

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTEUR EN SCIENCES**

En : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

Par : BEMMOUSSAT ABDELKADER

Sujet

**MÉTHODOLOGIE DE PROTECTION DES RESSOURCES EN EAU
SOUTERRAINES EN RÉGION À CLIMAT SEMI-ARIDE.**

Soutenue publiquement, le 03/09/2020 , devant le jury composé de :

M^r A.CHIBOUB FELLAH

M^{me} BENSAOULA FOUZIA

M^rADJIM MOHAMED

M^r TIDJANI ABDELLATIF EL-BARI

M^r BEKKOUSSA BELKACEM SAMIR

Professeur Univ. Tlemcen

Professeur Univ. Tlemcen

Professeur Univ. Tlemcen

Professeur Univ. Oran

Professeur Univ. Mascara

Président

Directeur de thèse

Co-Directeur de thèse

Examineur 1

Examineur 2

RÉSUMÉ

La spécificité du climat semi-aride de la région d'Hennaya et l'activité anthropique ont contribué à augmenter le potentiel de contamination des eaux souterraines. La ressource en eau souterraine doit être mieux gérée pour protéger sa qualité. Dans ce cas, il est important d'avoir une bonne connaissance du potentiel souterrain. En Algérie, les données de la caractérisation de ce potentiel sont insuffisantes. Ces données sont importantes dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité, de la pollution et la réalisation cartographique des périmètres de protection. La solution est d'utiliser des méthodes fiables nécessitant peu de données pour l'adéquation avec la réalité du terrain. Dans ce travail, nous avons considéré les huit méthodes suivantes: DRASTIC, SINTACS, AVI, NV, GOD, DOPE, SINAN et MINNESOTA, pour réaliser les cartes de vulnérabilité de l'aquifère d'Hennaya. Grâce à un classement par coefficient KAPPA, nous avons pu démontrer que la méthode Minnesota est la plus appropriée. Cette méthode se base uniquement sur un seul paramètre qui est la zone vadose. Elle représente à notre avis une solution pour palier au manque de données des aquifères régionaux. En ce qui concerne le dimensionnement des périmètres de protection, trois méthodes ont été utilisées. La méthode Wyssling, qui exige beaucoup de données, la méthode de l'équation du cylindre, qui exige un peu moins, enfin la méthode parabolique qui exige uniquement des données du débit de captage. Après comparaison, nous avons constaté qu'il n'y a pas une grande différence de l'empreinte du terrain de protection entre les trois méthodes. En plus, la méthode parabolique est la mieux adaptée aux zones qui disposent de peu d'études hydrogéologiques. L'intensification agricole et l'irrigation avec les eaux usées sont connues pour être des sources de pollution des aquifères. Mais l'impact de l'irrigation avec les eaux usées épurées sur la qualité des eaux souterraines est inconnu. La caractérisation qualitative des eaux usées épurées a montré que le seul danger est la concentration élevée des paramètres microbiologiques de ces eaux. Le calcul du pouvoir purificateur indique une purification complète car il varie de 2,1 à 12,7, ce qui est confirmé par la bonne qualité microbiologique des eaux souterraines. Cependant, nous prouvons que la dégradation s'est faite au niveau de la zone vadose, car les microorganismes pathogènes ont été complètement éliminés lors du passage des eaux usées épurées de la surface à la nappe phréatique et ceci grâce au rôle de filtre naturel que joue la zone non saturée du périmètre d'Hennaya.

Mots clés : l'aquifère d'Hennaya, vulnérabilité, MINNESOTA, pouvoir purificateur.

Table des Matières

Liste des Figures	4
Liste des Tableaux	6
1 Principes de la protection des eaux souterraines	11
1.1 Réglementation	11
1.2 Protection des aquifères	17
1.2.1 La vulnérabilité intrinsèque	18
1.2.2 Vulnérabilité spécifique	19
1.2.3 Notion du risque	19
1.2.4 Méthode d'évaluation de la vulnérabilité	20
1.3 Protection des captages d'eaux souterraines	21
1.4 Suivi qualitatif des eaux souterraines et des eaux de surface en interaction avec les nappes	24
1.5 Conclusion	25
2 Présentation de la zone d'étude	26
2.1 Généralités	26
2.2 Climat	28
2.2.1 Précipitations	29
2.2.2 Température	33
2.2.3 Évapotranspiration potentielle, (ETP)	37
2.2.4 Conclusion	38
2.3 Lithologie des formations géologiques	38
2.4 Piézométrie	38
2.5 Conclusion	40
3 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque	41
3.1 Description des méthodes	41
3.1.1 Méthode DRASTIC	41
3.1.2 Méthode de l'indice de vulnérabilité aux nitrates NV	44
3.1.3 Méthode SINTACS	45

3.1.4	Méthode DOPES	48
3.1.5	Méthode GOD	50
3.1.6	Méthode AVI	52
3.1.7	Méthode DRASTIC modifiée (SINAN)	53
3.1.8	Méthode Minnesota	55
3.2	Conclusion	57
4	Paramètres déterminants la vulnérabilité des eaux souterraines	58
4.1	Cartographie de l'occupation du sol de la plaine d'Henaya	58
4.2	Carte des pentes	61
4.3	Profondeur de la nappe d'Henaya	62
4.4	Formations aquifères et zone vadose	65
4.4.1	Formation aquifères	65
4.4.2	Zone vadose	66
4.5	Recharge nette	67
4.5.1	Estimation de la recharge nette due aux précipitations	68
4.5.2	Recharge nette due à l'irrigation	69
4.6	Pluies efficaces	72
4.7	Conductivité Hydraulique des formations aquifères	74
4.8	Pédologie	75
4.9	Densité du réseau hydrographique	75
4.10	Vitesse de propagation de la nappe	78
4.11	Conductivité de l'eau	81
4.12	Productivité de la nappe	82
4.13	Conclusion	83
5	Application des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité	84
5.1	Présentation des résultats d'évaluation de la vulnérabilité	84
5.2	Validation des cartes d'évaluation de la vulnérabilité	87
5.3	La cartographie des aléas et du risque	93
5.3.1	Cartographie des aléas	93
5.3.2	Cartographie du risque	99
5.4	Discussion des résultats obtenus	102
6	Périmètres de protection et réglementation	103
6.1	Délimitation des périmètres de protection	103
6.1.1	Protection immédiate	103
6.1.2	Délimitation des PPR et PPE	106
6.1.3	Paramètres géométriques de comparaison des PDP	115
6.2	Réglementation	117
6.2.1	Enrichissement de la législation existante	118
6.2.2	Application de la législation	119

6.3	Conclusion	119
7	Irrigation par les eaux usées épurées et protection des eaux souterraines	120
7.1	Généralités	120
7.2	Matériels et méthodes	122
7.2.1	Situation du périmètre irriguée	122
7.2.2	Évaluation du taux d'infiltration des eaux usées épurées dans l'aquifère	123
7.2.3	Qualité des eaux usées épurées et des eaux souterraines	126
7.2.4	Caractérisation de la zone non saturée	126
7.3	Résultats et discussions	128
7.3.1	Estimation de la recharge par les eaux usées épurées	128
7.3.2	Qualité des eaux usées épurées	129
7.3.3	Qualités microbiologiques des eaux souterraines	133
7.3.4	Évaluation de l'indice de purification de la zone vadose de l'aquifère	135
7.4	Conclusion	137
	Bibliographie	141

Liste des Figures

1.1	Schéma d'aménagement d'un puits de surface.	16
1.2	Schéma d'obturation d'un puits de surface	17
1.3	Schéma de fonctionnement d'un hydro-système.	18
1.4	Les périmètres de protection.	23
1.5	Délimitation d'un BAC	24
2.1	Localisation de la zone d'étude.	27
2.2	Concentration des nitrates analysés en 2011.	28
2.3	Précipitations moyennes annuelles des stations pluviométriques	29
2.4	Carte d'isohyètes pluviométriques annuelles.	31
2.5	Précipitations moyennes mensuelles dans la plaine d'Hennaya.	32
2.6	Précipitations saisonnières des pluies dans la plaine d'Hennaya.	33
2.7	Températures interannuelles moyennes de la station de Zenata.	34
2.8	Température moyenne mensuelle	35
2.9	Diagramme ombrothermique.	36
2.10	Évaluation de l'évapotranspiration potentielle	37
2.11	Coupe géologique Sud-nord de la zone d'étude.	38
2.12	Carte piézométrique (juin 2011)	39
3.1	Définition des paramètres DRASTIC.	42
4.1	Carte d'occupation du sol.	59
4.2	Carte des pentes.	62
4.3	Courbes de battement de la nappe d'Hennaya, (1968 et 2011).	63
4.4	Carte de la profondeur des eaux souterraines du niveau d'eau le plus élevé de l'année 2011.	64
4.5	Carte des formations aquifères	65
4.6	Carte de la zone vadose.	67
4.7	Carte de recharge nette due aux précipitations.	69
4.8	Carte de recharge nette due à l'irrigation.	71
4.9	Carte de recharge totale.	72
4.10	Carte des pluies efficaces.	73

4.11	Carte des perméabilités.	74
4.12	Carte des sols de la plaine d'Hennaya.	75
4.13	Carte DEM de la région d'Hennaya.	76
4.14	Carte du réseau hydrographique.	77
4.15	Carte du gradient hydraulique, (Juin2011).	79
4.16	Carte des vitesses effectives.	80
4.17	Carte de la conductivité de l'eau.	81
4.18	Carte de productivité de la nappe.	82
5.1	Carte des différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité avec % de surface.	85
5.2	Schéma des puits dans la plaine d'Hennaya.	88
5.3	Spatialisation des points choisis comme zones tests pour la validation.	89
5.4	Carte de vulnérabilité par la méthode Minnesota.	91
5.5	Carte d'aléas classés dues à l'occupation du sol.	98
5.6	Carte d'aléas dues à diverses sources de pollution.	99
5.7	Carte à risque due à l'occupation du sol.	100
5.8	Carte à risque due à diverses sources de pollution.	101
6.1	Schéma d'aménagement d'un ouvrage de captage de source	104
6.2	PPI d'une source en Allemagne	105
6.3	Exemple de protection au lieu de puisage avec une dalle en béton.	106
6.4	Schéma du principe Wyssling	108
6.5	Délimitation de PPR et PPE de la source d'Ain Wahab par la méthode Wyssling.	110
6.6	Délimitation de PPR et PPE par l'équation du cylindre pour une source	111
6.7	Délimitation de PPR et PPE par la méthode de l'équation du cylindre d'Ain Wahab	112
6.8	Méthode parabolique pour la délimitation des PPR	113
6.9	Méthode parabolique pour la délimitation des PPE	114
6.10	Délimitation de PPR et PPE d'Ain Wahab par la méthode parabolique.	115
6.11	Paramètres géométriques de comparaison	116
7.1	Localisation du périmètre irrigué.	123
7.2	Indice de la purification Md.	136

Liste des Tableaux

1.1	Exemple de procédures réglementant les PDP dans certains pays. . .	13
1.2	Structure du plan d'action adaptée dans les PDP.	14
1.3	Critères de vulnérabilité intrinsèque.	19
2.1	Caractéristiques des stations pluviométriques et météorologiques. . .	28
2.2	Précipitations moyennes arithmétiques et écart type.	30
2.3	Estimation de la lame d'eau moyenne précipitée.	32
2.4	Classification de l'indice de De Martonne	36
3.1	Cotes et poids attribués aux différentes classes de la méthode DRAS- TIC version standard.	43
3.2	Classification de l'indice DRASTIC	44
3.3	Cotes spécifiques aux catégories d'occupation du sol.	44
3.4	Classification de l'indice NV.	45
3.5	Poids attribués aux différents paramètres.	46
3.6	Cotes des différentes classes des paramètres SINTACS.	47
3.7	Classification de l'indice de vulnérabilité SINTACS.	48
3.8	Cotes et poids des classes pour les paramètres de la méthode DOPES.	49
3.9	Classification de vulnérabilité de la méthode DOPES.	50
3.10	Valeurs des cotes du paramètre type de nappe.	51
3.11	Valeurs du paramètre des formations de l'aquifère.	51
3.12	Valeurs du paramètre profondeur de la nappe.	51
3.13	Classification de l'indice GOD en fonction du degré de vulnérabilité.	52
3.14	Conductivité hydraulique (k) estimé.	53
3.15	Valeurs de la résistance hydraulique et classes de vulnérabilité. . . .	53
3.16	Cotes et poids des paramètres C, P et V.	54
3.17	Classification de l'indice SINAN.	55
3.18	Estimation de la vulnérabilité niveau 1.	55
3.19	Estimation de la vulnérabilité niveau 2.	56
3.20	Classification des matériaux à la surface de la nappe.	57
4.1	Précision de classification en fonction de l'indice KAPPA.	61

4.2	Matrice de confusion de la classification d'occupation du sol.	61
4.3	Pourcentage (P) du volume d'eau d'irrigation.	70
4.4	Porosité totale.	80
4.5	Relation entre minéralisation et conductivité.	82
5.1	Matrice de confusion entre la méthode GOD et DOPES avec Excel.	90
5.2	Matrice de test de corrélation entre les différentes méthodes utilisées.	90
5.3	Classement des méthodes pour le premier groupe.	90
5.4	Catégories d'aléas	93
5.5	Classes d'indice de l'aléa.	94
5.6	Évaluation du potentiel du danger associé à un évènement potentiel.	95
5.7	Définitions de la gravité des conséquences d'une activité ou d'un évènement	96
5.8	Catégories de probabilité applicables à l'évaluation des potentiels du danger associés aux événements potentiels.	97
5.9	Classification des types d'aléas.	97
5.10	Le degré et classe du risque et les classes de l'aléa.	100
6.1	Caractéristiques de la source d'Ain Wahab.	109
6.2	Valeurs correspondantes à la zone d'appel.	109
6.3	Isochrones de la source d'Ain Wahab.	110
6.4	Isochrones des sources Ain Wahab l'équation du cylindre.	112
6.5	Distance des PPR et PPE pour Ain Wahab.	114
6.6	Calcul des rapports de comparaison en prenant comme référence la méthode du cylindre.	117
6.7	Calcul des rapports de comparaison en prenant comme référence la méthode de Wyssling.	117
7.1	Informations sur les sources des données.	126
7.2	Indice de purification pour les différents matériaux.	127
7.3	Calcul du bilan hydrique dans le périmètre irrigué (mm).	128
7.4	Valeurs moyennes et statistiques descriptives des paramètres chimiques des eaux usées traitées.	130
7.5	Concentrations de métaux lourds et d'éléments toxiques détectés (en mg/dm ³) dans les EUE de la STEP d'Ain El Houtz.	132
7.6	Données microbiologiques sur des échantillons d'eau prélevés dans les effluents de stations d'épuration.	133
7.7	Résultats d'analyses microbiologiques dans des échantillons d'eau prélevés dans des sources et des puits.	134

Introduction

Problématique

L'accroissement de l'urbanisation et des terres cultivées dans les milieux à climat semi-aride du nord algérien où les précipitations sont insuffisantes par rapport aux besoins, a provoqué la dégradation de la qualité des eaux souterraines et une baisse importante des niveaux des nappes. Un des enjeux majeurs actuellement c'est de garantir une eau de qualité.

