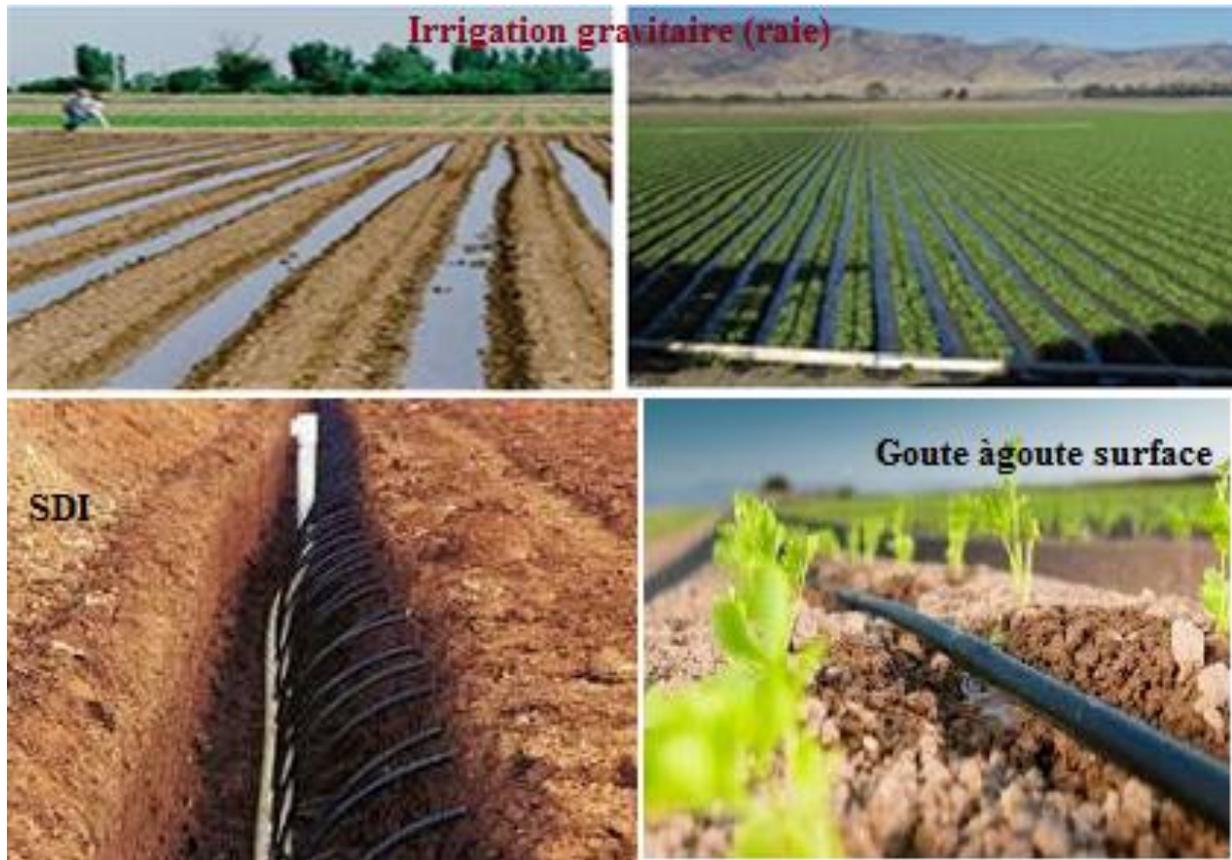


Figure 82 : Les différents systèmes d'irrigation

L'application de cette méthode va réduire la quantité d'eau utilisée pour les parcelles agricole, et par conséquent une diminution au débit de pompage au bien une réduction aux heures de pompage par jour, ce qu'il a un impacte direct sur le rayon des périmètres de protection rapproché par les deux méthodes de calcul, du cylindre et de Wyssling (Tab.40).

Si on arrive à réaliser cette approche (l'optimisation des débits d'exploitation que se soit pour les agriculteurs ou les autres utilitaires), on va assurer une réduction importante au niveau des périmètres de protections rapproché, et par conséquent un bon maitrise et contrôle des secteurs prédéfinie (Fig.82), de tous types de pollution.

Tableau 40 : Influence du débit pompé sur le PPR (méthode du cylindre)

Forages	90% Q (m3/j)	80% Q (m3/j)	50% Q (m3/j)	$r_{50\text{jours}}$		
				90% Q	80% Q	50% Q
Ferme Dahoui1	1166,4	1036,8	648	74,33	70,08	55,40
Ferme Dahoui 2	1166,4	1036,8	648	83,54	78,76	62,27
Ferme Privé	622,08	552,96	345,6	56,06	52,86	41,79
Bona 1	1555,2	1382,4	864	100,51	94,76	74,92
Bona 2	1555,2	1382,4	864	94,02	88,64	70,08
Lavage	4665,6	4147,2	2592	188,04	177,29	140,16
AEP Azzaba 1	1866,24	1658,88	1036,8	102,99	97,10	76,77
AEP Azzaba 2	1710,72	1520,64	950,4	92,97	87,65	69,30
AEP Annaba 1	1710,72	1520,64	950,4	90,02	84,87	67,10
AEP Annaba 2	3110,4	2764,8	1728	134,66	126,96	100,37
AEP Annaba 3	2643,84	2350,08	1468,8	131,05	123,56	97,68
AEP Boumaiza	1944	1728	1080	106,46	100,37	79,35
Privé 1	699,84	622,08	388,8	89,20	84,09	66,48
Privé 2	699,84	622,08	388,8	79,78	75,22	59,46
Privé 3	699,84	622,08	388,8	72,83	68,66	54,28
Privé 4	777,6	691,2	432	85,83	80,92	63,97
Privé 5	1166,4	1036,8	648	107,38	101,24	80,04
Privé 6	1166,4	1036,8	648	115,15	108,57	85,83
Privé 7	544,32	483,84	302,4	65,33	61,59	48,69
Privé 8	2721,6	2419,2	1512	157,33	148,33	117,26
Privé 9	622,08	552,96	345,6	68,66	64,74	51,18
Privé 10	933,12	829,44	518,4	82,73	78,00	61,66
Privé 11	933,12	829,44	518,4	90,33	85,17	67,33
Privé 12	466,56	414,72	259,2	71,07	67,01	52,97
Privé 13	622,08	552,96	345,6	84,09	79,29	62,68
Privé 14	622,08	552,96	345,6	71,07	67,01	52,97
Privé 15	699,84	622,08	388,8	76,77	72,38	57,22
Privé 16	699,84	622,08	388,8	85,04	80,18	63,39

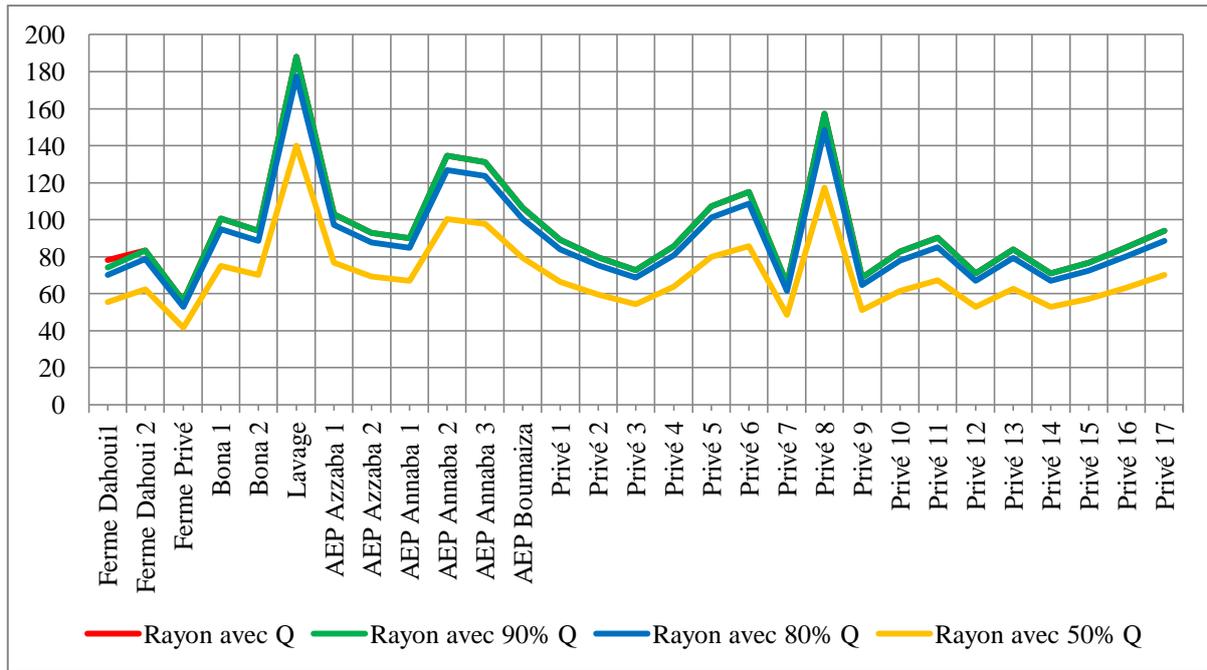


Figure 83 : Influence du débit pompé sur le périmètre de protection rapprochée selon la méthode du cylindre