Une solution peut être la gestion durable des eaux souterraines; des moyens techniques et économiques peuvent assurer une eau dont la qualité répond aux normes d'utilisation. La protection des aquifères fait aussi partie des solutions clé pour palier ce problème.

L'évaluation de la vulnérabilité à la pollution, la réalisation des périmètres de protection des captages d'eau avec la mise en place d'une réglementation adéquate, sont nécessaires pour la protection qualitative et la conservation de la ressource.

Pour faire tout cela, il est essentiel d'avoir des données hydrogéologiques des milieux souterrains. Or en Algérie, les études qui fournissent ces informations sont insuffisantes. Pour combler ce manque de connaissances et caractériser la cartographie de la vulnérabilité et des périmètres de protection, nous devons envisager des méthodes qui répondent à la réalité du terrain sans pour autant exiger trop de données.

En ce qui concerne l'évaluation de la vulnérabilité, il existe deux types de méthodes, celles qui nécessitent beaucoup de paramètres et celles qui nécessitent moins. Pour ces dernières, une question de fiabilité se pose. De nombreux auteurs ont alors fait plusieurs études comparatives et sont arrivés à une bonne adéquation entre les deux types de méthodes.

On cite à titre d'exemples: En Algérie DRASTIC et GOD [85]; en Italie SINTACS et AVI [86]; en Tunisie DRASTIC, SINTACS et SI [35]; au Cameroun DRASTIC, GOD et SI [87].

Pour ce qui est de la délimitation des périmètres de protection des captages des eaux, certains pays ont adopté la méthode de distances pour palier au problème de non disponibilité des données. Ces distances arbitraires autour des captages sont régies par des réglementations qui les définissent. Sans être exhaustif, nous pouvons citer l'Allemagne, la Belgique, la Suisse, le Danemark.

Dans cette étude, un autre problème est abordé, c'est la réutilisation des eaux usées épurées dans l'agriculture. En Algérie, cette pratique est régie par un arrêté définissant les normes d'utilisation de ces eaux. Les limites de concentration imposées dans cet arrêté ne peuvent pas empêcher les risques de contamination des eaux souterraines dans les zones vulnérables, car il a été établi pour la protection sanitaire et les cultures.

Objectif de l'étude

Dans ce travail, notre choix s'est porté sur une zone d'étude pilote, qui dispose d'un maximum d'informations, c'est l'aquifère de la plaine d'Hennaya, une zone connue et qui a fait l'objet de plusieurs études par différents auteurs.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la vulnérabilité à la pollution et la cartographie des périmètres de protection, en utilisant des méthodes nécessitant beaucoup de données et d'autres nécessitant peu de données. Ensuite, une comparaison et une validation des différentes méthodes utilisées est proposée. Enfin, pour répondre au manque d'informations régionales, un tri de fiabilité entre les méthodes qui utilisent peu de données est effectué.

En plus de cela, évaluer l'impact de l'irrigation avec les eaux usées épurées, puisque cette pratique est entrain de connaître une évolution importante en Algérie. Nous allons aussi proposer une méthodologie de protection adéquate s'il y a un risque de contamination.

Matériel et méthodes

Les informations requises pour cette étude sont les données hydrogéologiques, hydrologiques, météorologiques, les cartes topographiques et satellitaires, les types de sols et enfin les cartes géologiques. La compilation de ces données avec l'utilisation des logiciels Arcgis et globale-Mapper nous permet de générer les cartes des différents

paramètres. Nous avons choisi dans ce travail des méthodes déjà très utilisées, d'autres régionales de la méditerranée, puis une nouvelle méthode, pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque. Ce choix dépend aussi de la disponibilité des données nécessaires pour la réalisation de la carte de vulnérabilité, c'est à dire, des informations requises pour les méthodes utilisant plusieurs paramètres et celles nécessitant un peu moins. La classification des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité par ordre de priorité est faite en se basant sur le calcul du coefficient kappa, qui détermine l'accord entre elles. Le processus le plus fiable est celui qui présente le plus d'adéquation avec les autres.

D'un autre côté, pour la réalisation des périmètres de protections, deux types de méthodes sont utilisées dans cette thèse: celle des isochrones et celle de distances. Ensuite, une comparaison géométrique est élaborée.

Dans le troisième volet de notre étude, les données des résultats d'analyses qualitatives des eaux usées épurées et souterraines nous ont permis de déterminer les éléments qui présentent un risque de contamination de l'aquifère et d'utiliser une méthode de protection de vulnérabilités spécifiques à ces contaminants.

Chapitre 1

Principes de la protection des eaux souterraines

La méthodologie de la protection des eaux souterraines est basée sur quatre concepts:

1. Réglementation.
2. Protection des aquifères.
3. Protection des captages d'eaux souterraines.
4. Suivi qualitatif des eaux souterraines et des eaux de surface en interaction avec les nappes.

1.1 Réglementation

Les délimitations des périmètres de protection, les activités à l'intérieur des zones vulnérables et les normes de réalisation des ouvrages de captage sont régies par des textes réglementaires pour la protection des eaux souterraines, dans le but d'assurer une bonne gestion de l'exploitation des aquifères.

La réglementation algérienne concernant la protection des eaux souterraines est régie par la loi n° 83-17 du 16 juillet 1983, portant le code des eaux, la loi n° 05-12 du

04 Août 2005 relative à l'eau, le décret exécutif n° 07-399 du 23 décembre 2007 relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eau et le décret exécutif n° 10-73 du 06 février 2010 relatif à la protection qualitative des nappes aquifères.

Une étude détaillée de cette législation pour une comparaison avec la législation d'autres pays développés en matière de protection de l'environnement, peut faire l'objet d'un projet de mémoire de fin d'études.

Délimitation des périmètres de protection

Les méthodes de délimitation des périmètres de protection (PDP) sont régies par des textes réglementaires et diffèrent d'un pays à un autre. À titre d'exemple, ces textes exigent l'utilisation de la méthode des isochrones qui impose un temps de transfert, méthode hydrogéologique qui délimite la bassin d'alimentation du captage (BAC), ou bien la méthode de distances (Tableau 1.1), dans le but d'uniformiser les modalités de la délimitation des PDP. Les programmes d'action dans les PDP représentent un coup important d'investissement qui varie en fonction des surfaces de protection. Plus les espaces à protéger sont grands, plus le financement est onéreux.

D'après le tableau, on remarque que les états unies est le pays le plus drastique qui impose le plus grand temps de transfert, les suisses par contre sont moins exigeants, probablement du fait que leur environnement est bien protégé.

Table 1.1: Exemple de procédures réglementant les PDP dans certains pays.

[2]

Régions	Protection immédiate	Protection rapprochée	Protection éloignée			
			5 ans	10 ans	BAC	
Amérique du nord	Québec	60 jours, >100 m	BAC			
	Colombie Brit.	1 année	5 ans	10 ans	BAC	
	USA	>30 m (Z I)	>50 jours, >150 m (Z II)	>15 ans (Z III)		
Europe	Angleterre	50 jours, >50 m (Z II)	400 jours, 25% du BAC (Z II)			
	Allemagne	10 m (Z I)	50 jours (Z II)	2000 m (Z IIIA) BAC (Z IIIB)		
	Danemark	10 m	300 m	ZP non spécifique au site, basé sur une cartographie de la vulnérabilité		
	France	Environ 15 m	Environ 50 jours	ZP non obligatoire, elle peut couvrir une surface très variable		
	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		
Pays -Bas	30 m	60 jours	10 ans, > 800 m	25 ans, >1200 m	BAC.	
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			

Z I, S1 : PPI ; Z II, S2 : PPR ; Z III, S3: PPE; Valeurs en jours ou en année : temps de transfert

Textes réglementaires pour les zones vulnérables

La réglementation définit les mesures à prendre concernant les installations, l'utilisation des sols, les dépôts, les activités, les ouvrages et les travaux qui présentent un risque de pollution dans les zones vulnérables. Le schéma ci-dessous présente un exemple simple qui définit les acteurs et les actions (Tableau 1.2) dans les PDP.

Table 1.2: Structure du plan d'action adaptée dans les PDP.



La cartographie de vulnérabilité des eaux souterraines peut être aussi réglementée en définissant les acteurs de réalisation et les administrations de suivi et de validation. La réglementation oblige l'acquisition des terrains des périmètres de protection immédiate et l'indemnisation ou expropriation des propriétaires. Dans certains cas, la réglementation définit les modalités des subventions des agriculteurs concernant l'interdiction ou la limitation des produits phytosanitaires et engrais.

Normes des réalisations des ouvrages de captage

Les aménagements des captages et obturations des puits et forages abandonnés constituent une protection des eaux souterraines. Des normes réglementaires de réalisation basées sur des données géologiques, hydrogéologiques et techniques de génie civil dans le but d'éviter la facilité d'intrusion d'eau de la surface polluée vers le niveau saturé de la nappe.

À titre d'exemple au Canada, l'aménagement d'un puits de surface doit être conforme à une réglementation de construction (Figure 1.1), afin d'éviter l'interaction des eaux de surface ainsi que les eaux qui s'écoulent de la zone vadose avec les eaux souterraines.

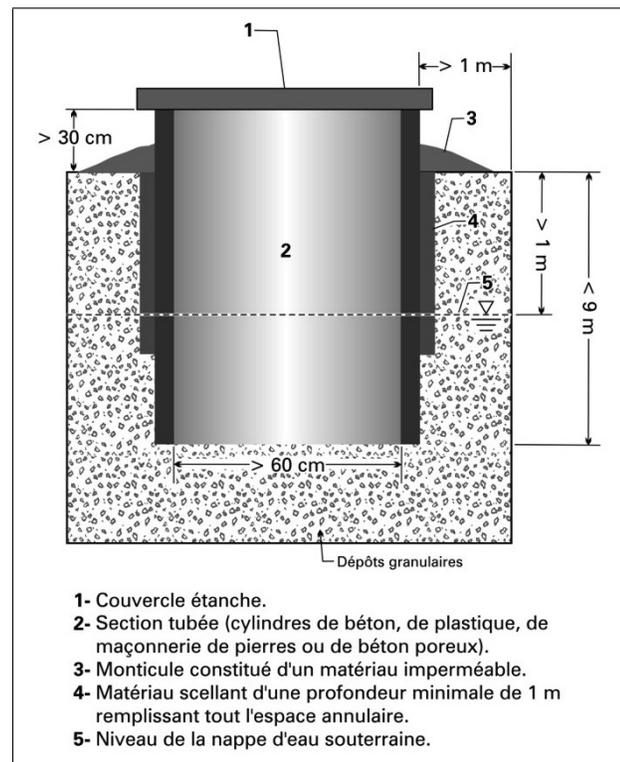


Figure 1.1: Schéma d'aménagement d'un puits de surface [10].

On constate dans ce type d'aménagement que le couvercle étanche, matricule et section tubée -qui doit dépasser les 9m-, jouent un rôle important de protection contre la pollution de surface, un puits creusé puis laissé à l'abandon constitue un grand risque de pollution de surface qui s'infiltrerait directement dans la zone saturée, puisque la couche protectrice a été enlevée. L'obturation des puits et forages doit répondre à des critères de réalisation (Figure 1.2):

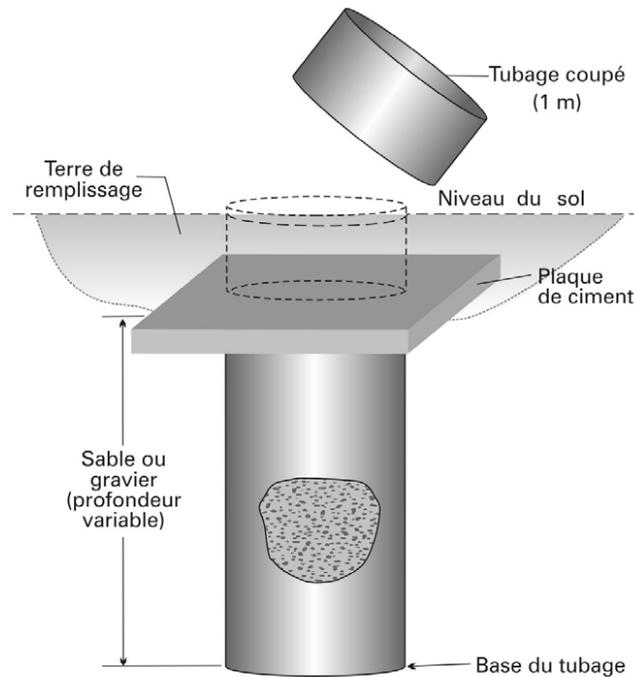


Figure 1.2: Schéma d'obturation d'un puits de surface [10]

1.2 Protection des aquifères

La cartographie délimitant les zones vulnérables des nappes ainsi que l'étude d'impact des sources potentielles de pollution sur les eaux souterraines, constituent des outils d'aide à la décision dans le but d'entreprendre des actions pour la protection des aquifères.

Au cours des années 1970, le terme "vulnérabilité" a commencé à être utilisé en hydrogéologie pour décrire la susceptibilité relative des aquifères à la contamination anthropique provenant de la surface du sol [12].

On distingue deux types de vulnérabilité.

La vulnérabilité intrinsèque: qui décrit la susceptibilité des nappes, liée aux caractéristiques naturelles des complexes géologiques et hydrologiques de l'aquifère.

La vulnérabilité spécifique: qui évalue la susceptibilité par rapport à un pol-

lant ou groupe de polluants bien définis. Dans la littérature, on remarque beaucoup de travaux qui traitent la vulnérabilité par rapport aux nitrates dans le cadre de la pollution agricole.

1.2.1 La vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité intrinsèque est la défense du complexe de la zone saturée et non saturée (ZS et ZNS) et ceci, à travers la migration des polluants de la surface jusqu'au réservoir souterrain. Le véhicule des polluants par les eaux de surface vers la nappe s'effectue à travers la ZNS qui représente la zone de recharge de la nappe (Figure 1.3).

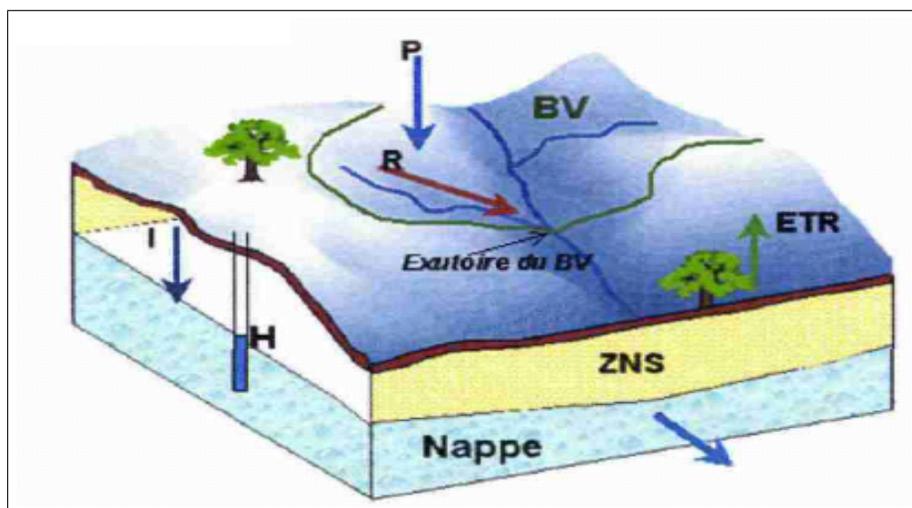


Figure 1.3: Schéma de fonctionnement d'un hydro-système [41].

P=précipitation; ETR=évapotranspiration; I=recharge de la nappe; R+I=Pluie efficace.

L'évaluation de la vulnérabilité est variable dans le cas où certains paramètres changent temporellement.

La carte de vulnérabilité intrinsèque dépend de plusieurs critères, comme les caractéristiques du sol, la ZNS et la ZS. Elle doit être actualisée en fonction de l'évolution des données (Tableau 1.3)

Table 1.3: Critères de vulnérabilité intrinsèque.

Sol	ZNS	ZS
-Pente -Pédologie -Perméabilité -Teneurs en matières organiques -Réseaux hydrographique	-Épaisseur de la ZNS -Perméabilité -Nature lithologique des formations géologiques -Fracturation -Temps de transfert de l'eau	-Type de nappe -Piézométrie -Production de la nappe -Épaisseur -Perméabilité -Porosité -Recharge -Temps de résidence -Nature lithologique des formations aquifères -Pluie efficaces

1.2.2 Vulnérabilité spécifique

Elle se rapporte aux propriétés hydrogéologiques et à la nature des contaminants potentiels, qui peuvent modifier la qualité de l'eau souterraine. Elle prend aussi en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec divers composants de la vulnérabilité intrinsèque [42].

La vulnérabilité spécifique dépend de plusieurs critères, présentés dans ce qui suit [27]:

- Occupation du sol.
- Densité de la population.
- Temps de transfert des polluants dans la zone non saturée.
- Capacité d'atténuation du sol de la zone non saturée et de l'aquifère en relation avec des polluants spécifiques.

1.2.3 Notion du risque

Un aquifère à vulnérabilité très élevée situé dans une zone où se pratique une agriculture biologique, peut ne pas être atteint d'une pollution.

Une analyse du risque comporte l'étude ou la caractérisation de trois facteurs majeurs : la source de pollution, le vecteur (transfert) de pollution et la cible [45].

La cartographie du risque est le croisement entre:

- La carte de vulnérabilité.
- La carte des enjeux.
- Et la carte des pressions.

Le risque est donné par la formule suivante:

$$R = A.E$$

Où R: Risque.

A: Alea (application d'un stress sur un point, un axe ou un espace plus ou moins vulnérable d'un milieu naturel [41]).

E: Enjeux: personnes, biens, activités, patrimoine...etc., susceptibles d'être affectés par les effets d'un stress sur le milieu naturel [41].

1.2.4 Méthode d'évaluation de la vulnérabilité

Il existe quatre catégories de méthodes d'évaluation de la vulnérabilité:

- Les méthodes contextuelles: évaluant la vulnérabilité en se basant sur les contextes géologiques et hydrogéologiques de l'aquifère, comme la méthode Minnesota.
- Les méthodes de cartographie à index: elles sont basées sur la combinaison des cartes thématiques paramétriques (profondeur de la nappe, recharge, perméabilité,...). Les paramètres pris en considération varient d'une méthode à l'autre. Un index numérique est attribué pour chacun des paramètres. Les logiciels de traitement comme les SIG permettent l'application des formules à chaque pixel des cartes, en combinant les différents paramètres et à la sortie. On aura

une carte de vulnérabilité qui nécessite un classement en fonction de chaque méthode.

Exemples: méthode DRASTIC, GOD, SINTACS,...

- Les méthodes de simulation: elles se basent sur la modélisation du transport des contaminants par la résolution numérique des équations mathématiques. Exemple: Modelflow, EvarisK,...
- Les méthodes statistiques: elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminants ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude [43].

Les deux dernières catégories de méthodes sont utilisées surtout pour le traitement de la vulnérabilité spécifique.

Dans la littérature, les méthodes les plus utilisées sont celles de cartographie à index du fait qu'elles offrent une facilité de calcul et d'exécution avec une bonne fiabilité des résultats.

1.3 Protection des captages d'eaux souterraines

La prévention contre la pollution des ouvrages de captages nécessite la réalisation des PDP au tour de ces points d'eau, dans lesquels toutes les activités anthropiques sont réglementées. La gestion des sources de contamination dans ces périmètres assure la potabilité de l'eau. Afin de faciliter cette gestion, une démarche logique constituée de plusieurs étapes est généralement proposée [44].

- **Constitution d'un comité de planification:**

Composé d'intervenants d'organismes privés et publiques pour la mise en place d'un programme de protection de l'eau souterraine.

- **Détermination des périmètres de protection**

Autour des ouvrages de captages d'eau souterraine considérés. Des techniques plus au moins complexes peuvent être utilisées en fonction du contexte hydrogéologique.

- **Identification et localisation des sources potentielles de contamination à l'intérieur des PDP:**

A cette étape, une liste des infrastructures et des activités susceptibles d'engendrer une détérioration de la qualité des eaux souterraines est dressée.

- **Gestion des aires de protection**

Les techniques de gestion peuvent venir d'une simple restriction des activités dans le PDP mis en œuvre, ainsi que sur l'identification de sources alternatives d'approvisionnement en eau potable en cas d'une contamination.

Les PDP se définissent comme suit: Périmètre immédiat, rapproché et éloigné (Figure 1.4):

Périmètre de protection immédiat, (PPI)

Ce périmètre est obligatoire et protège l'ouvrage de captage avec tous ces équipements. Une clôture est réalisée pour un rayon bien défini par la réglementation au tour du captage.

Périmètre de protection rapproché (PPR)

Ce Périmètre est obligatoire et vise à protéger le captage contre les sources de contamination bactérienne ou virale. La délimitation des PPR est généralement réalisée par la méthode des isochrones, qui correspond aux courbes d'égale temps de transfert. Ce dernier est réglementé et vari d'un pays à un autre (Tableau 1.1).

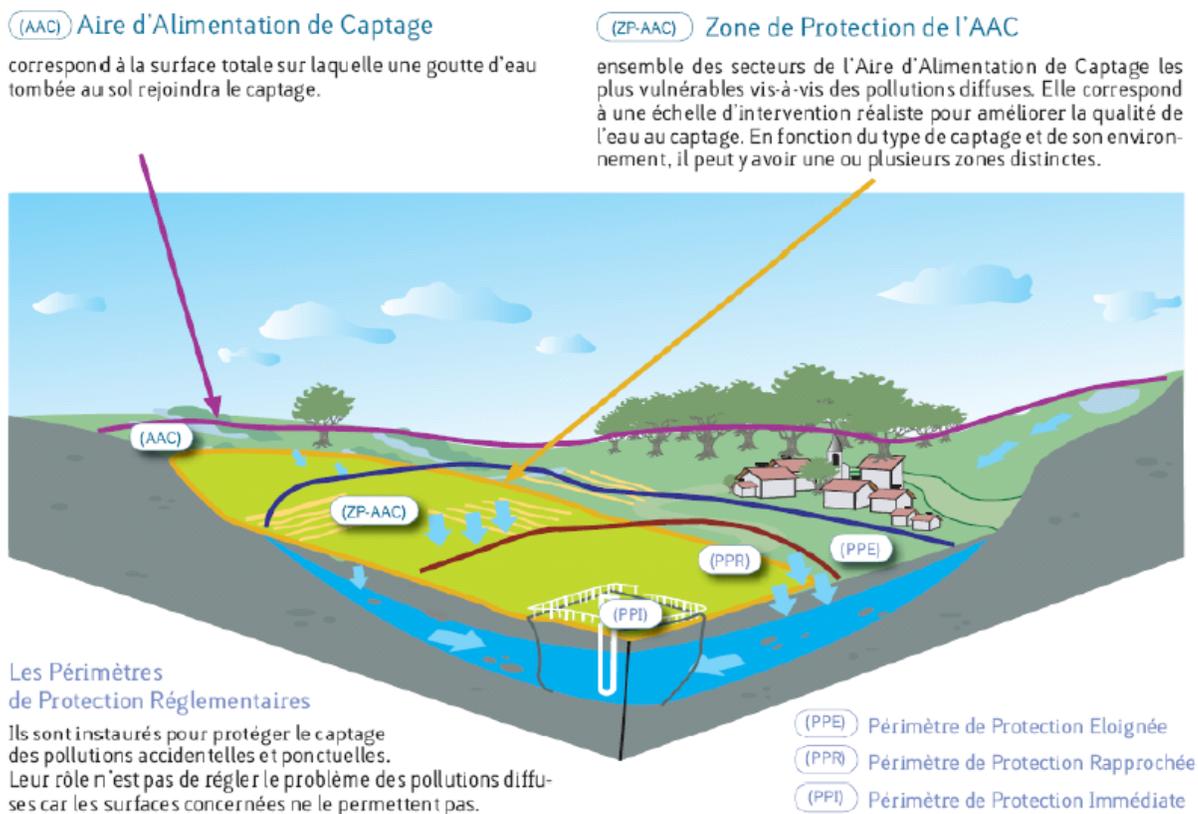


Figure 1.4: Les périmètres de protection [92] .

Périmètre de protection éloigné (PPE)

Ce périmètre est facultatif et vise à protéger les ouvrages du captage contre les pollutions permanentes. Il est créé dans le cas où les activités anthropiques sont à l'origine de pollutions dans les zones vulnérables. La délimitation est généralement réalisée par la méthode des isochrones ou bien elle correspond au BAC.

Le BAC correspond aux zones de recharge de surface qui contribuent à l'alimentation de cet ouvrage (Figure 1.5):

La délimitation du bassin versant hydrogéologique doit prendre en considération le tracé piézométrique, sens du flux et lignes du partage des eaux. La superposition de la carte des zones de recharge avec la carte des isopièzes délimitant les bassins

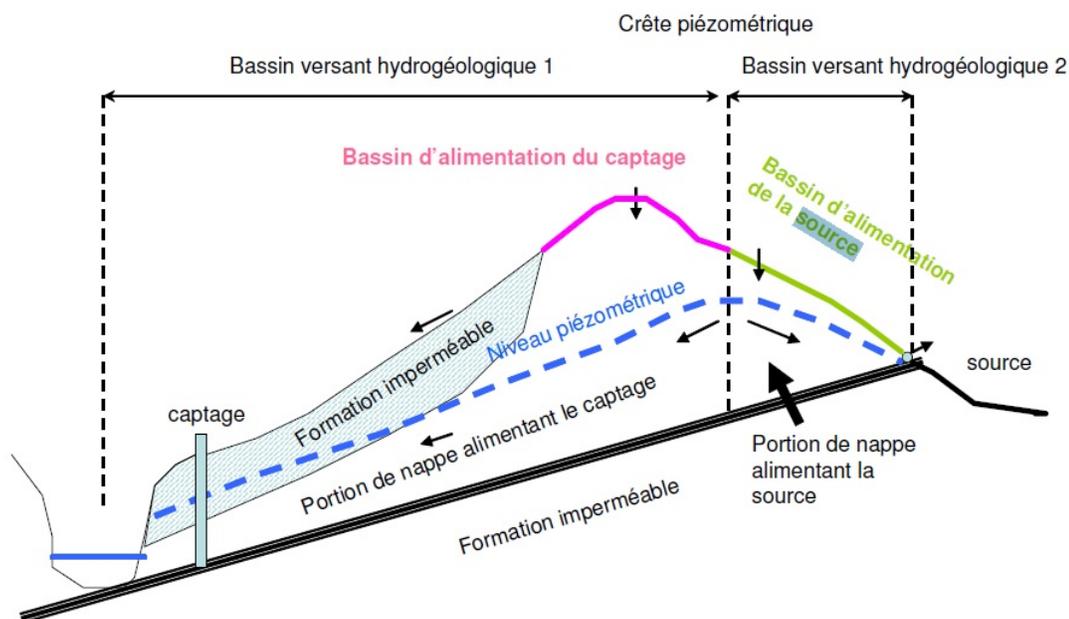


Figure 1.5: Délimitation d'un BAC [91].

versant hydrogéologiques nous permet de générer la carte délimitant le BAC.

1.4 Suivi qualitatif des eaux souterraines et des eaux de surface en interaction avec les nappes

Les mesures préventives de surveillance, les prélèvements et les analyses sont très importants pour la protection des nappes. Un programme d'action doit être immédiatement engagé dans le cas d'une évolution anormale des paramètres de suivi de qualité des eaux souterraines. La caractérisation qualitative des échanges des nappes avec les eaux de surface est nécessaire pour l'identification des sources de pollution et permettront dans certains cas de réagir avant la dégradation du milieu aquatique souterrain. À titre d'exemple, des restrictions d'utilisation doivent être imposées dans le cas de dégradation de la qualité des eaux d'irrigation.

1.5 Conclusion

La méthodologie de protection des eaux souterraines est définie en quatre volets: réglementation, protection des aquifères, protection des captages d'eau et suivi qualitatif des eaux.

Concernant le premier volet, la cartographie multicritères délimitant les zones vulnérables constitue un outil important d'aide à la décision. Les méthodes les plus utilisées et les plus adaptées actuellement sont les méthodes de cartographie à index.

La délimitation des périmètres autour des captages constitue un moyen clé pour préserver la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine.

La réglementation et le suivi qualitatif des eaux renforcent les deux premiers volets en assurant une bonne gestion et exploitation des aquifères.

Chapitre 2

Présentation de la zone d'étude

2.1 Généralités

La nappe de la plaine d'Hennaya renferme un aquifère alluvionnaire, d'une superficie d'environ 29 Km², se situe à une dizaine de Kilomètres au nord de la ville de Tlemcen (Nord-Ouest-Algérie). La région d'étude se délimite comme suit (Figure 2.1).

Caractérisée par une agriculture intensive, cette zone est considérée comme une des meilleures régions agricoles de la ville de Tlemcen, des sols riches et fertiles font de cette plaine une région très importante pour la production d'agrumes. La demande croissante en eau agricole durant ces dernières années a créé une sur exploitation de la nappe et une détérioration de la qualité de l'eau souterraine. L'utilisation d'engrais chimiques a induit une augmentation des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines.