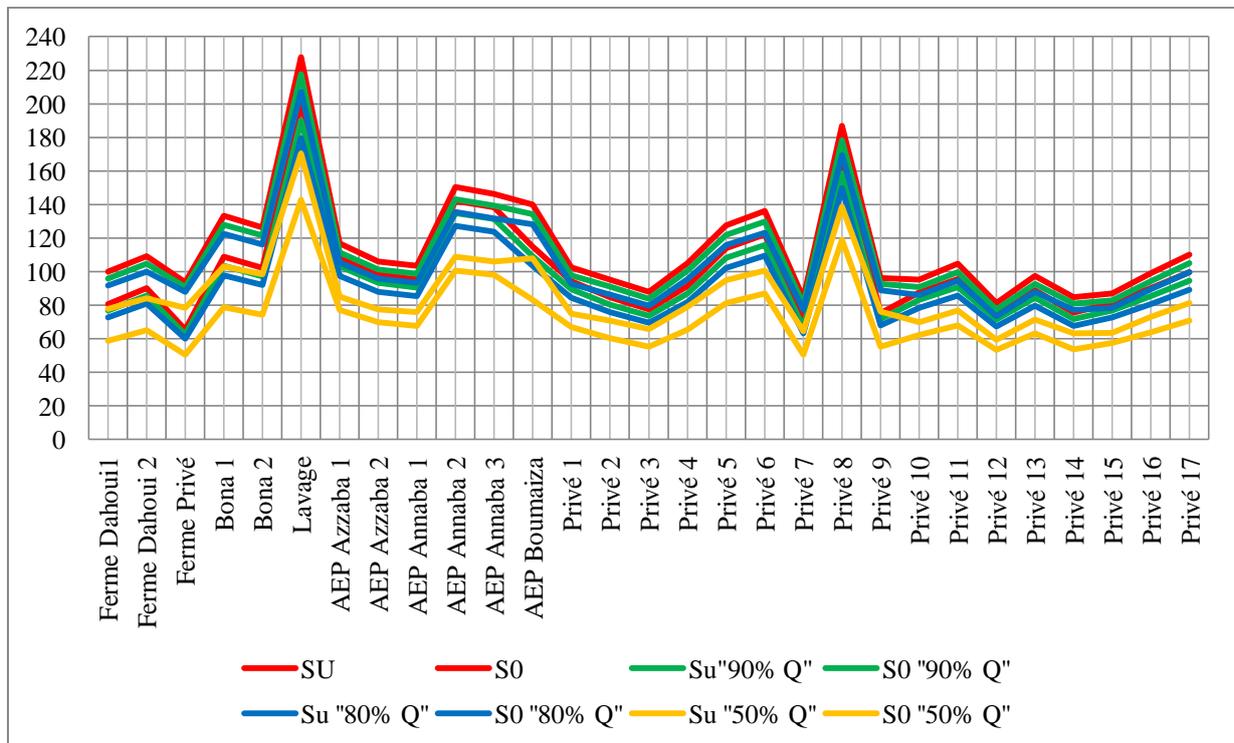


Figure 84 : Influence du débit pompé sur le périmètre de protection rapprochée selon la méthode du Wyssling

Tableau 41 : Influence du débit pompé sur le PPR (méthode du Wyssling)

Forages	SU	S0	SU (90%Q)	S0 (90%Q)	SU (80%Q)	S0 (80%Q)	SU (50%Q)	S0 (50%Q)
Ferme Dahoui1	80,70	99,93	76,80	96,03	72,69	91,92	58,66	77,90
Ferme Dahoui 2	90,10	109,07	85,69	104,65	81,03	100,00	65,11	84,07
Ferme Privé	65,49	93,68	62,76	90,95	59,92	88,10	50,41	78,60
Bona 1	108,77	133,24	103,47	127,95	97,90	122,37	78,83	103,31
Bona 2	102,08	126,45	97,15	121,51	91,95	116,32	74,21	98,58
Lavage	200,17	227,77	190,10	217,69	179,47	207,06	142,88	170,47
AEP Azzaba 1	108,89	116,95	103,34	111,39	97,46	105,52	77,21	85,26
AEP Azzaba 2	98,34	106,18	93,32	101,17	88,03	95,87	69,76	77,60
AEP Annaba 1	95,27	103,48	90,41	98,63	85,29	93,50	67,61	75,82
AEP Annaba 2	142,22	150,41	134,94	143,14	127,25	135,45	100,73	108,92
AEP Annaba 3	138,41	146,44	131,33	139,36	123,85	131,88	98,03	106,07
AEP Boumaiza	114,96	139,82	109,35	134,21	103,43	128,29	83,17	108,03
Privé 1	94,39	102,48	89,58	97,68	84,50	92,60	66,99	75,08
Privé 2	84,77	95,31	80,49	91,03	75,97	86,51	60,41	70,95
Privé 3	77,49	87,88	73,58	83,98	69,46	79,86	55,28	65,68
Privé 4	91,51	105,08	86,92	100,49	82,07	95,65	65,41	78,99
Privé 5	114,04	127,72	108,27	121,95	102,18	115,86	81,22	94,89
Privé 6	122,20	136,03	116,01	129,84	109,47	123,30	86,96	100,79
Privé 7	70,27	84,19	66,81	80,73	63,16	77,07	50,65	64,57
Privé 8	167,05	186,77	158,60	178,32	149,67	169,39	118,94	138,66
Privé 9	75,34	96,20	71,78	92,64	68,03	88,89	55,28	76,14
Privé 10	87,56	95,25	83,10	90,79	78,39	86,08	62,15	69,84
Privé 11	95,67	104,64	90,80	99,78	85,66	94,64	67,94	76,92
Privé 12	75,18	81,25	71,35	77,42	67,30	73,37	53,34	59,41
Privé 13	89,05	97,36	84,53	92,83	79,74	88,05	63,24	71,55
Privé 14	75,52	84,91	71,71	81,10	67,68	77,07	53,81	63,21
Privé 15	81,16	87,12	77,02	82,98	72,64	78,60	57,54	63,50
Privé 16	90,11	98,99	85,53	94,42	80,69	89,58	64,02	72,91
Privé 17	99,67	110,01	94,61	104,95	89,27	99,61	70,86	81,20

4.2.2. Remplacement des produits phytosanitaires par des méthodes d'agriculture développées

Les produits phytosanitaires sont des substances chimiques destinées à déduire ou combattre les organismes nuisibles aux végétaux (Benzine, 2006). Ils sont sévèrement réglementés à travers le monde ainsi que l'Algérie par la loi phytosanitaire sortie le 1^{er} Aout 1987 (loi phytosanitaire N°87-17), en raison de leur dangerosité, par l'instauration des mécanismes régissant les aspects relatifs à l'homologation, l'importation, la fabrication, la commercialisation, l'étiquetage, l'emballage et l'utilisation des pesticides.

Ils se présentent sous trois catégories qui sont : les herbicides (lutte contre les mauvaises herbes), les fongicides (lutte contre les champignons), et les insecticides (lutte contre les insectes). Ils existent aussi, acaricides (contre les acariens), rodenticides (contre les rongeurs), nématicides (contre les nématodes), molluscicides (contre les limaces, escargots...). Ces produits sont susceptibles de contaminer les eaux superficielles et souterraines (figure 87).