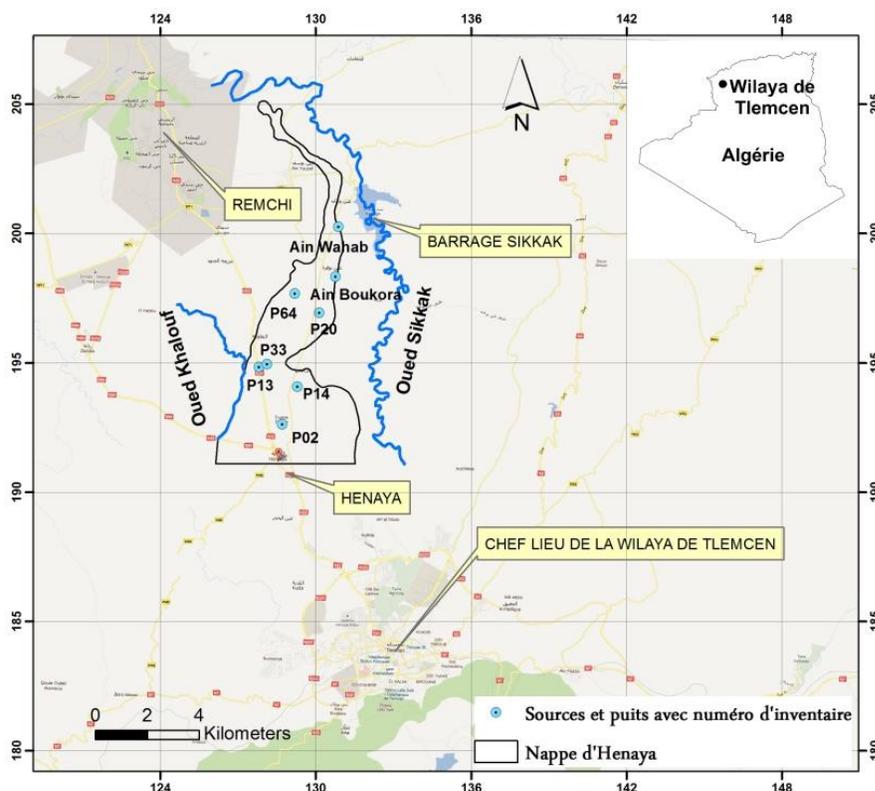


Figure 2.1: Localisation de la zone d'étude.

Nord : Commune de Ain youcef

Sud Localité d'Hennaya.

Est : oued Sikkak.

Ouest Oued Khallouf.

L'eau de la nappe est de mauvaise qualité et impropre à la consommation humaine, ceci a été mis en évidence par les teneurs élevées de nitrates dépassants les normes de potabilité aux niveaux de quelques points d'eau souterraines [89] (Figure 2.2):

On remarque dans le graphe (Figure 2.2), que la totalité des points d'eau (localisation voir Figure 2.1) présentent une concentration aux nitrates supérieure à la norme algérienne qui est de 50 mg/l.

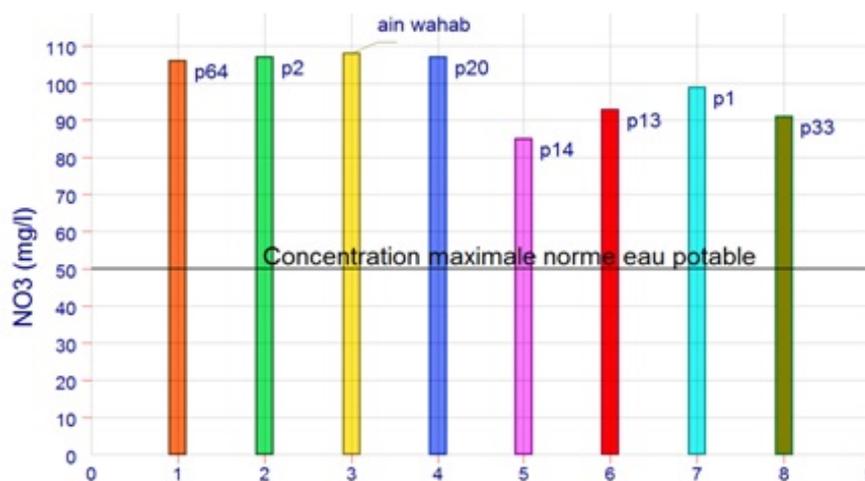


Figure 2.2: Concentration des nitrates analysés en 2011.

2.2 Climat

L'analyse de la variabilité des précipitations est basée sur les données des stations pluviométriques de six postes d'observation. En ce qui concerne la température, l'analyse est basée sur les données de la station météorologique de Zenata (Tableau 2.1) :

Table 2.1: Caractéristiques des stations pluviométriques et météorologiques.

ID	Nom des stations	Coordonnées Lambert		Altitude(m)	Période d'observation	Sources
		X (m)	Y (m)			
160403	Beni Bahdel	115	164,6	666	1971-2015	ANRH
160516	Hennaya	126,8	188,2	515		
160701	Mefrouche	135,6	180,2	1100		
160705	Lala Setti	133,9	181,8	1007		
160802	Pierre du chat	122,4	213,2	50		
160601	Chouly	151,8	181,2	725		
605300	Zenata	120,1	198,6	587	1981-2016	ONM

2.2.1 Précipitations

L'étude des précipitations est réalisée avec les données de 06 pluviomètres (Tableau 2.1) selon leurs situations géographiques (Figure 2.4) et les besoins de l'étude. Toutes ces stations sont gérées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).

Précipitations annuelles

Variation interannuelles moyennes des précipitations Pour donner un aperçu global de cette chronique, une période de 45 ans est utilisée dans cette étude pour toutes les stations pluviométriques (Figure 2.3):

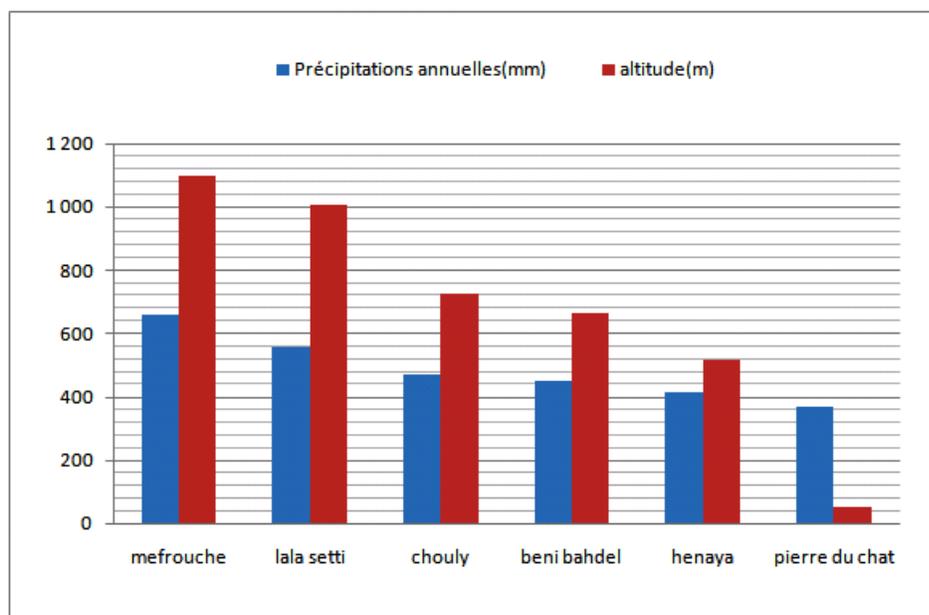


Figure 2.3: Précipitations moyennes annuelles des stations pluviométriques (1971-2015).

D'après la figure, on constate bien que la pluviométrie diminue avec l'altitude.

On remarque aussi que les précipitations de la station d'Hennaya sont faibles par rapport à celles de Mefrouche qui est le plus arrosé.

Précipitations moyennes annuelles de la plaine d'Hennaya La moyenne pluviométrique de la zone d'étude est calculée par la méthode des isohyètes pour les six stations utilisées (Figure 2.4):

$$P_{moyenne} = \frac{\sum P_i A_i}{A}$$

Où: A_i Superficies comprises entre deux isohyètes.

P_i : Pluviométrie inter-isohyètes.

A : surface totale de la nappe d'Hennaya.

Avant de procéder à cette opération, on doit tout d'abord calculer la moyenne arithmétique pour les six stations utilisées (Tableau 2.2).

Table 2.2: Précipitations moyennes arithmétiques et écart type.

	<i>Hennaya</i>	<i>Lalasetti</i>	<i>Mefrouche</i>	<i>Chouly</i>	<i>Pierreduchat</i>	<i>BeniBahdel</i>
<i>Moyenne</i>	<i>412,68</i>	<i>555,11</i>	<i>656,49</i>	<i>467,85</i>	<i>366,06</i>	<i>447,67</i>
<i>Écart type</i>	<i>99,45</i>	<i>119,47</i>	<i>141,63</i>	<i>110,46</i>	<i>80,78</i>	<i>124,65</i>
<i>Moyenne*0,5</i>	<i>206,34</i>	<i>277,55</i>	<i>328,24</i>	<i>233,93</i>	<i>183,03</i>	<i>223,83</i>

Les séries sont dites homogènes si l'écart type est faible. Dans le cas contraire, elles sont dites hétérogènes.

Dans la littérature, il n'y a pas de règles concernant l'appréciation de l'écart type, mais certains auteurs admettent que s'il ne dépasse pas 0.5*moyenne, alors il est faible.

On remarque dans le tableau 2.2 que l'écart est faible, on en conclut que toutes les séries utilisées sont homogènes.

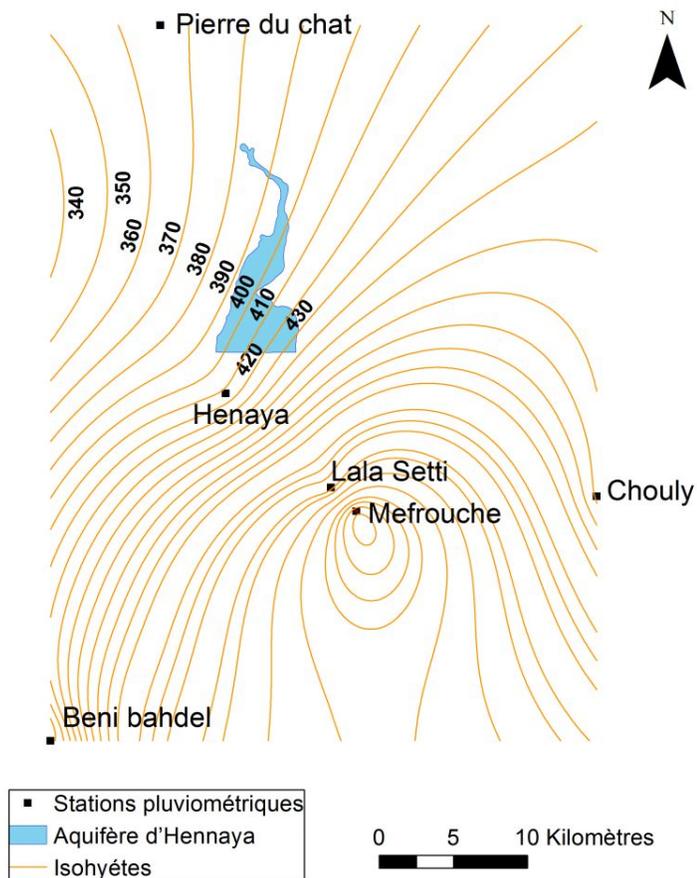


Figure 2.4: Carte d'isohyètes pluviométriques annuelles.

En fonction des courbes isohyètes tracées (Fig 2.4), la pluie moyenne peut être calculée de la manière suivante (Tableau 2.3) :

$$P_{moyenne} = \frac{11808}{29,86} \approx 395,5mm$$

Cette valeur n'est pas assez importante, surtout que la région d'étude est agricole, engendrant ainsi un déficit important pour les besoins en eau des cultures et le recours à l'exploitation intensif de la nappe souterraine.

Table 2.3: Estimation de la lame d'eau moyenne précipitée.

Isohyètes (mm)	Surface (Km2)	Pi*Ai
385,57	0,95	366,29
395	12,32	4866,40
405	8,67	3511,35
415	4,41	1569,46
425	2,96	1258,00
430	0,55	236,50
Total	29.86	11808

Précipitations moyennes mensuelles de la plaine d'Hennaya La spatialisation de la pluviométrie dans la plaine est calculée par l'interpolation des données moyennes mensuelles des stations en utilisant la méthode des isohyètes pour l'estimation de la pluviométrie moyenne mensuelle (Figure 2.5):

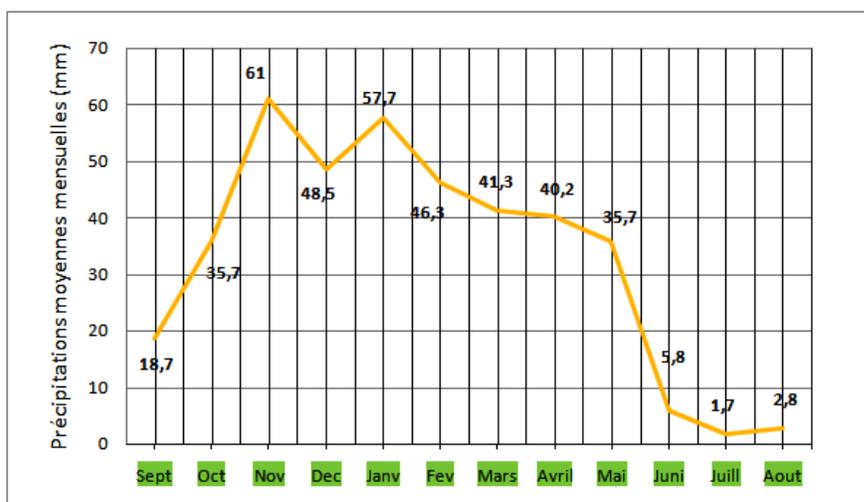


Figure 2.5: Précipitations moyennes mensuelles dans la plaine d'Hennaya (1971-2015).

Nous remarquons que le mois de novembre est le plus arrosé alors que nous avons un minimum de précipitations pour le mois de juillet.

Précipitations saisonnières Les hauteurs de pluies saisonnières (Figure 2.6) nous donnent une idée sur l'importance des périodes qui a une relation avec l'irrigation.

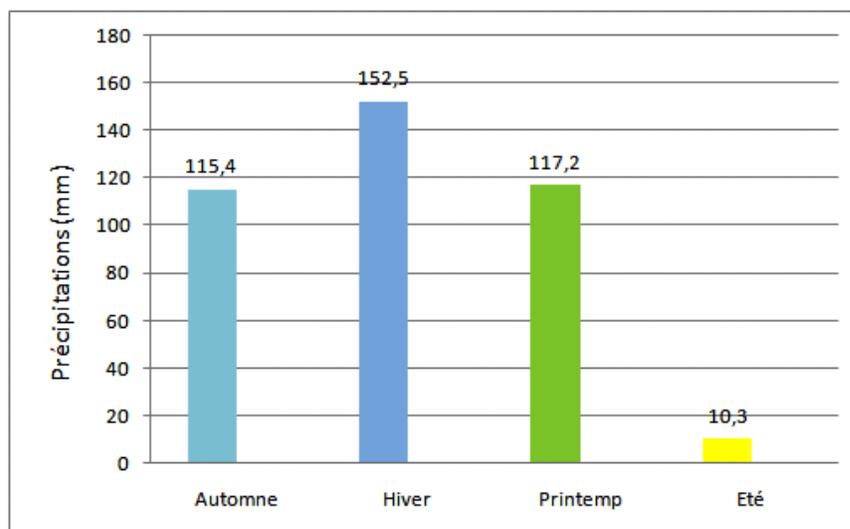


Figure 2.6: Précipitations saisonnières des pluies dans la plaine d'Hennaya (1971-2015).