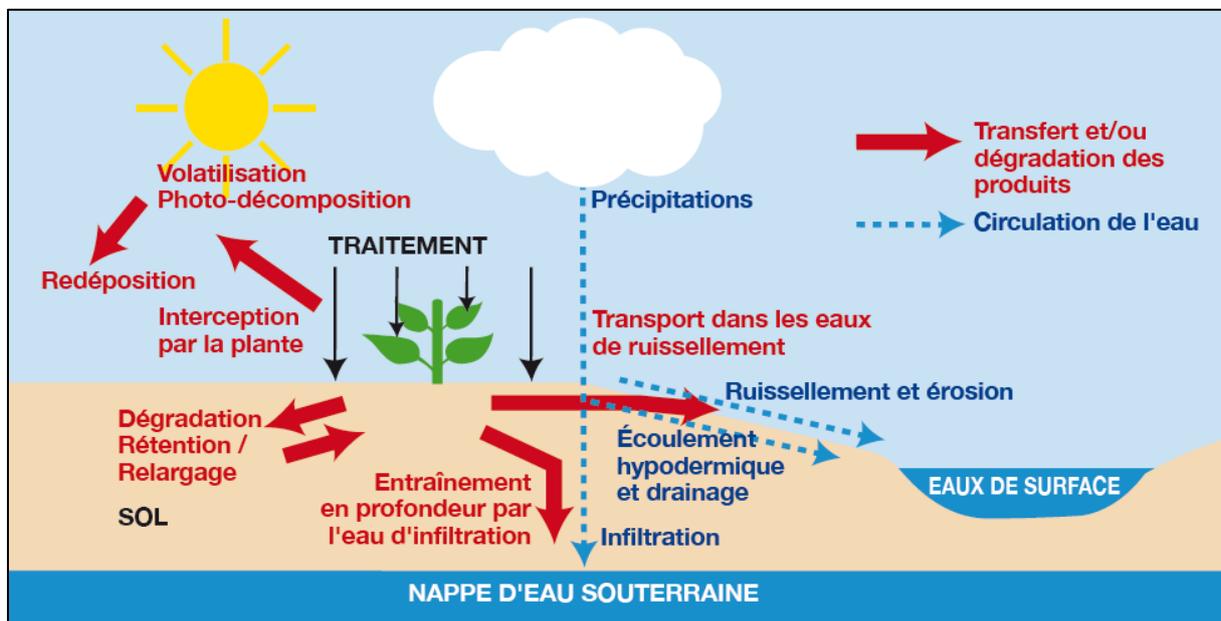


Figure 85 : Évolution des produits phytosanitaires après le traitement

Plusieurs études ont été réalisées à travers le monde (Québec, Isabelle Giroux, 2003 ; France, Vincent Garaud, 2009 ; Algérie, Kheddoum Benadjal Nadia, 2012) pour avoir l'impact des produits phytosanitaires sur les eaux souterraines, ont montrés l'existence des résidus des pesticides dans la moyenne de 30 à 40 % des puits échantillonnés.

Dans ce contexte plusieurs alternatif ont été proposé pour résoudre ce problème :

➤ La prévention des pollutions d'origine agricole peut passer par une diminution des doses d'intrants appliquées à l'hectare en modifiant la gestion de l'assolement. Par exemple,

l'allongement des rotations est possible en alternant plus de cultures et permet de limiter l'utilisation de pesticides. Entre deux cultures, la couverture des sols en période critique par des cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) peut permettre de limiter les transferts de nitrates vers les nappes.

➤ La limitation de la fréquence d'utilisation d'herbicides est aussi envisageable en utilisant des techniques alternatives (binage, désherbage, faux semis).



Figure 86 : CIPAN et désherbage

➤ Le boisement des terrains aux abords de captages est reconnu aujourd'hui comme l'une des pratiques les plus efficaces pour la protection et l'amélioration de la qualité de la ressource en eau. Il présente de nombreux avantages :

- les sols ne reçoivent plus de produits phytosanitaires ni de fertilisants comme quand ils sont soumis aux pratiques agricoles courantes. La teneur en azote des sols forestiers est bien moindre que celle des sols cultivés ;
- le couvert forestier intercepte les précipitations, diminue le ruissellement, réduit l'érosion des sols et favorise l'infiltration profonde des eaux ;
- le boisement constitue un écosystème stable avec une grande diversité faunistique et floristique ;
- à moyen terme, le coût d'entretien d'un boisement est bien moindre que celui d'un terrain agricole laissé en friche (fauchage annuel des chardons, rumex, orties, lande...). À long terme, les bois peuvent être une source de revenus (bois d'industrie, de charpente, bois d'œuvre, bois de chauffage).

Actuellement, les opérations de boisement sont réalisées soit sur le PPI, soit sur les secteurs identifiés comme sensibles au sein du PPR. Pour lutter contre les pollutions diffuses, il faut maintenant envisager les opérations de boisement à l'échelle de l'aire d'alimentation du captage.



Figure 87 : Boisement des périmètres rapprochés

L'agriculture est considérée comme la seule source de revenu financier pour la majorité de la population de la région de Ben Azzouz d'une manière générale et Boumaiza spécialement.

Malheureusement, l'application de cette approche pour la région d'étude est irréalisable.

➤ Enherbement, ou l'exploitant agricole peut envisager de laisser une petite partie de sa sole en herbe, là où les pollutions diffuses sont les plus susceptibles d'intervenir.

Cette mise en herbe s'applique parfois à une grande partie de l'aire d'alimentation du captage lorsque celle-ci est de petite taille. Lorsqu'elle est de grande taille, ce sont les secteurs les plus vulnérables qui sont mis en herbe. L'enherbement permet de réduire voire d'exclure les sources de pollutions diffuses à partir de ces surfaces.

5. Conclusion

La plaine alluviale de Boumaiza connaît ces derniers temps une augmentation remarquable de l'activité agricole et industrielle, ce qui a stimulé l'idée d'élaboration des périmètres de protection des captages dans le but de préserver la seule ressource hydrique (nappe des graviers) qui alimente la région, contre les risques de pollution chronique, diffuse ou accidentelle.

Les trois périmètres de protection reconnue à travers le monde, ont été déterminés théoriquement :

➤ Le Périmètre de Protection Immédiate (*PPI*) est défini par le législateur Algérien comme étant de 30 m autour du captage.

➤ Le Périmètre de Protection Rapprochée (*PPR*) : est déterminé par deux méthodes (Cylindre et Wyssling). Il varie de 100 m à 277 m.

➤ Le Périmètre de Protection Eloignée (*PPE*) est déterminé par la méthode de cartographie hydrogéologique. L'application de cette méthode nous a donné deux cartes des BAC dans la plaine alluviale de Boumaiza, pour deux périodes de mesure (haute et basse eaux).

La projection en surface de ces périmètres, ne prend pas en considération les différentes structures que ce soit immeuble, agglomération, usine, route, chemin de fer, parcelle agricole...etc.

De ce fait, la projection de PPR (résultats obtenus par la méthode de Wyssling) sur un plan cadastral a mis en évidence sept secteurs qui doivent être protégés, dont trois secteurs sont divisés en deux (un secteur traversé par un chemin de fer et la route nationale N°44, et les deux autres secteurs sont traversés par l'oued Kébir ouest).

Une étude sur le risque de pollution dans ces secteurs a montré l'existence de deux types de pollution. Une pollution ponctuelle représentée par les fosses septiques et le liquide qui s'écoule de la tomate pourrie durant la période de livraison de la tomate à l'usine de Amor Benamor, et pollution diffuse présentée essentiellement par l'utilisation intense des engrais ainsi des produits phytosanitaires vu la vocation agricole de la région.

Dans ce contexte, plusieurs solutions ont été proposées :

- l'installation d'un réseau d'assainissement pour les agglomérations éparses ;
- L'augmentation de capacité de l'usine pour réduire le temps d'attente de la tomate devant l'usine, et par conséquent réduction de liquide de la tomate pourrie ;

- La sensibilisation des agriculteurs pour l'utilisation des différentes variétés de tomate, où le temps de récolte est différent ;
- Utilisation du système d'irrigation goutte à goutte pour réduire le débit d'exploitation et par conséquent une réduction de PPR ce qui nous permet de les bien contrôler ;
- Remplacement des produits phytosanitaires par des méthodes d'agriculture développées tel que cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN), la limitation de la fréquence d'utilisation d'herbicides par le binage, le boisement et l'enherbement.