On remarque que l'été est la saison la moins arrosée.

2.2.2 Température

La température est une grandeur physique très importante qui influe sur les variations de l'évapotranspiration et par conséquent sur le bilan hydrique.

Variations interannuelles des températures Pour étudier ce paramètre, une période de 38 ans est considérée pour interpréter ces variations (Figure 2.7):

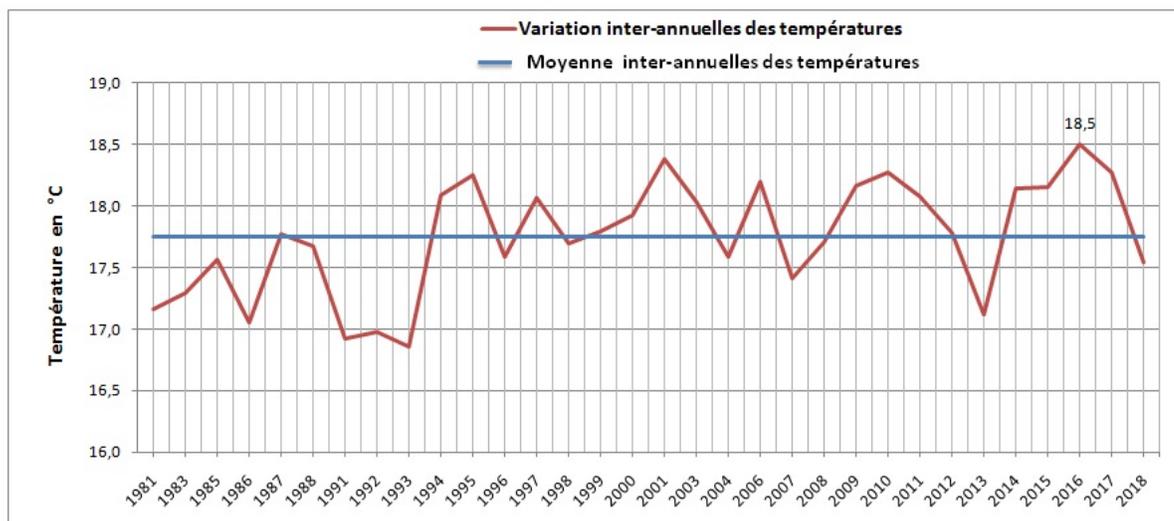


Figure 2.7: Températures interannuelles moyennes de la station de Zenata (1981-2016).

L'écart type pour cette série est de 0,46, ce qui est très faible par rapport à la moyenne qui est de 17,8°C. Par conséquent, c'est une série homogène qui ne représente pas de grandes variations.

L'analyse de la courbe nous indique que l'année la plus chaude est l'année 2016, avec une valeur de 18,5°C.

Température moyenne mensuelle La température moyenne mensuelle est calculée par la méthode arithmétique pour chaque mois de la série (Figure 2.8):

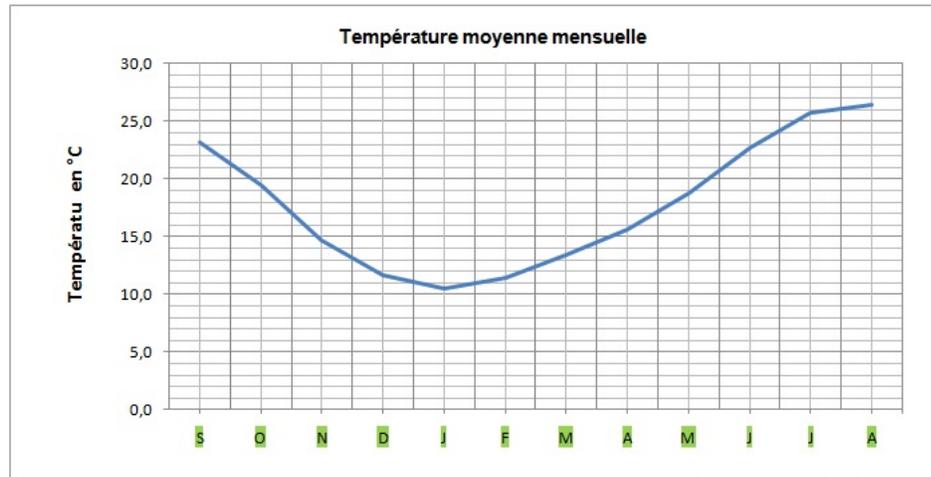


Figure 2.8: Température moyenne mensuelle (1981-2016).

On remarque dans la courbe que les valeurs les plus élevées sont observées pendant l'été avec un maximum pour le mois d'Aout, ($26,4^{\circ}C$). Par contre, les valeurs minimales sont observées durant la période hivernale pour le mois de Janvier, ($10,5^{\circ}C$).

Type de climat De Martonne (1923) a défini l'indice d'aridité qui porte son nom pour classé le type de climat:

$$I_{(DeMartonne)} = \frac{P}{T + 10}$$

Où P: Précipitations moyennes annuelles, (mm).

T: Température moyenne annuelle, ($^{\circ}C$).

Les valeurs de l'indice calculées nous informent sur le type de climat. D'après la classification de De Martonne (Tableau 2.4):

AN:

$$I_{(DeMartonne)} = \frac{395,5}{17,8 + 10} = 14,2$$

Nous pouvons déduire que le climat de la zone de la plaine d'Hennaya est semi-aride.

Table 2.4: Classification de l'indice de De Martonne .

[37]

Indice De Martonne	Classification (climat)
$I < 5$	Hyper aridité
$5 < I < 10$	Désertique
$10 < I < 20$	Semi-aride
$20 < I < 30$	Zone tempérée
$30 < I < 40$	Zone à écoulement exotique
$40 < I < 50$	Zone à écoulement abondant

Diagramme ombrothermique Le diagramme ombrothermique nous permet de localiser les périodes sèches et humides durant l'année dans laquelle les températures sont portées à l'échelle double des précipitations (Figure 2.9):

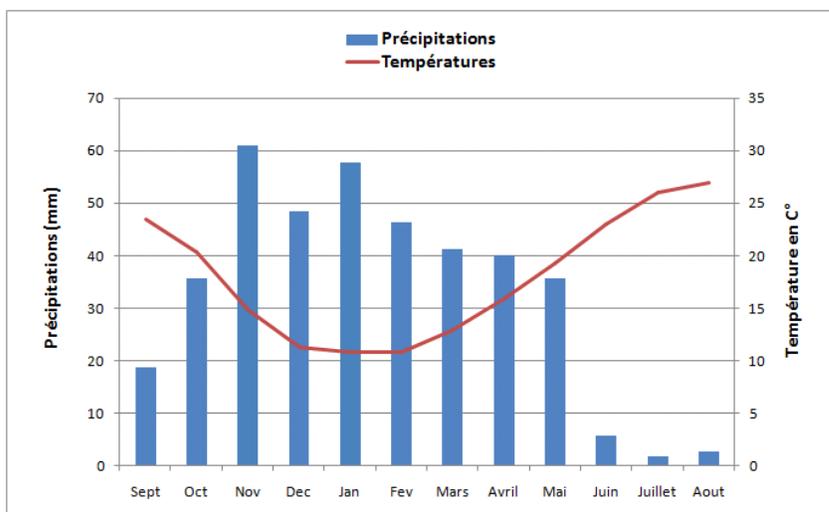


Figure 2.9: Diagramme ombrothermique.

On constate d'après le diagramme, que la période sèche débute du mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre et que la période humide du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril.

2.2.3 Évapotranspiration potentielle, (ETP)

L'évaluation de l'évapotranspiration potentielle est faite par la méthode Blaney-Griddle [53] (Figure 2.10).

Cette méthode est généralement utilisée en climat de type semi-aride [70].

$$ETP(mm) = K.P.(0.46T + 8, 13)$$

Où T: Température

P: Pourcentage d'éclairement mensuel en fonction de l'altitude de la zone d'étude.

K : Coefficient de culture =0.65 pour les agrumes [61].

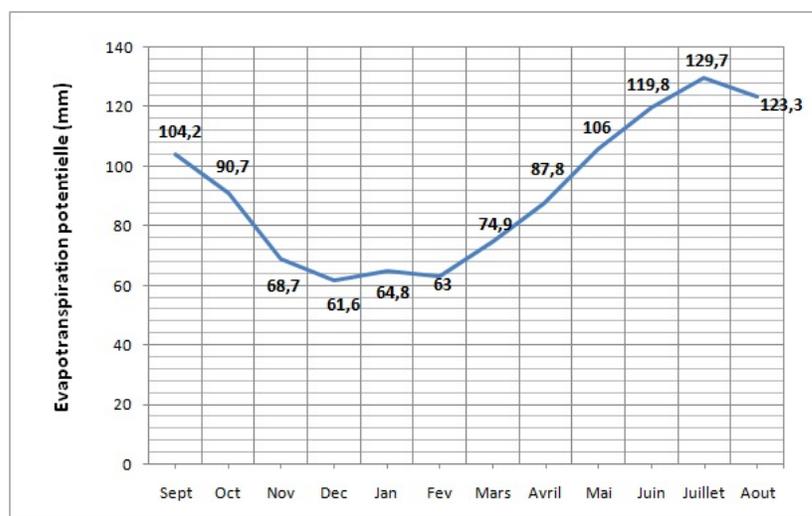


Figure 2.10: Évaluation de l'évapotranspiration potentielle (1981-2016).

L'analyse de la courbe montre que les valeurs de l'ETP sont importantes durant l'été, ce qui est logique du fait que l'ETP est liée à la température. Plus cette dernière est élevée, plus l'ETP augmente.

2.2.4 Conclusion

Le climat semi-aride de la plaine d'Henaya est un climat caractérisé par des précipitations qui sont insuffisantes pour y maintenir les cultures et où l'évaporation excède souvent les précipitations.

la saison des pluies se situe en automne, hiver et printemps. Les étés sont chauds et secs; les températures hivernales sont douces.

2.3 Lithologie des formations géologiques

La zone d'étude est constituée d'un ensemble de formations quaternaires et Miocène (Figure 2.11). Les horizons aquifères de la région sont les grès tortoniens, les conglomérats, les travertins, graviers et graviers argileux. Quand aux formations imperméables constituant le substratum, elles sont représentées par les marnes Helvétiques à couches minces de grés.

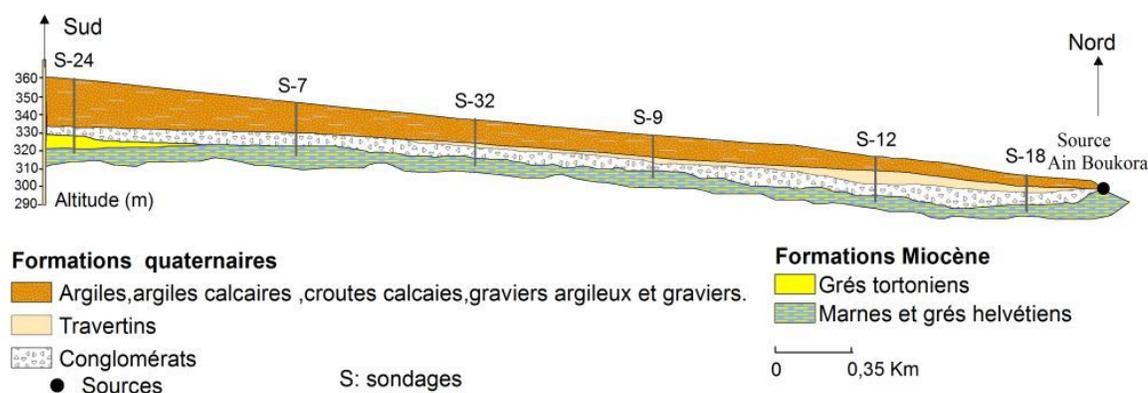


Figure 2.11: Coupe géologique Sud-nord de la zone d'étude [80] modifié.

2.4 Piézométrie

La carte piézométrique a été réalisée sur la base des données de la campagne de mesures du niveau d'eau de Juin 2011 sur 64 puits d'observation (Figure 2.12) [89].

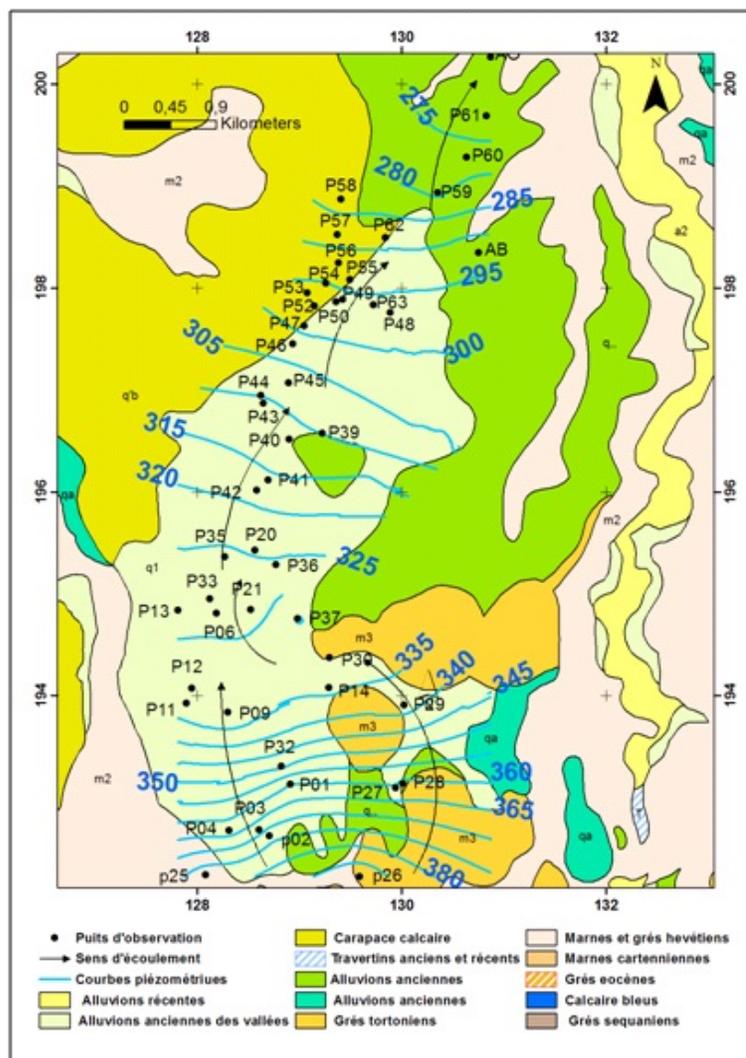


Figure 2.12: Carte piézométrique (juin 2011) [89].

L'écoulement de la nappe se fait du sud jusqu'à la zone de drainage au nord. Les apports proviennent du sud sans échange latérale. L'écart des isopièzes au sud est plus faible qu'au nord.