Si on arrive à élaborer ces trois périmètres de protection (PPI, PPR, PPE) réellement sur terrain, et on prend en charge tout les solutions proposés, en collaboration entre les collectivités et les autorités locale de la commune de ben Azzouz qui doivent aider et accompagner les agriculteurs que se soit sur le plan financier, machinisme agricole, et même pour la formation et la sensibilisation, on s'assure la préservation de notre nappe souterraine de toute type de pollution, et on aura une eau de très bon qualité à long terme.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Conclusion générale

L'étude réalisée s'intéresse à l'élaboration des périmètres de protection des captages implantés dans la plaine alluviale de Boumaiza, considérée vulnérable, afin de protéger ces eaux souterraines contre les différents aspects de pollution existant dans la région et qui peuvent altérer la qualité de ce dernier.

La plaine de Boumaiza, située au Nord Est de l'Algérie, s'étend sur une superficie de près de 89 Km². Elle renferme une nappe alluviale considérée comme l'unique et principale réserve d'eau souterraine dans la région. Cette réserve joue un rôle capital pour le développement socio-économique et agricole de la région.

La particularité de la région de Boumaiza est la présence d'une puissante couverture de dépôts quaternaire de composition argilo sableuse dont l'épaisseur peut atteindre 60 à 70 m. Elle cache parfaitement les formations géologiques de la région à l'exception quelques épaissements qui s'y trouvent tels que les affleurements de marbre au niveau de Koudiet Sidi Ahmed el Maalag et un autre affleurement de schistes à amphiboles, le pendage des couches est généralement doux variable entre 30° et 40°.

Le climat de cette région est tempéré et caractérisé par un été (Juin, Juillet, Août) chaud et sec avec une température moyenne de 25,6 °C, et un hiver (Décembre, Janvier, Février) doux et humide avec une température moyenne de 12,6 °C. La pluviométrie moyenne est de l'ordre de 623 mm. La formule du bilan de Thornthwaite, montre que l'évapotranspiration réelle ETR représente 60 % à 70 % des précipitations, et environ de 30 % à 40% d'excédent qui se traduit plus tard en infiltration efficace.

L'étude hydrogéologique a montré que la plaine alluviale de Boumaiza caractérisée par des alluvions d'épaisseur maximale de 110 m répartie sur la totalité de la plaine, dont la nappe profonde est caractérisée par des dépôts de graviers. L'examen des cartes piézométriques, a montré que le sens de l'écoulement pour la période des hautes eaux (Avril 2017) mis en évidence deux directions ; dans la première les eaux dirigés du Nord Nord-Est, Sud Sud-Est, et Sud-Est pour l'alimentation du lac Fetzara et le deuxième est de direction Sud Sud-Est au niveau de l'oued kébir vers la partie extrême Nord-Ouest de la zone d'étude. La période des basses eaux (Janvier 2018) présente un seul sens d'écoulement vers la partie Sud-Est de la plaine de Boumaiza et par la suite l'alimentation du lac Fetzara.

L'étude des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe ont donnés des transmissivité variant entre 0.2 à $0.48 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement sont de l'ordre de 0.04 % (Khammar 1981).

La nappe alluviale de Boumaiza est caractérisée par une vulnérabilité modérée (GOD) à forte (DRASTIC) d'après les cartes d'estimation de la sensibilité de la nappe d'eau souterraine à la contamination, examiné par deux méthodes. Les valeurs de l'indice GOD, présentent deux classes de vulnérabilité, l'une est faible occupant la partie Nord-Ouest et la partie Sud et l'autre modérée occupant la majorité de la partie centrale de la plaine ($70,6 \text{ Km}^2$ soit 79,5 % de la superficie de la nappe étudiée). Les valeurs de l'indice DRASTIC montrent deux classes de vulnérabilité réparties sur la totalité de la plaine de Boumaiza. Une classe de forte vulnérabilité couvrant la majorité de la superficie de la plaine alluviale ($88,15 \text{ Km}^2$), soit 99,71 % de la superficie globale et une classe de vulnérabilité moyenne couvrant 0.65 Km^2 soit 0.29 % de la superficie totale de la zone d'étude.

De ce fait, et tenant compte l'intérêt de la nappe alluviale de Boumaiza au développement socio-économique de la région, il est devenu indispensable de préserver ces ressources en eau menacées par l'élaboration de périmètres de protection des ouvrages de captages implantés dans la région reconnue à travers le monde : le périmètre de protection immédiate (*PPI*), le périmètre de protection rapprochée (*PPR*), et le périmètre de protection éloignée (*PPE*).

➤ Le Périmètre de Protection Immédiate (*PPI*) est défini par le législateur Algérien comme étant de 30 m autour du captage.

➤ Le Périmètre de Protection Rapprochée (*PPR*) : est déterminé par deux méthodes (Cylindre et Wyssling). Il varie de 100 m à 277 m.

➤ Le Périmètre de Protection Eloignée (*PPE*) est déterminé par la méthode de cartographie hydrogéologique. L'application de cette méthode nous a donné deux cartes des BAC dans la plaine alluviale de Boumaiza, pour deux périodes de mesure (haute et basse eaux).

La projection de PPR (résultats obtenus par la méthode de Wyssling) sur un plan cadastral a mis en évidence sept secteurs qui doivent être protégés, dont trois secteurs sont divisés en deux (un secteur traversé par un chemin de fer et la route nationale N°44, et les deux autres secteurs sont traversés par l'oued Kébir ouest).

Une étude sur le risque de pollution dans ces secteurs a montré l'existence deux types de pollution. Une pollution ponctuelle représentée par les fosses septiques et le liquide qui

s'écoule de la tomate pourrie durant la période de livraison de la tomate à l'usine de Amor Benamor, et pollution diffuse présentée essentiellement par l'utilisation intense des engrais ainsi des produits phytosanitaires vu la vocation agricole de la région.

L'instauration réelle des périmètres de protection (PPI, PPR, PPE) sur terrain, avec la prise en charge des solutions proposées, assure la préservation de notre nappe souterraine de toute type de pollution, et garantie la livraison à la population ainsi que les différents usagers, une eau de très bon qualité à long terme.

Recommandations

❖ Afin d'éviter les conséquences néfastes des fosses septiques sur la nappe profonde, l'intervention des autorités locales pour l'enfouissement de ces fosses et l'installation d'un réseau d'assainissement pour cette agglomération est une obligation primordiale.

❖ Le problème persistant de liquide de la tomate pourrie qui s'écoule durant la période de livraison à l'usine Amor Benamor doit être traité par :

- ✓ une analyse chimique pour avoir le contenu de ce liquide.
- ✓ L'augmentation de la capacité de l'usine.
- ✓ L'utilisation des différentes variétés de tomate, où le temps de récolte est différent.

❖ Pour protéger la nappe d'eau souterraine de la pollution diffuse, représenté essentiellement par les nitrates proviennent des produits fertilisants tels que les engrais, et les produits phytosanitaires qui sont utilisés excessivement, dès la première pose des plantes, jusqu'à la phase finale de récolte vu la vocation agricole de la région de Boumaiza, une multitude d'acteurs au niveau local (collectivités, établissements publics, profession agricole, opérateurs fonciers...), doit être intervenir. Dans ce contexte, plusieurs solutions sont fortement recommandées :

- ✓ Changement du système d'irrigation, vers l'adaptation du système d'irrigation goutte à goutte vu sont effet positif sur le rendement d'une culture, et l'économie de l'eau, ce qu'il a un impact direct sur les dimensions des périmètres de protection (réduction des PDP, et par conséquence un bon contrôle de ces derniers).
- ✓ En raison de leur dangerosité prouvée par plusieurs auteurs, remplacement des produits phytosanitaires par des méthodes d'agricultures développées :
 - L'utilisation des cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN).

- L'utilisation des techniques de désherbage alternatives tel que le binage.
- Enherbement (laisser une petite partie de sa sole en herbe, là où les pollutions diffuses sont les plus susceptibles d'intervenir).
- Le boisement des terrains aux abords de captages.

BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographiques

- Ben-Daoud, M., 2014 :** Gestion Intégrée des Ressources en Eau à l'échelle de la ville de Meknès : Apport des Systèmes d'Information Géographique, thèse de doctorat en science, Université moulay ismail, Maroc, 172p.
- Ben-Daoud, M., Mouhaddach, O., Essahlaoui A., Vanclooster M., Kestemont, M., El Jaafari S., 2012 :** Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution à l'aide des systèmes d'information géographique. *Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research*, 8 3(2), 2012, 7-13, 8p.
- Bourbia H., 2011 :** Faisabilité de l'implantation de bassins d'alimentation d'un aquifère (Cas du massif dunaire de Bouteldja, Extrême Nord-Est algérien). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba, 142p.
- Bussard T., 2005 :** Méthodologie de dimensionnement des zones de protection des captages d'eaux souterraines contre les polluants chimiques persistants, thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 162 p.
- Charikh, M., 2014:** Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu aride: application à la cuvette de Ouargla, mémoire de magistère en géologie, université kasdi merbah Ouargla, Algérie, 87p.
- Chigot D., 1993 :** Etude hydrogéologique du projet d'exploitation des granulats à COUARGES (18). Rapport R 36558 CEN 4S/93, BRGM centre.
- Claudine B. et Xavier J., 2007 :** Exemple d'un Bassin d'Alimentation de Captage prioritaire, le BAC d'Ecuvilly. Agence de l'Eau Seine-Normandie,
- Décret exécutif n° 07-399 du 14 Dhou El Hidja 1428** correspondant au 23 décembre 2007 relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eau.
- Desrosiers R., 2003 :** Pesticides dans les nappes d'eau au Québec et solutions, Ministère de l'Environnement du Québec, service des pesticides, 5 p.
- Drias T., Toubal A.C., 2015 :** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Tébessa-morsott (Bassin versant de l'oued ksob) extrême est Algérien. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°22, June 2015, pp. 35-48.
- Drias T., Toubal A.C., 2015:** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de tebessa-morsott (bassin versant de l'oued ksob) extrême est Algérien. *Larhyss Journal*, 22 (2015), 35-48, 14p.

- Durand F., Petit V., 1997 :** Guide d'aménagement des captages à l'alimentation en eau potable et des périmètres de protection immédiate. Rapport BRGM R39473, 38p.
- Eco-phyto 2018 :** Guide de bonnes pratiques phytosanitaires, Entretien des Espaces Verts & Voiries. Ministère de l'agriculture de l'alimentation de la pêche de la ruralité et de l'aménagement du territoire française. 44p.
- Folkert B., Jeremy D., Guy L. H., 2014:** Bonnes pratiques agricoles pour réduire la pollution des eaux par les produits phytosanitaires par ruissellement et érosion. Project TOPPS (Train Operators to Promote Practices and Sustainability). 45p.
- ANRH Alger, 2012 :** Etude de délimitation du périmètre de protection du champ de captage de BARAKI, Alger. G environnement, bureau d'étude Geomens, diagnostique site, sol et eau. 112p.
- Guechi, S., 2004 :** Impact de la pollution agricole et industrielle sur la nappe aquifère de la région de Boumaiza, Ben Azzouz, Skikda, mémoire de magistère en hydrochimie, université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 85p.
- Guilbaud A., Ricaud A. et Mondain Ph., 2009 :** Délimitation des Aires d'Alimentation des Captages prioritaires du bassin Adour Garonne. BRGM/RP-57299-FR – Rapport final.34p.
- Giroux I., 2003 :** Contamination de l'eau souterraine par les pesticides et les nitrates dans les régions en culture de pommes de terre, Ministère de l'Environnement Gouvernement du Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, 34 p.
- Guisado A., 2015 :** Réalisation d'une carte piézométrique et intérêts dans la délimitation des aires d'alimentation de captages. Mémoire de stage, direction régionale Bourgogne du BRGM, 48p.
- Hemidi, L., 2013 :** Vulnérabilité de la nappe alluviale de Guerrara à la pollution, mémoire de magistère en géologie, université kasdi merbah Ouargla, Algérie, 147p.
- Kachi S., 2007 :** Vulnérabilité de la nappe alluviale de Tébessa – Morsott face aux polluants. Thèse de doctorat en science, université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 174p.
- Kerjean M., 2006 :** Détermination des périmètres de protection du captage AEP (n° BSS 0334-6X-0020). Commune de Viviers-sur-Artaut (Aube), 56p.
- Khammar, C., 1981 :** Contribution à l'étude hydrogéologique de la vallée de l'oued kébir Ouest, wilaya de Skikda –Algérie, thèse de doctorat de spécialité géologie appliquée, hydrogéologie, Université scientifique et médicale de Grenoble, 109p.

- Kheddam B.N., 2012 :** Enquête sur la gestion des pesticides en Algérie et recherche d'une méthode de lutte alternative contre *Meloidogyne incognita* (Nematoda : Meloidogynidae). Ecole nationale supérieure agronomique El Harrach-Alger. 81p.
- khedidja A., H., 2016 :** Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère de Tadjnant –Chelghoum Laid et impact de la pollution des eaux de surface sur les eaux souterraines, thèse de doctorat en science, université de Batna 2, Algérie, 192p.
- Lathamani R., Janardhana M.R., Mahalingam B., Suresha S., 2015:** Evaluation of Aquifer Vulnerability Using Drastic Model And GIS: A Case Study Of Mysore City, Karnataka, India. International conference on water resources, coastal and ocean engineering (ICWRCOE 2015).
- Lathamani R., Janardhana M.R., Mahalingam B., Suresha S., 2015:** Evaluation of aquifer vulnerability using DRASTIC model and GIS: a case study of Mysore city, Karnataka, India. *ICWRCOE 2015*, 8p.
- Latifi S., Chaab S., 2017:** Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien. *Rev. Sci. Technol., Synthèse 34: 48 -62 (2017).15p.*
- Lasm T., Youan T. M., Baka D., De Lasme O. Z., 2016 :** cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères du socle précambrien : cas de la région d'Oumé (centre-ouest de la côte d'ivoire). *European Scientific Journal July 2016 edition vol.12, No.20 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.*
- Madi M., 2017 :** Modélisation du système aquifère et périmètre de protection du captage d'eau potable dans le Sahara septentrional (Cas de la région d'In Salah). Thèse de doctorat, Univer. Kasdi Merbah Ouargla, 152p.
- Merghid M., Debbache M., Foughali I., 2017:** Impacts des pesticides utilisés dans la plasticulture sur la santé humaine En Algérie, étude de cas la wilaya de Constantine. Université des Frères Mentouri Constantine, Algérie. 114p.
- Nassah H., Omdi F., 2011 :** Les périmètres de protection des champs de captage des eaux souterraines, Cas du champ captant du N'Fis (Maroc). Mémoire de fin d'études licence ès sciences et techniques, eau et environnement. Université Kadi Ayyad, Marrakech, Maroc. 51p.

- Parizot M., Laporte P., Joseph B., 2009 :** Etude préalable à la définition des périmètres de protection du captage AEP de Couachi, Commune de Mana. Rapport BRGM 57524, 86p.
- Seghir K., 2008 :** Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien). Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie. 151p.
- Siauve S., Amorsi N., 2015 :** Protection des aires d'alimentation des captages en eau potable.
- Sinan M., Bouibrine N., 2007 :** Utilisation des SIG pour la comparaison des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des nappes à la pollution. Application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc). Ecole Hassania des Travaux Publics, Maroc. Atelier international sur l'utilisation des techniques spatiales pour le développement durable. (Rabat, 25-27 avril 2007).
- Sinan, M., Maslouhi, R., Razack, M., 2003 :** Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Application à la nappe du Haouz de Marrakech, Maroc. *2nd FIG Regional Conference*, Marrakech, Morocco, December 2-5, 15p.
- Valérie M., 2000 :** Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution: application aux aquifères granulaires du piémont Laurentien. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître ès sciences, Université du Québec INRS-Géo ressources. 291p.
- Vassolo S., 2014 :** Guide national de détermination des périmètres de protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine. Institut Fédéral des Géosciences et Ressources Naturelles (BGR) / GPES Gestion et Protection des Ressources en Eau Souterraine au Burundi. 62p.
- Vernoux J. F., Wuille umier A. et Dorfliger N. avec la collaboration de Martin A., 2007 :** Délimitation des bassins d'alimentations des captages et de leurs vulnérabilités vis-à-vis des pollutions diffuses (Rapport intermédiaire). BRGM/RP-55332-FR.293p.
- Vernoux J. F., Wuille Umier A., et Dorfliger N., 2007 :** Délimitation des bassins d'alimentations des captages et de leurs vulnérabilités vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport final, BRGM/RP-55874-FR, 72p.
- Verreault M., 2003 :** Étude méthodologique pour l'estimation de l'aire d'alimentation de captage d'eau souterraine en milieu complexe. Mémoire de fin d'étude, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, 131p.

- Villeneuve J.P., Banton O., Lafrance P., 1987 :** Développement d'un outil simple et adaptable pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les pesticides, rapport scientifique No.232, INRS-EAU.
- Vincent G., 2009 :** Impact des boisements de périmètres de protection de captage sur la qualité de l'eau potable. Mémoire de fin d'études. Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement, France. 140p.
- Zeghid K., 2013 :** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines karstiques. Cas du bassin versant du Meffrouche. Mémoire de magistère. Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie. 175p.
- Lasm T., Youan T. M., Baka D., De Lasme O. Z., 2016 :** cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères du socle précambrien : cas de la région d'Oumé (centre-ouest de la côte d'ivoire). *European Scientific Journal July 2016 edition vol.12, No.20 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.*

ANNEXES

Annexe 1 : Données climatiques

Précipitations mensuelles et annuelles à la station de Skikda

Année	Sep.	Oct.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Jun.	Jul.	Aout	Total
1980-1981	19	88	240	87	101	51	39	17	21	1	46	861
1981-1982	14	67	188	141	128	121	59	37	7	0,5	12	811,5
1882-1983	14,6	100	156	21	37	70	13	23	0,7	0,5	8	675,8
1983-1984	55	91	62	204	161	104	52	22	14	0	0,9	884,9
1984-1985	68	148	343	148	76	172	21	29	0	0	2	1034
1985-1986	42	22	50	162	82	88	55	12	18	13	3	613
1986-1987	24	86	157	140	246	89	36	82	4	11	1	1025
1987-1988	30	30	50	111	111	55	36	37	24	0	1	601
1988-1989	58	4	147	48	53	23	148	2	9	5	0	627
1989-1990	33	83	100	157	1	75	85	22	31	4	41	701
1990-1991	0	66	326	89	104	103	34	25	5	0	13	888
1991-1992	49	118	30	109	87	120	144	60	28	7	1	804
1992-1993	9	38	237	53	78	63	39	69	6	1	1	633
1993-1994	36	85	136	116	120	0	142	12	0	1	4	692
1994-1995	58	102	170	219	25	107	32,2	3	19	0	12,3	753,5
1995-1996	100	9	55,1	65	192	59,3	92	46,4	14	1	4	685,8
1996-1997	38	95	102	66	13,3	18	34,2	72	27	0	4	518,5
1997-1998	69	190	148,2	82	104,2	43	57,3	129,2	11	0	25	1032,9
1998-1999	25	26	86	116,7	106	72,4	32	15	4	1	8	690,1
1999-2000	29,5	25	238	61	20	21	16	119	43	0	5	683,6
2000-2001	18	52	102	150	87	11	48	28	0	0	5	537,7
2001-2002	65	2	95	47,5	121,6	21,4	59,1	10,1	1	22,1	30,6	578,4
2002-2003	35,9	85	215	276	114	35	99	14	2	0	0	1119,9
2003-2004	114	47	169	121	161	73	66	31	20,5	1	0	840,5
2004-2005	55,5	26,2	165,4	156	189	65,2	99	7	87	0	64	1162,3
2005-2006	34,4	25,5	181	128	58	41,1	15	8	9	1	3	594
2006-2007	29,2	65	229	23,3	56	141	62	24	33	2	6	694,6
2007-2008	50	74	144	32	24	32	146	60	4,3	1	0,3	663,6
2008-2009	81	67,1	119	251	110	90	107	59,8	0	2	8	978,9
2009-2010	203	83,3	137	133	54,8	85	28,5	78	28,6	4	5	959,2
2010-2011	21	164	79,3	57,4	169	75,8	48,4	39,3	8,8	7,9	0	835,2
2011-2012	49,07	69,18	149,41	87,98	96,16	67	80,64	37,33	11,95	3,01	8,8	816,75
2012 -2013	48,04	52,51	132,5	112,91	91,18	65,39	76,3	34,1	7,9	2,76	5,61	760,09
2013-2014	99	106,34	175,89	84	32,1	13,72	58,63	30,23	10,12	7	3,1	620,13
2014-2015	124	203,5	184,5	110,15	88,94	95	45,47	77,98	36,29	3,28	9	978,11

Précipitations mensuelles et annuelles à la station de Ain Charchar

Année	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fer.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Jul.	Aout.	Total
1980-1981	16,70	64,10	162,50	174,00	61,30	57,70	65,10	23,80	5,70	25,00	0,00	0,00	655,90
1981-1982	7,9	27,5	18,1	146,1	122,9	113,9	108,5	74	35,6	3,3	0	2	659,80
1982-1983	18,4	100	174,6	102,2	20,5	16,4	104,8	3,2	24	4,9	5	1,7	575,70
1983-1984	51,1	70,6	83,3	64,9	207,2	206,1	78,6	49,2	18,5	10,1	2,3	0	841,90
1984-1985	32,8	150,3	39	348,1	116,4	58	171,1	22,9	37,9	0	0	0	976,50
1985-1986	35,7	45,1	29,9	38	153	65,2	69,6	31,4	11,1	5,6	4,8	2,5	491,90
1986-1987	27,3	117	156,8	164,4	110,2	175,9	127	17,3	80,3	1,6	3,3	0	981,10
1987-1988	36	32,2	64,8	30,4	91,7	97,4	52,8	23,4	38,5	63,1	0	0	530,30
1988-1989	41,6	0	83	174,8	65,7	42,5	67,3	75,5	6,4	15,3	0	2,1	574,20
1989-1990	18,7	83,8	117,9	57,9	128,1	0,5	52,8	66,3	25,9	12,2	0	15,8	579,90
1990-1991	2	60,2	80,1	233,8	95,8	80,5	123,4	35,2	52	24,8	1	4,2	793,00
1991-1992	50,3	119,3	43,2	15,5	48,8	107,1	57,9	154,5	84,6	18,2	8	0	707,40
1992-1993	2,2	31,9	131,4	240,8	71,2	45,7	59	21,6	45,7	2,1	0	1,1	652,70
1993-1994	25,2	30,7	121	125,2	100,9	122,3	1,2	77,5	12,9	0	0	8,2	625,10
1994-1995	15,6	53,1	14,1	134,8	262,6	13,7	88,2	19,7	0	7,4	0	5	614,20
1995-1996	70,5	34,6	39,5	71	120,2	162,9	41,2	58,2	45,1	2,7	0	3,78	649,68
1996-1997	40,7	50,4	44,1	65,1	65,2	17,8	12,5	21,1	7,9	18,8	0	2,6	346,20
1997-1998	36,4	147,2	186	189,6	72,6	88,2	61,4	47	115,3	12,1	0	6,6	962,40
1998-1999	76	78	295,2	39	46,9	56,2	10,3	28	43,1	8,1	11,1	0	691,90
1999-2000	11,2	17,2	93,3	131,2	76	20,5	18,3	39,1	121,5	6,6	0	6,2	541,10
2000-2001	16,5	70	48,4	179,9	209,7	87,4	27,9	86,5	36,9	0	0	1,5	764,70
2001-2002	47,2	4,1	119,9	104,2	81,2	107,1	31	74,1	10,4	0	26	14,8	620,00
2002-2003	8,7	61,6	227,8	257,1	277,5	119	17,8	108,1	35,8	0	0	0	1113,40
2003-2004	74,6	57,2	32,3	287,3	177	11,6	143,2	217,1	104,5	60	0	0	1164,80
2004-2005	91	20,4	197,5	222,3	154,6	209,7	52,3	109	10	23,7	4,2	23,5	1118,20
2005-2006	39,4	18	68,2	151,2	100,3	109,1	87	10,5	11,8	0	5,6	9,1	610,20
2006-2007	35	51,2	33,6	107,5	21,3	87,1	311,1	160,4	39,1	30	0	18,2	894,50
2007-2008	30,1	215,5	207,2	305,5	60	60,5	219,8	7	99,7	8,8	7,5	8,1	1229,70
2008-2009	127,1	30,1	129,5	105,2	133,5	213,1	157,8	85,2	50,2	0	0	30,7	1062,40
2009-2010	173	204,6	89,4	205,2	212,3	165,7	57,7	76,5	87	0	0	11	1282,40
2010-2011	71,2	273	113,3	189,9	149	138,5	108	81,1	52,5	69	2,5	1,5	1249,50
2011-2012	44,2	129,1	58,7	300,3	83,8	341,5	67	46,5	13,5	0		42,5	1127,10
2012-2013	54,8	115	77,5	101,1	251,8	280,2	107	63,5	29,6	23	10	36	1149,50
2013-2014	112	138,4	98,89	168	68,8	158,2	99,7	58,23	15	11,61	12,11	24,5	965,44
2014-2015	138,5	251,87	157	197,37	81,75	70,54	85	67,21	93,83	10	5,78	14	1172,85