2.5 Conclusion

La plaine d'Hennaya est caractérisée par un climat semi-aride avec des précipitations annuelles moyennes de 395,5 mm. La pratique agricole intensive dans la plaine a induit l'accroissement de la demande en eau et par conséquent la surexploitation de l'aquifère et la dégradation de la qualité des eaux souterraines. Ceci a été mis en évidence par des concentrations de nitrates dépassant les normes de consommation humaine.

Chapitre 3

Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque

3.1 Description des méthodes

3.1.1 Méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC [1] est très utilisée dans le monde entier. Ceci est confirmé par la quantité importante de travaux et d'articles publiés dans ce sens. Cette méthode a été développée aux États Unis par EPA (Agency for experimental protection), le nom DRASTIC (Figure 3.1), est un acronyme qui désigne les paramètres suivants :

D: *Depth to ground Water table*: profondeur de la nappe.

R: *Net Recharge* : Recharge efficace (différent de la pluie efficace).

A: *Aquifer media* : Milieu aquifère.

S:*Soil media*: Nature du sol.

T: *Topography*: Topographie.

I: *Impact of Vadose Zone*: impact de la zone vadose.

C: *Hydraulic conductivity of the aquifer*: perméabilité.

Cette méthode se base uniquement sur les mouvements verticaux sans prendre en

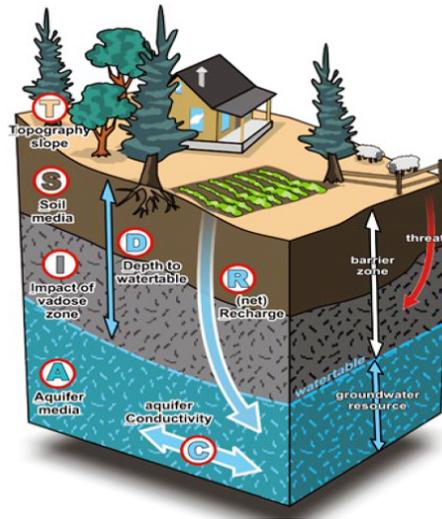


Figure 3.1: Définition des paramètres DRASTIC [93].

compte les mouvements horizontaux.

L'indice DRASTIC est donné par la formule suivante [1]:

$$I_{DRASTIC} = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W$$

Où: R: *rating*: cote.

W: *weight* : poids.

À chaque paramètre correspond un poids. Le poids représente le degré d'importance pour chaque paramètre, il est compris entre 1 et 5 et la cote classe dans une fourchette les paramètres selon leurs valeurs ou type de milieu (Tableau 3.1) .

Table 3.1: Cotes et poids attribués aux différentes classes de la méthode DRASTIC version standard.

[36]

Type d'aquifère Poids=3		Profondeur a la nappe(m) Poids=5	
Intervalles des classes	Cotes	Intervalles des valeurs	Cotes
Shale massif	1 – 3	0-1,5	10
Roches ignées /métamorphiques	2 – 5	1,5-4,5	9
Roches ignées /métamorphiques altérées	3 – 5	4,5-9	7
Till	4 – 6	9-15	5
Lits de grés, calcaire et shale	5 – 9	15-23	3
Grés massif	4 – 9	23-31	2
Calcaire massif	4 – 9	>31	1
Sable et gravier	4 – 9	Conductivité Hydraulique (m/j)	
Basalte	2 – 10	Poids=3	
Calcaire Karstique	9 – 10	Intervalles des valeurs	Cotes
Zone vadose		<4	1
Poids=5		4 – 12	2
Intervalles des classes		12 – 29	4
Couche imperméable	1	29 – 41	6
Silt / argile	2 – 6	41 – 81	8
Shale	2 – 5	>81	10
Calcaire	2 – 7	Recharge (cm/an)	
Grès	4 – 8	Poids=4	
Lits de calcaire, grés et shale	4 – 8	Intervalles des valeurs	Cotes
Sable et gravier avec Silt et argile	4 – 8	0 à 5	1
Roches métamorphiques / ignées	2 – 8	5 à 10	3
Sable et gravier	6 – 9	10 à 18	6
Basalte	2 – 10	18 à 25	8
Calcaire Karstique	8 – 10	>25	9
Type de sol		Topographie	
Poids=2		Poids=1	
Intervalles des classes	Cotes	Intervalles des valeurs	Cotes
Sol mince ou roc	10	0 – 2	10
Gravier	10	2 – 6	9
Sable	9	6 – 12	5
Tourbe	8	12 – 18	3
Argile fissurée	7	>18	1
Loam sableux	6		
Loam	5		
Loam silteux	4		
Loam argileux	3		
Terre noir	2		
Argile	1		

Pour l'attribution du poids, deux versions sont disponibles: la version standard et la version pesticides.

Les valeurs de l'indice calculé nous permettent de le classer selon son degré de vulnérabilité, Aller et al l'ont classifié en cinq classes et Engel et al (1996) (Tableau 3.2) en quatre classes.

Dans le but de comparer les différentes méthodes utilisées, il faut avoir le même nombre de classes de l'indice. Pour cela, dans notre travail, nous avons opté pour quatre classes.

Table 3.2: Classification de l'indice DRASTIC .

[29]

Degré de vulnérabilité	Valeur de l'indice de vulnérabilité DRASTIC
Faible	<101
Moyen	101-140
Élevé	141-200
Très élevé	>200

3.1.2 Méthode de l'indice de vulnérabilité aux nitrates NV

Développée en Espagne, c'est un nouvel indice de vulnérabilité spécifique, basé sur celui de DRASTIC et qui a pris en considération la pollution des nitrates liée à l'occupation du sol [30].

L'indice NV est donné par la formule suivante:

$$I_{NV} = I_{DRASTIC} \times L_U$$

Où: I_{NV} est l'indice de vulnérabilité au nitrates.

L_U est le risque potentiel associé à l'occupation du sol.

Les cotes appliquées à L_U sont indiquées dans le tableau 3.3.

Table 3.3: Cotes spécifiques aux catégories d'occupation du sol.

Catégories d'occupation du sol	Cotes	Sources
Cultures irriguées	1	[31]
Zone Urbaines	0.8	[32]
Grandes cultures non irriguées	0.6	[31]
Terres non cultivées, zones semi-naturelles	0.3	[31]
Forêt, zones naturelles	0.2	[33], [34]

La classification de l'indice NV selon le degré de vulnérabilité est donnée en cinq classes (Tableau 3.4):

Table 3.4: Classification de l'indice NV.

[30]

Degré de vulnérabilité	Classe de I_{NV}
Très faible	<70
Faible	70-110
Modéré	110-150
Élevé	150-190
Très élevé	≥ 190

3.1.3 Méthode SINTACS

La méthode SINTACS, dérivée de DRASTIC [27], a été développée en Italie et s'adapte aux conditions hydrogéologiques et climatiques de la méditerranée [28].

L'acronyme SINTACS désigne les paramètres suivants:

S: *Soggiacenza* : profondeur de la nappe.

I: *Infiltrazione efficace* : Recharge.

N: *Non saturo* : zone vadose.

T: *Tipologia dela opertura*: nature du sol.

A: *Aquifero* :Milieu aquifère.

C: *Conductibilità idraulica* : conductibilité hydraulique.

S: *Superficie topografica*: pente du terrain.

L'indice SINTACS est donné par la formule suivante:

$$I_{SINTACS} = S_R S_W + I_R I_W + N_R N_W + T_R T_W + A_R A_W + C_R C_W + S_R S_W$$

Où: R: *rating* : cote.

W: *weight* : poids.

Concernant les poids, la méthode donne cinq scénarios différents (Tableau 3.5).

Les détails des différents scénarios relatifs aux différents cas de terrains se présentent comme suit [35]:

- **Impact normal** : scénario relatif aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés, avec une profondeur de la nappe qui n'est pas très élevée, localisés dans des aires à sol épais.

Table 3.5: Poids attribués aux différents paramètres.

[27]

Paramètres	Impact Normal	Impact sévère	Drainage important	Karst	Terrains fissurés
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	4	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	2	2	2	5	4

Les zones relatives à ce scénario correspondent aux régions stables du point de vue occupation des sols, avec existence ou non de terres cultivées, une utilisation faible de pesticides, de fertilisants, d'irrigation et des périmètres urbains très dispersés.

- **Impact sévère** : correspond aux mêmes types d'aquifères soumis à une occupation des sols intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, des implantations industrielles et urbaines denses et des dépôts liquides et solides de déchets.
- **Drainage important à partir d'un réseau superficiel** : scénario relatifs aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau.
- **Terrain très Karstifié.**
- **Terrain fissuré.**

Les valeurs des cotes sont données en fonction des fourchettes des différents paramètres SINTACS (Tableau 3.6).

Table 3.6: Cotes des différentes classes des paramètres SINTACS.

[94]

Type d'aquifère		Profondeur a la nappe(m)	
Intervalles des classes	Cotes	Intervalles des valeurs	Cotes
Dépôt alluviale grossier	8-9	0-1	10
Calcaire karstique	9-10	1-4	9
Dolomie fissurée	4-7	4-6	8
Moyen a fin alluvion	6-8	6-8	7
Calcaire fracturé	6-9	8-10	6
Complexe sableux	7-9	10-20	5
Grés, conglomérat	4-9	>20	4
Argile, limon, tourbe	1-3	Conductivité Hydraulique (m/s)	
Séquence turbiditique fissure	5-8	Intervalles des valeurs	Cotes
Roche volcanique fissurée	8-10	$5 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-2}$	10
Zone vadose		$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-3}$	9
Intervalles des classes	Cotes	$5 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	8
Dépôt alluviale grossier	6-9	$1 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$	7
Calcaire karstique	8-10	$5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$	6
Dolomie fissurée	2-5	$1 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-5}$	5
Moyen a fin alluvion	3-6	Recharge (mm/an)	
Calcaire fracturé	4-8	Intervalles des valeurs	Cotes
Complexe sableux	4-7	250-325	9
Grés, conglomérat	5-8	175-250	8
Argile, limon, tourbe	1-2	150-175	7
Séquence turbiditique fissure	2-5	125-150	6
Roche volcanique fissurée	5-10	100-125	5
Type de sol		75-100	4
Intervalles des classes	Cotes	60-75	3
Sol a faible épaisseur ou absent	10	50-60	2
Gravier lavé	9,5-10	<50	1
Sable pur	9-9,5	Topographie en %	
Sol sableux	8-8,5	Intervalles des valeurs	Cotes
Argile Sableuse	6,3-7	0-2	10
loam sableux	5,5-6	3-4	9
Loam argileux sableux	4,5-5	5-6	8
Sol limoneux	3,5-4	7-9	7
Limono-terreux	3-4	10-12	6
Limoneux argileux	1,5-2	13-15	5
		16-18	4
		19-21	3
		22-25	2
		>26	1

L'indice SINTACS selon le degré de vulnérabilité est donné en quatre classes et varie de 106 jusqu'à une valeur >210 (Tableau 3.7).

Table 3.7: Classification de l'indice de vulnérabilité SINTACS.

[27]

Degré de vulnérabilité	Valeur de l'indice de vulnérabilité DRASTIC
Faible	<106
Moyen	106-186
Élevé	187-210
Très élevé	>210

3.1.4 Méthode DOPES

Développée en côte d'Ivoire, c'est un nouvel indice combinant cinq paramètres à l'origine de l'acronyme DOPES, [46]. Ces paramètres sont définis comme suit:

D: Densité du réseau hydrographique (Km/Km²).

O: Occupation du sol.

P: Pente en %.

E: Pluie efficace mensuelle.

S : Pédologie.

Le calcul de l'indice DOPES est donné par la formule suivante:

$$I_{DOPES} = D_r D_w + O_r O_w + P_r P_w + E_r E_w + S_r S_w$$

Pour chaque paramètre, on a un poids (w) et une cote (r). Ces variables sont présentées dans le tableau qui suit (Tableau 3.8):

Table 3.8: Cotes et poids des classes pour les paramètres de la méthode DOPES.

[46]

<i>Paramètres</i>	<i>Poids (w)</i>	<i>Alternatives</i>	<i>côtes (r)</i>
<i>Densité du réseau hydrographique (D), (Km/Km²)</i>	<i>0,10</i>	<i><1</i> <i>1 à 2</i> <i>2 à 5</i> <i>>5</i>	<i>1</i> <i>2</i> <i>4</i> <i>7</i>
<i>Occupation du sol, (O)</i>	<i>0,49</i>	<i>Forêt, savane et mosaïque forêt savane</i> <i>Agglomérations et sols nus</i> <i>Cultures et mosaïque</i> <i>culture-savane, culture-forêts</i>	<i>1</i> <i>5</i> <i>10</i>
<i>Pente (P), %</i>	<i>0,23</i>	<i>0-2</i> <i>2-6</i> <i>6-12</i> <i>12-18</i> <i>≥ 18</i>	<i>1</i> <i>3</i> <i>5</i> <i>9</i> <i>10</i>
<i>Pluie efficaces mensuelles (E)</i>	<i>0,04</i>	<i><50</i> <i>50 à 70</i> <i>70 à 100</i> <i>> 100</i>	<i>3</i> <i>5</i> <i>8</i> <i>10</i>
<i>Pédologie (S)</i>	<i>0,14</i>	<i>Acri sols</i> <i>Cambi sols</i> <i>Fluvi sols</i> <i>Luvi sols</i>	<i>2</i> <i>6</i> <i>7</i> <i>9</i>

La classification de l'indice DOPES en fonction du degré de vulnérabilité est donnée en cinq classes (Tableau 3.9):

Table 3.9: Classification de vulnérabilité de la méthode DOPES.

[46]

Valeur de Iv_i	Pourcentage	Degré de vulnérabilité
0,00 - 2,88	20	Très faible
2,89 - 4,55	40	Faible
4,56 - 6,22	60	Moyenne
6,23 - 7,89	80	Forte
7,90 - 9,56	100	Très forte

3.1.5 Méthode GOD

La méthode GOD [25] a été développée en Angleterre et dépend uniquement de trois paramètres. Elle traite la percolation verticale à travers la zone saturée.

L'acronyme GOD désigne les paramètres suivants:

G: *Groundwater occurrence* : type de nappe.

O: *Overal aquifer class*: type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques.

D: *Depth to groundwater table* : profondeur de la nappe.

L'indice GOD est donné par la formule suivante:

$$I_{GOD} = G_r \times O_R \times D_r$$

Où: r: *raiting*: côte.

Les cotes [24] sont présentées comme suit (Tableau 3.10,3.11,3.12):

Table 3.10: Valeurs des cotes du paramètre type de nappe.

Type de nappe	Valeur du paramètre
Captive artésienne	0.1
Captive	0.2
Semi captive	0.3
Semi libre	0.5
Libre	1

Table 3.11: Valeurs du paramètre des formations de l'aquifère.

Lithologie	Cote
Sol résiduel	0.4
Limon alluvial, loess, shale, calcaire fin	0.5
Sable éolien, siltite, tuf, roches ignées ou métamorphiques fracturées	0.6
Sable et gravier, grès, tuf	0.7
Gravier(colluvion)	0.8
Calcaire	0.9
Calcaire fracturé ou karstique	1

Table 3.12: Valeurs du paramètre profondeur de la nappe.