Précipitations mensuelles et annuelles à la station de Azzaba

Année	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr	Mai.	Jui.	Jul.	Aout	Total
1980-1981	32,2	40,1	120,2	88,1	67,4	65,2	21,4	16,9	12,4	11,5	0,3	2,2	477,9
1981-1982	3,2	36,3	40,4	144,9	118,6	111,9	113,4	65,2	27,7	0	0,6	16,7	678,9
1982-1983	1,5	148,1	206,2	120,2	26,3	10,4	104,5	20,4	13,6	1,1	1,3	0	653,6
1983-1984	23,3	24,3	213,1	64,2	174,7	226,8	35,2	38,1	16	5,7	0	0,4	821,8
1984-1985	26,9	147,8	3,6	280,4	128,8	62,6	159,8	38,3	34,8	0	0	1,2	884,2
1985-1986	47,7	14,9	40	35	146,6	56,8	90,3	33,5	1,3	7,4	1,3	0,9	475,7
1986-1987	22,6	83,4	122,6	175,6	106,6	264,8	101,8	40,4	60,5	0	0	0	978,3
1987-1988	198	38,7	85,7	24,3	75,7	76,3	65	7,3	18,8	29,3	0	0	619,1
1988-1989	44,9	145	32,6	190,7	46,1	60,9	50	71,8	1,4	2,3	0	0	645,7
1989-1990	9,9	74,6	52,9	53,1	143,1	25	30,8	49,3	36,1	27,9	0	26,2	528,9
1990-1991	0	42,3	149,6	302,6	92,5	80,7	68,6	24,5	70	35	0	0	865,8
1991-1992	44,1	139,9	43,9	1,3	87,6	73,1	62,3	156,3	19,6	8,4	1,3	0,3	638,1
1992-1993	0	12,3	50,9	190,6	76,5	62,6	64,4	56,8	55,5	6,1	0	0	575,7
1993-1994	19,2	61,1	16,6	117,3	94	105,3	89	52,4	26,6	0	0	0	581,5
1994-1995	6,9	81,1	26,8	136,2	269,4	7,9	94,8	7,2	20	2,3	0	0,4	653
1995-1996	39,4	2,1	78,8	78,1	70,7	226,1	57,3	31,4	11,5	0	0	1,7	597,1
1996-1997	37,3	6,1	13,6	96,4	64,9	25,7	18,7	19,8	0,3	52	0		334,8
1997-1998	15,7	95,3	200,1	149,2	68,3	119,7	94	57,2	100,4	5,3	0	2,1	907,3
1998-1999	69,1	64,3	343,7	100,4	149,9	119,8	74,7	51,1	29,1	13,3	0	6,2	1021,6
1999-2000	2,7	22,5	79,3	124,5	68,3	16,9	8,4	6	86,9	3,1	0	2,3	420,9
2000-2001	0	47,6	27,3	84,6	170,2	101,4	17,4	44,6	11,9	0	0	0	505
2001-2002	41,4	9,8	48,5	45,3	32,5	80,9	6,3	28,2	1,6	0	2,9	16,9	314,3
2002-2003	7	26,4	197,8	168,8	190,5	131,7	26,3	76,8	10,6	0	0	0	835,9
2003-2004	65,2	21	27,4	170,8	111,2	12,9	39,9	57	35,3	40,5	0	6,8	588
2004-2005	51,4	11,4	231,4	234,1	98,3	144,1	58,9	84,3	16	1,3	0	5,9	937,1
2005-2006	2,7	6	19,8	167,5	166,1	100,6	27,5	5,9	8,1	0	0	5,8	510
2006-2007	11,1	74,2	22	157,5	168	38	199,4	20,7	2,7	3,5	1,7	0	698,8
2007-2008	4,4	58	85,9	150,5	15,9	23	75,3	52,3	37,1	0	0	2,1	504,5
2008-2009	64,7	8,3	120,8	82	44,7	55,4	65,7	42,3	12,6	1,3	0	3,4	501,2
2009-2010	146	55,4	72,6	112,2	126,6	40,8	28,9	20,5	15,7	4,6	0	0	623,3
2010-2011	102	135,5	159,3	58,1	52,8	173,7	94,3	27,5	22,9	11,7	4,3	0	842,1
2011-2012	70,1	154,36	112,92	160,41	66,8	50,13	80	95,39	69,3	30,22	1	0	890,63
2012 -2013	145,12	252,39	151,07	132,5	99,91	50,01	35,81	14,3	43,48	20,37	1	0	945,96
2013-2014	157	200,28	98,5	101,8	73,12	47,8	38	74,56	54,79	21,22	8,9	11	886,97
2014-2015	136	223,75	285,48	154,7	120,31	89,08	35	80,8	60,81	15,77	0	0	1201,7

Annexe 2 : paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe des graviers de Boumaiza

Paramètres	Ca	Mg	Na + K	HCO₃	Cl	SO₄	NO₃	C.E (µs/cm)	PH
Janvier 2002									
Minimum	0,9	0,92	1,09	0,45	0,98	-	-	300	6,98
Moyenne	6,34	5,46	10,76	1,27	12,67	-	-	1479	7,72
Maximum	15,4	16,33	51,45	3,70	45,07	-	-	3700	8,8
CV (%)	73,97	65,2	88,5	59	85,8			57,8	6,6
σ	4,69	3,56	9,52	0,75	10,87	-	-	855	0,51
Mai 2002									
Minimum	2,2	1,8	3,87	0,06	4,2	0,0002	0,02	1050	7,0
Moyenne	7,75	4,11	9,92	6,04	12,06	0,15	0,60	1775	7,43
Maximum	15	12,2	23,24	8,64	36,4	0,44	1,50	4460	8,02
CV (%)	31,22	58,15	50,3	38,9	66,25	73,3	86,7	47,55	4,44
σ	2,42	2,39	4,99	2,35	7,99	0,11	0,52	844,1	0,33

Annexe 3 : Coupe stratigraphique des forages implanté dans la plaine de Boumaiza

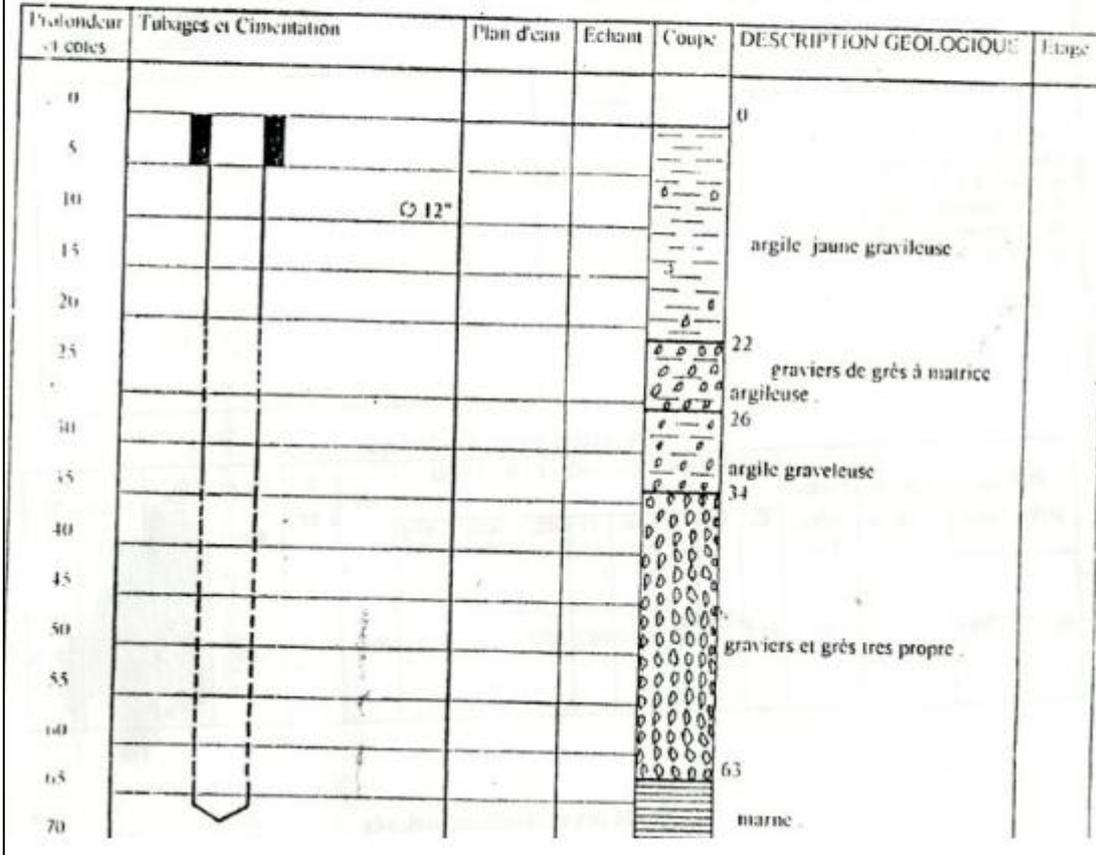
Commune	Nom du forage	Orientation	Année Programmée	Année Réalisée	E.T.P de l'Etat	X	Y	Profondeur	Coupe géologique	Equipements	Dip du forage	NS (m)	ND (m)	Q (lit/s)	
BEN HAZOUZ	Ain Nechma N°2	Ain Nechma	1986	1987	ENFA	909.300	403.500	60	0-4m : Limons 4-30m : Sables limoneux 30-48m : Arg. de grise et jaune à la base 48-55m : Sables et graviers 55-60m : Marnes.	0-48m : TP 48-55m : TC 55-60m : TP	32°	0.25	20.7	6	
	Ain Nechma N°3	Ain Nechma (pas trace explicite)	1987	1987	ENFA	909.450	402.800	80	0-1m : Terre 1-5m : Sables 5-30m : Graviers arg. bleus 30-35m : Arg. les Sables 35-45m : Arg. les Sables 45-55m : Graviers 55-65m : Arg. les grise 65-75m : Sables Jaunes 75-80m : Marnes	0-45m : TP 45-55m : TC 55-65m : TP 65-75m : TC 75-80m : TP	33° 3/4	3.5	35.2	12	
	Conservatoire E3 et 4	Ain Nechma	1989	1989		905.810	402.350	125	0-30m : Limons arg. bleus 30-31m : Arg. les rouge grise 31-60m : Sables, grises, galets 60-70m : Arg. les rouge 70-75m : Sables grossiers 75-80m : Arg. les, gris 80-116m : Conglomérats 116-125m : Calcaires compactes et marnes chauxes	0-32m : TP 32-60m : TC 60-70m : TP 70-75m : TC 75-80m : TP 80-85m : TC 85-86m : TP 86-116m : TC 116-120m : TP	32°		34	21	40
	M.E.V Hadja Soud N°1	Boumaiza	1990	1990	COUGER	914.120	396.500	73	0-30m : Arg. les Jaune 30-36m : Sables arg. bleus 36-46m : Graviers 46-68m : Sables, graviers 68-73m : Marnes	0-30m : TP 30-68m : TC 68-73m : TP	32°	2.2	12.1	25	
	M.E.V Hadja Soud N°2	Hadja Soud	1991	1991	COUGER	915.150	396.550	84	0-21m : Arg. les 21-31m : Sables grossiers 31-41m : Arg. les 41-58m : Sables 58-72m : Sables et Graviers	0-21m : TP 21-31m : TC 31-41m : TP 41-79m : TC 79-80m : TP	32°	7.5	11.8	35	

SONDAGE BOU MAIZA 1
 Carte AZZABA au 1/50 000
 Date des travaux : septembre - octobre 1990
 Echelle de la coupe : 1/500

N°

Long
 Latit

X : 912 250 Z : 24.00 m
 Y : 396 100



SONDAGE BOU MAIZA 2

Carte : AZZABA au 1/50 000

Date des travaux : Octobre Janvier 1991

Echelle de la coupe : 1/500

N°

Long : X : 912 625 Z : 24.00 m
 Latit : Y : 395 650

Profondeur et cotes	Tubages et Cimentation	Plan d'eau	Echant	Coupe	DESCRIPTION GEOLOGIQUE	Etage
0					0	
5	█ █			▨ ▨	argile brun-jaune	
10		○ 12"		● ● ● ●	6 gros sable gris	
15				○ ○ ○ ○	12 graviers	
20				▨ ▨ ▨ ▨	18 argile jaune	
25				○ ○ ○ ○	19 graviers	
30				▨ ▨ ▨ ▨	26 argile jaune grise.	
35				▨ ▨ ▨ ▨		
40				▨ ▨ ▨ ▨		
45				○ ○ ○ ○	38 graviers et galets de grès	
50				○ ○ ○ ○		
55				○ ○ ○ ○		
60				○ ○ ○ ○		
65				○ ○ ○ ○	63 galets et rognons de calcaire	
70				○ ○ ○ ○	66 galets à matrice argileuse sableuse	
75				▨ ▨ ▨ ▨	71 marne	
80				▨ ▨ ▨ ▨	80	

mus. à jour par

SONDAGE BOU MAIZA 3

N°

Carte AZZABA au 1/50 000

Date des travaux : Novembre Janvier

Long : X : 912 800 Z : 22.00 m

Echelle de la coupe : 1/500

Latit : Y : 395 350

Profondeur et cotes	Tubages et Cimentation	Plan d'eau	Echant	Coupe	DESCRIPTION GEOLOGIQUE	Etage
0					0	
5					argile jaune	
10						
15						
20					16 17 gravier à matrice argileuse	
25						
30						
35					gravier de grès	
40						
45						
50						
55						
60					58 60 gravier à matrice légèrement argileuse	
65					marne	
70						

ONDAGE BOU MAIZA 5
 re AZZABA au 1/50 000
 te des travaux : Aout / septembre
 elle de la coupe : 1/ 500

N°

Long : X : 913 300 Z : 21,76
 Latit : Y : 395 400

Profondeur et cotes	Tubages et Cimentation	Plan d'eau	Echant	Coupe	DESCRIPTION GEOLOGIQUE	Etage
0					0	
5					argile jaune	
10	ϕ				graviers à matrice argileuse	
15	14 12"				graviers de grès	
20						
25						
30						
35						
40						
45						
50						
55	54				gres à matrice argileuse	
60					marne	
65						
70						

SONDAGE BOU MAIZA 6

N°

1:1 AZZABA au 1/50 000

des travaux : septembre octobre 1991

échelle de la coupe : 1/500

Long :

X : 914 650 Z : 23,96

Latit :

Y : 395 300

Profondeur et cotes	Tubages et Cimentation	Plan d'eau	Echant	Coupe	DESCRIPTION GEOLOGIQUE	Étage
0					0	
0					argile brune jaune concretion de calcaire	
5	φ					
10	12"					
15						
20	16				graviers de grès	
25						
30						
35						
40						
45						
50						
55	52					
60	60				marne	
65						

ONDAGE BÔU MAIZA 8

N°

le AZZABA au 1/50 000
des travaux : Mars 92
elle de la coupe : 1/ 500

Long : X : 913 250 Z : 21,79
Latit : Y : 395 000

Profondeur et cotes	Tubages et Cimentation	Plan d'eau	Echant	Coupe	DESCRIPTION GEOLOGIQUE	Etage
0					0	
5					argile jaune	
10						
15					15	
20					galets de grès avec le passage de sable entr 28 et 29 m.	
25						
27						
29					29	
35					galets , graviers de grès	
40						
45						
50						
55						
60					59 galets avec marne	
63					63	
65					Marne grise verte	
69					69	
70						