Profondeur de la nappe (m)	Valeur des paramètres
>100	0.4
50-100	0.5
20-50	0.6
10-20	0.7
5-10	0.8
2-5	0.9
<2	1

L'indice GOD est divisé en cinq classes selon le degré de vulnérabilité (Tableau 3.13).

Table 3.13: Classification de l'indice GOD en fonction du degré de vulnérabilité.

[24]

Classe de degré de vulnérabilité	Valeur de l'indice de vulnérabilité GOD
Très faible	0-0.1
Faible	0.1-0.3
Moyen	0.3-0.5
Élevé	0.5-0.7
Très élevé	0.7-1

3.1.6 Méthode AVI

Développée par l'institut de recherche nationale d'hydrologie à Canada, AVI [19], est une méthode numérique qui utilise deux paramètres: l'épaisseur de la couche sédimentaire de la zone vadose (d) et la perméabilité (k) de chaque couche.

L'indice de vulnérabilité AVI est donné par l'équation suivante:

$$I_{AVI} = \frac{\sum d_i}{k_i} \text{ pour les couches allant de 1 jusqu'à } i$$

La valeur de la perméabilité estimée est donnée comme suit (Tableau 3.14) :

Table 3.14: Conductivité hydraulique (k) estimé.

[19]

Type de sédiment	Conductivité hydraulique (m/j)
Gravier	1000
Sable	10
Sable limoneux	1
Limon	10^{-1}
Argile ou schiste argileux fracturé (0 à 5 m de la surface du sol)	10^{-3}
Till, argile ou schiste argileux fracturé (5 à 10 m de la surface du sol)	10^{-4}
Till, argile ou schiste argileux (10 m de la surface du sol mais altéré en fonction de la couleur marron ou jaune)	10^{-4}
Till massif ou mélangé, sable, limon, argile	10^{-5}
Argile massif ou schiste argileux massif	10^{-6}

L'indice AVI représente la résistance hydraulique de la zone non saturée à un écoulement verticale.

I_{AVI} est divisé en cinq classes selon le degré de vulnérabilité (Tableau 3.15) :

Table 3.15: Valeurs de la résistance hydraulique et classes de vulnérabilité.

[19]

Résistance hydraulique	Vulnérabilité AVI
0-10	Extrêmement élevé
10-100	Élevé
100-1000	Modéré
1000-10000	Faible
>10000	Extrêmement faible

3.1.7 Méthode DRASTIC modifiée (SINAN)

La méthode SINAN [38] a été développée au Maroc dans le but d'estimer la vulnérabilité spécifique par des polluants liée à l'activité anthropique. Cette méthode intègre les mouvements verticaux et la vitesse de propagation horizontale dans la zone saturée [38].

Cette approche considère la vulnérabilité verticale de l'aquifère et sa susceptibilité lorsqu'il est contaminé par des polluants [39].

L'indice SINAN est donné par la formule suivante:

$$I_{SINAN} = D_r D_W + R_r R_W + S_r S_W + T_r T_W + I_r I_W + C_r C_W + P_r P_W + V_r V_W$$

Où : D, R, S, T et I sont les mêmes paramètres de la méthode DRASTIC avec les cotations et poids identiques.

C: Conductivité de l'eau.

P : Productivité de la nappe.

V : Vitesse de propagation de la nappe.

Les cotes des paramètres C, P, V se présentent comme suit (Tableau 3.16) :

Table 3.16: Cotes et poids des paramètres C, P et V.

[39]

		Cotes	Poids
Conductivité de l'eau souterraine $\mu s/cm$	$C < 400$	10	05
	$400 \leq C \leq 1300$	08	
	$1300 \leq C \leq 2700$	05	
	$2700 \leq C \leq 3000$	03	
	$C \geq 3000$	01	
débit spécifique des ouvrages captant la nappe l/s	$Q \geq 5$	10	04
	$2 \leq Q < 5$	7	
	$0.5 \leq Q < 2$	5	
	$0 < Q < 0.5$	3	
	$Q = 0$	0	
Vitesse effective $(v)10^{-4}m/s$	$V \geq 5$	10	03
	$3 \leq V \leq 4$	7	
	$2 \leq V \leq 3$	5	

Les valeurs de l'indice DRISTCPV sont réparties dans 5 classes selon le degré de vulnérabilité de chaque classe (Tableau 3.17).

Table 3.17: Classification de l'indice SINAN.

[39]

Degré de vulnérabilité de l'indice I_{SINAN}	Valeur de l'indice de vulnérabilité
Très faible	$47 < I < 90$
Faible	$90 < I < 140$
Moyen	$140 < I < 190$
Forte	$190 < I < 240$
Très forte	$240 < I < 286$

3.1.8 Méthode Minnesota

Cette méthode a été développée aux états unis en 1990 par le département des ressources naturelles du Minnesota. Elle se base sur les caractéristiques d'un seul paramètre qui est la zone vadose et utilise trois niveaux pour l'estimation de la vulnérabilité.

Le niveau 1 évalue la vulnérabilité en fonction de la nature géologique des formations de la zone vadose et la profondeur de la nappe (Tableau 3.18) :

Table 3.18: Estimation de la vulnérabilité niveau 1.

[37]

Matériel géologique	Indice de sensibilité	
	Profondeur à la nappe	
	<1,83m	>1,83m
Dépôts non consolidés		
Epandage fluvio-glaciaire, sables et gravier glacio-lacustres	Très élevé	Très élevé
Sables des terrasses et dépôts graveleux	Très élevé	Très élevé
Matière organique, tourbe	Elevé	Modéré
Loess, Silt des terrasses et formations fluvioglaciaires et sable fin	Elevé	Elevé
Till, sllto-sableux, till sablo-silteux	Elevé	Modéré
Alluvion, colluvion	Elevé	Modéré
Till, till argileux silteux, till argileux	Modéré	Faible
Argile glacio-lacustre et argile silteuse	Modéré	Faible
Socle rocheux ou résidu de socle rocheux		
Calcaire, dolomie	Très élevé	Très élevé
Grès	Très élevé	Elevé
Roches ignées et métamorphiques	Elevé	Elevé
Siltstone	Modéré	Modéré
Shale	Faible	Faible

Le niveau 2 donne une estimation plus précise de la vulnérabilité par rapport au niveau 1 dans le cas où on dispose de plus d'informations, comme l'épaisseur et l'appréciation de la perméabilité de la zone non saturée (Tableau 3.19):

Table 3.19: Estimation de la vulnérabilité niveau 2.

[37].

	Classification des matériaux à la surface de la nappe								
	1			2		3		4	
	<20	20-50	>50	<20	>20	<20	>20	<20	>20
Epaisseur totale de la zone Vadose (pieds)									
Unités de faible et moyenne Perméabilité dans la zone Vadose.									
Pas d'unités de faible ou moyenne perméabilité.	Très fort (VH)	Très fort (VH)	fort (H)	Très fort (VH)	Fort (H)	Modéré (M)	Modéré (M)	Faible (L)	Faible (L)
Ensemble de minces unités de faible perméabilité >à 10 pieds.	-	Fort(H)	Modéré (M)	-	Modéré (M)	-	Modéré (M)	-	Faible (L)
Une unité de perméabilité moyenne > à 20 pieds.	-	Fort(H)	Modéré (M)	-	Modéré (M)	-	Modéré (M)	-	Faible (L)
Une unité de faible perméabilité > à 10 pieds.	-	Modéré (M)	Faible (L)	-	Faible (L)	-	Faible (L)	-	Faible (L)

La classification des matériaux à la surface de la nappe est donnée par le tableau 3.20 :

Table 3.20: Classification des matériaux à la surface de la nappe.

[37]

Terminologie géologique	Terminologie de forage	Catégorie de classement
Matériel non consolidé		
Plaine d'épandage, sable et gravier glaciaire, dépôt de terrasse, matériaux organiques, tourbes, loess, silt et sale fin glaciaire.	Tout type de combinaison de sable et gravier qui n'inclus pas le terme d'argile.	2
Till sablo-loameux, till loamo-sableux, alluvion, colluvion.	Sable argileux, argile sableuse, bassin sédimentaire, argile graveleuse, roc et argile, toute autre description modifiée par l'argile.	3
Argile glaciaire, till loameux, till argilo-loameux, till argileux.	Argile.	4
Matériel consolidé		
Calcaire karstique, calcaire, dolomie.	Calcaire, limerock Shakopee, prairie du chien, etc., roc	1
Sable, roche ignée ou métamorphique.	Sable, Sandrock Jordan, St Peter, etc., roc	2
Silt, séquence interlitée ou dépôt mixte, calcaire shaleux, shale sableux	Shale modifié par le calcaire ou le sable, mudrock	3
Shale	Shale	4

Par contre, le niveau 3 est surtout utilisé pour les aquifères confinés profonds.

3.2 Conclusion

Dans cette étude, huit méthodes seront utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité, à savoir: DRASTIC, SINTACS, DOPES, GOD, SINAM, AVI, Minnesota et NV.

La méthode NV traite la vulnérabilité spécifique par la pollution aux nitrates. Les autres méthodes traitent la vulnérabilité intrinsèque de la nappe d'Hennaya. Cinq sont paramétriques, une contextuelle (Minnesota) et une numérique (AVI). Trois méthodes: NV, SINTACS et SINAN dérivent de la méthode DRASTIC, par contre, les autres diffèrent par leur manière d'estimer la vulnérabilité.

Chapitre 4

Paramètres déterminants la vulnérabilité des eaux souterraines

4.1 Cartographie de l'occupation du sol de la plaine d'Henaya

La carte d'occupation du sol est réalisée à partir d'images de télédétection en utilisant le plugging de classification d'images dans le logiciel ArcGis.

Dans ce travail, nous avons choisi des images satellitaires sentinel 2A téléchargées gratuitement à partir du site sentinel online.

Le choix de ces images est justifié par leurs hautes résolutions et qui ne nécessitent pas de traitement avant leur utilisation.

Le satellite sentinel 2 fait partie du programme d'observation et de surveillance de la terre de l'agence spatiale européenne (ESA), qui fournit des clichés dans 13 bandes spectrales à différentes résolutions. Pour la réalisation de cette cartographie, nous avons utilisé uniquement les trois bandes à haute résolution de 10 m, blue, green et red. En plus, nous avons opté pour les images datées du 05/06/2017, période sèche, car durant cette période, nous pouvons faire facilement la distinction entre céréales, arboricultures, maraichages et terres nues.

La méthode de classification supervisée en utilisant l'algorithme du maximum de

vraisemblance- considérée comme une technique puissante- est retenue pour cette classification [22, 23].

Le principe de classification supervisée consiste à allouer des échantillons représentatifs qui puissent être identifiés sur l'image pour chacune des classes, (appelés échantillons de terrains ou parcelles d'entraînement). Ensuite, des polygones sont digitalisés autour de ces exemples et assignés à une classe [18].

Le résultat final de classification spécifiée en utilisant l'algorithme du maximum de vraisemblance est présenté ci-dessous (Figure 4.1).

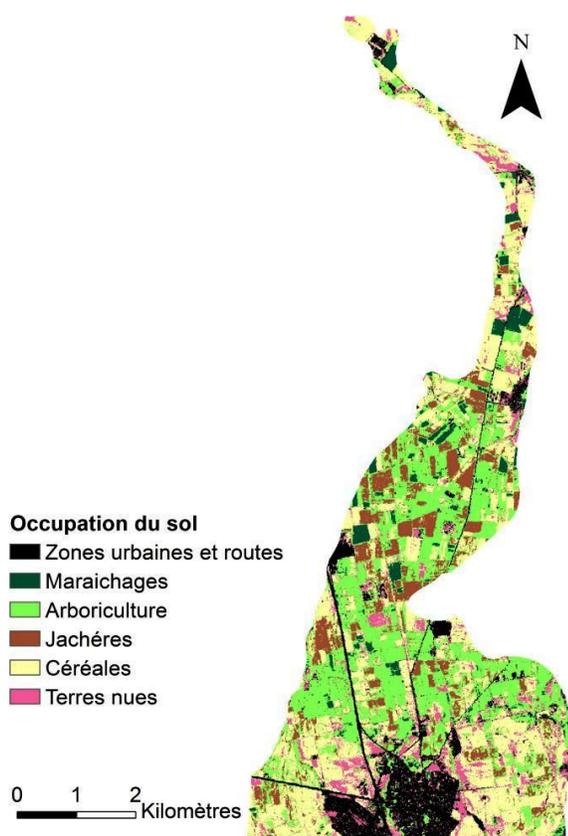


Figure 4.1: Carte d'occupation du sol.

On remarque que les cultures à l'irrigués arboriculture fruitières et maraichages représentent 37,6% de la surface totale avec une superficie de 1121ha.

Validation de la classification

Cette étape nécessite la réalisation de la matrice de confusion pour comparer entre les données réelles du terrain et les données de classification produites.

La matrice de confusion est une matrice carrée qui mesure la qualité d'un système de classification, où chaque colonne correspond à une classe réelle et chaque ligne correspond à une classe produite. Pour la calculer, il est nécessaire de disposer d'un ensemble de points tests identifiés sur le terrain pour chacune des classes de l'occupation du sol. On fait ensuite une vérification de confusion lignes avec colonnes. La matrice indique alors le nombre de produits estimés corrects et celui des estimés incorrects pour chaque classe en fonction des classes réelles.

On appelle M la matrice de confusion, puis on pose

T = Nombre total des échantillons.

$S_{i,lignes}$ = les Totaux sur les lignes = $\sum_{j=1}^n a_{ij}$ pour $i = \overline{1, n}$

$S_{colonnes,j}$ = les Totaux sur les colonnes = $\sum_{i=1}^n a_{ij}$ pour $j = \overline{1, n}$

Nous rappelons aussi que la trace de la matrice M est donnée par $tr(M) = \sum_{i=1}^n a_{ii}$.

La précision de la classification est calculée par l'indice KAPPA qui varie de 0 à 1 (Tableau 4.1) à partir de la matrice de confusion, il est donné par la formule suivante:

$$K = \frac{T \times tr(M) + \sum_{k=1}^n (S_{k,lignes} \times S_{colonnes,k})}{T^2 - \sum_{k=1}^n (S_{k,lignes} \times S_{colonnes,k})}$$

Application Numérique:

Pour répondre à l'objectif de validation, nous avons choisi des points (zones tests) en fonction des connaissances du terrain afin de les tester avec les données de classification.

Nous présentons ci-dessous la matrice de confusion relative à la classification de la plaine d'Hennaya (Tableau 4.2), ici $n = 7$.

Table 4.1: Précision de classification en fonction de l'indice KAPPA.

[17].

K	Précision de classification
<0	Faible
0-0.2	Légère
0.2-0.4	Acceptable
0.4-0.6	Modérée
0.6-0.8	Bonne
0.8-1	Très bonne

Table 4.2: Matrice de confusion de la classification d'occupation du sol.

		<i>Actuelle(terrain)</i>							
		<i>urbain</i>	<i>maraichages</i>	<i>arbo</i>	<i>jachere</i>	<i>céréales</i>	<i>terres incultes</i>	<i>eau</i>	<i>total général</i>
<i>Classées</i>	<i>urbain</i>	61	1	2		1	5		70
	<i>maraichages</i>		57	3	1	3		1	65
	<i>arbo</i>	6	15	185	16	12	2		236
	<i>jachere</i>		1	3	123	1			128
	<i>céréales</i>	3	3	5	12	116	8		147
	<i>terres incultes</i>	7		5		9	204		225
	<i>eau</i>							6	6
	<i>Total général</i>	77	77	203	152	142	219	7	877

À partir de la matrice de confusion, on calcule le coefficient de la manière suivante:

$$K = \frac{659504 - 147950}{769129 - 147950} = \frac{511554}{621179} = 0.823$$

En se référant au tableau 4.1, nous concluons que la classification de l'occupation de la plaine d'Hennaya est très bonne.

4.2 Carte des pentes

La digitalisation et l'interpolation des courbes de niveaux des cartes topographiques 1/25000 de Tlemcen, ainsi que l'utilisation de l'outil Slope (pente) dans ArcGis, nous permet de générer la carte des pentes (Figure 4.2).



Figure 4.2: Carte des pentes.

On remarque que le terrain de la plaine d'Hennaya est presque plat avec des pentes comprises entre 0 et 2%, qui représentent 50,2% de la surface totale. Elles se situent dans la partie centrale et au nord de la plaine. On remarque aussi des pentes moyennes comprises entre 2 et 10% occupant 48,3% de la surface totale et qui se situent pratiquement au sud de la plaine, au niveau de l'agglomération de la commune d'Hennaya.

4.3 Profondeur de la nappe d'Hennaya

Pour la réalisation de la carte des profondeurs du niveau d'eau de la nappe d'Hennaya, nous disposons des données suivantes:

1. Données de plusieurs campagnes piézométriques observées durant les mois de mai, juin et juillet de l'année 1968 aux niveaux des sondages de reconnaissance et puits existants, effectués par le bureau d'étude technoexportstroy.
2. Données piézométriques des mois de mai et juin de l'année 2017 aux niveaux de 52 puits existants (Figure 4.4) , mesurées par l'auteur.

La comparaison de la piézométrie entre ces deux périodes montre un abaissement important du niveau d'eau (Figure 4.3). Ceci est dû principalement à la surexploitation anarchique de la nappe. La fluctuation entre ces deux périodes varie entre 3.3 et 8.6 m.

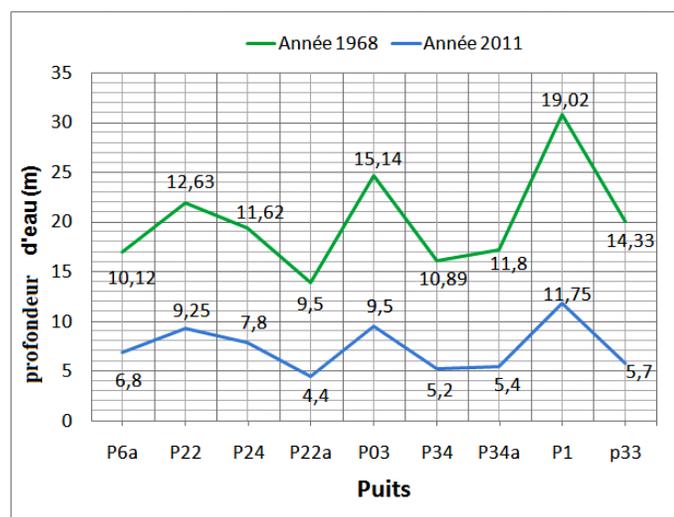


Figure 4.3: Courbes de battement de la nappe d'Hennaya, (1968 et 2011).

Les données des campagnes piézométriques effectuées par le bureau d'études technoexportstay ont révélé que la période des mois de Mai, Juin et Juillet correspond au niveau d'eau le plus élevé de l'année 1968.

Dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe d'Hennaya, nous avons opté pour les données du niveau d'eau observé durant Juin 2011, période de hautes eaux.

Ce choix est justifié par le fait que l'allocation des volumes d'eaux usées épurées à l'irrigation dans la plaine d'Hennaya ne va pas atténuer la surexploitation de la nappe, à cause de la demande toujours croissante des eaux d'irrigation liée aux nouvelles plantations d'agrumes réalisées dans la zone. Dans ce cas, les niveaux piézométriques ne peuvent pas être revus à la hausse.

La carte des profondeurs réalisée montre quatre zones (Figure 4.4). On remarque que la zone 2 avec le niveau d'eau compris entre 10 et 20 m est la plus importante occupant 78% de la surface totale de la nappe. On remarque aussi que le niveau d'eau dépassant les 20 m se situe généralement au sud de la plaine.

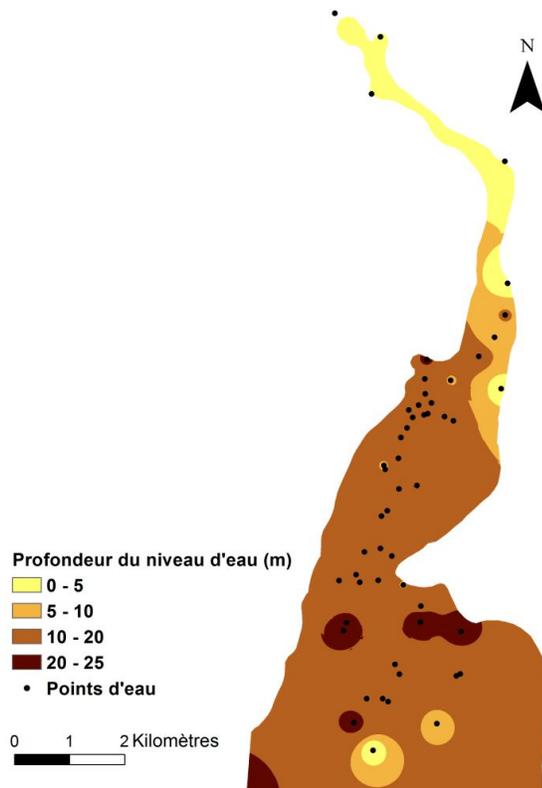


Figure 4.4: Carte de la profondeur des eaux souterraines du niveau d'eau le plus élevé de l'année 2011.

4.4 Formations aquifères et zone vadose

La caractérisation de l'aquifère d'Hennaya a été réalisée en se basant sur les données des sondages de reconnaissance pour un linéaire de 1023 m dans le cadre de l'étude de la structure géo-lithologique et hydrogéologiques [80].

4.4.1 Formation aquifères

Les horizons aquifères dans la région sont les grés tortoniens et les sédiments quaternaires (Figure 4.5):

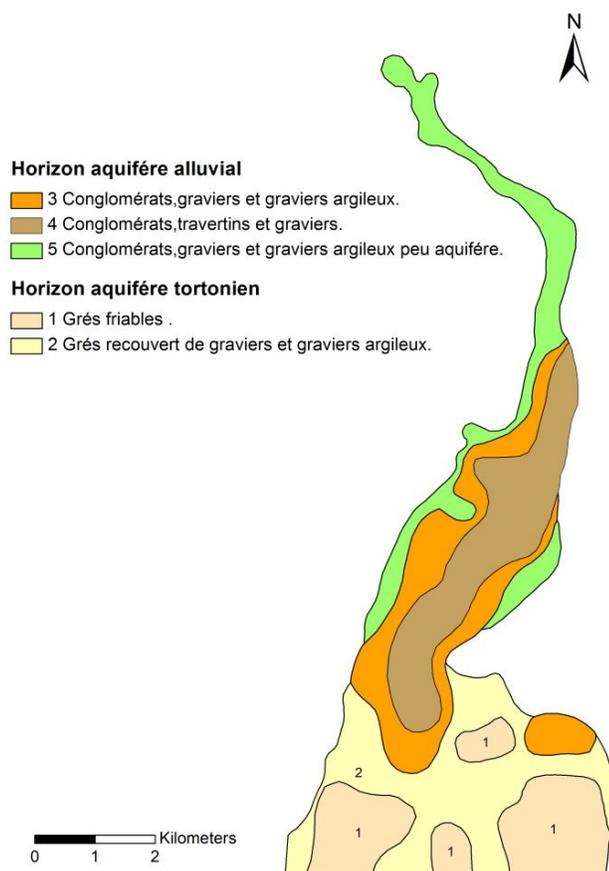


Figure 4.5: Carte des formations aquifères [80] modifiée.

L'Horizon aquifère tortonien est situé au sud de la plaine. Une partie est formée uniquement par les grès qui affleurent à la surface. L'autre partie est recouverte de graviers et graviers argileux avec lesquels forme un horizon aquifère commun.

L'horizon aquifère alluvial est formé des conglomérats, travertins, graviers et graviers argileux. Les conglomérats est la couche la plus importante de l'aquifère. Elle forme, avec les travertins, graviers et graviers argileux un aquifère commun.

Les travertins sont situés dans la partie centrale et nord de l'aquifère au dessus des conglomérats. Les graviers et graviers argileux sont situés au dessus des conglomérats et couvrent tout l'aquifère.

4.4.2 Zone vadose

Les formations qui constituent la zone non saturée sont les grés, argiles, argiles calcaires, croutes calcaires, graviers et graviers argileux (Figure 4.6).

La caractérisation de la zone non saturée est basée sur les données des sondages mécaniques et la campagne piézométrique effectuée en 2011.

La zone vadose est située au dessus du niveau d'eau de l'aquifère jusqu'à la surface du sol.

La couverture de l'horizon aquifère au sud est argileuse avec une épaisseur variant de 2,3 à 22,6 m.

Cette formation argileuse compacte constitue une barrière à l'infiltration, dans cette zone l'aquifère est confiné.

Les mesures des niveaux d'eau dans cette zone ont montré qu'ils sont situés au dessous de la formation argileuse. Dans ce cas, la profondeur correspond à la différence entre le niveau topographique et piézométrique.

L'aquifère est libre dans la zone où la couverture est alluvionnaire semi-imperméable.

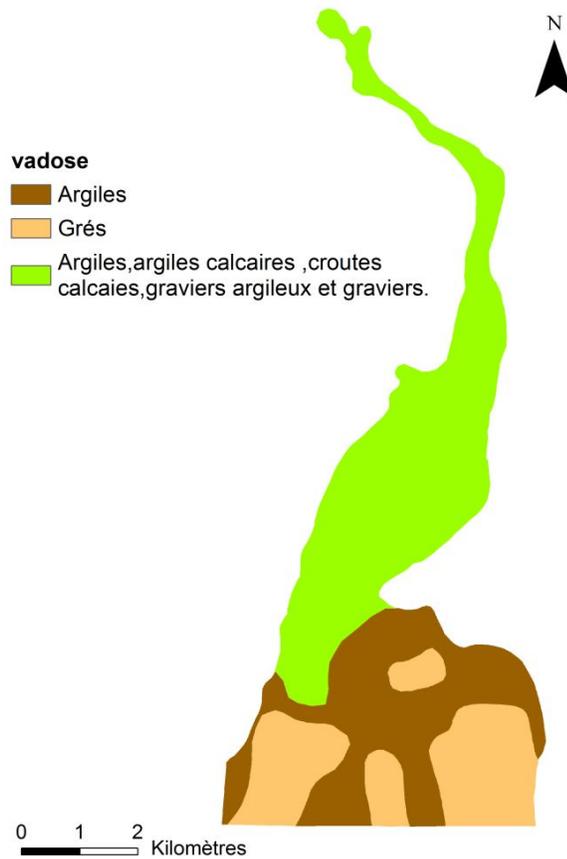


Figure 4.6: Carte de la zone vadose.

4.5 Recharge nette

"Recharge nette" ou "infiltration efficace", sont deux appellations différentes avec la même signification qui correspond au volume d'eau qui atteint la nappe depuis sa trajectoire de la surface du sol. Le paramètre "recharge" représente un poids important dans l'évaluation de la vulnérabilité, parce que c'est le véhicule de transport des polluants depuis la surface du sol jusqu'au plan d'eau de la nappe.

L'estimation de la recharge de l'aquifère est définie comme suit:

$$R_{nt} = R_{np} + R_{nI}$$

Où R_{nt} : recharge net totale.

R_{np} : recharge nette due aux précipitations.

R_{nI} : recharge nette due à l'irrigation.

4.5.1 Estimation de la recharge nette due aux précipitations

Il existe différentes méthodes pour l'estimation de la recharge. Le choix de la formule empirique de Kirchner [40], est justifié par le fait qu'elle est préconisée dans le cas d'une couverture alluviale de l'aquifère, ce qui est le cas de notre site d'étude.

$$R_{np} = 0.12(MAP - 20) \quad (mm) \quad (4.1)$$

Où MAP : précipitations moyennes annuelles en (mm).

En se basant sur les données pluviométriques moyennes annuelles des différentes stations utilisées, l'interpolation et l'application de la formule (4.1) à chaque pixel nous donnent la carte de recharge nette (Figure 4.7).

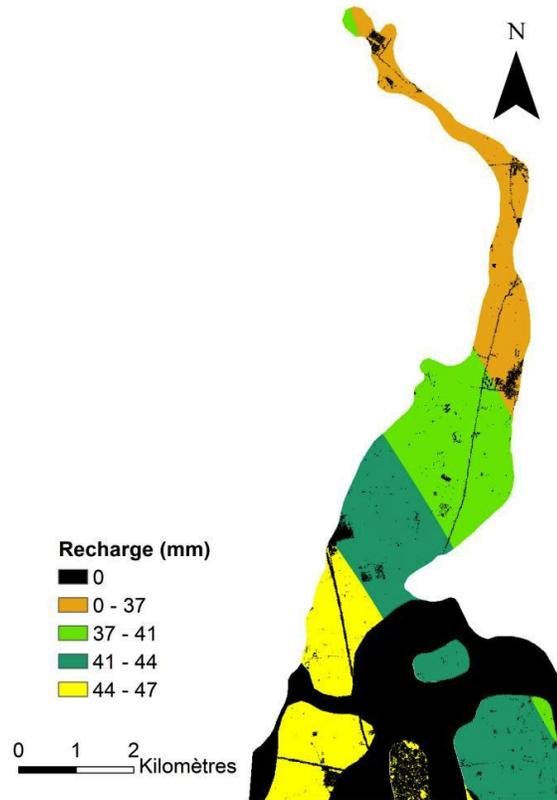


Figure 4.7: Carte de recharge nette due aux précipitations.

4.5.2 Recharge nette due à l'irrigation

La percolation d'eau d'irrigation provenant à la fois d'eau de surface et des eaux souterraines constitue l'une des principales composantes de la recharge souterraine [14].

La recharge due au flux de retour d'irrigation dans les eaux souterraines dans la plaine d'Hennaya est estimée par la méthode du ministère de l'eau indien [15] comme indiqué ci-dessous (Tableau 4.3).

$$R_{nI} = P\% \times \text{volume d'eau utilisé en irrigation.}$$

Table 4.3: Pourcentage (P) du volume d'eau d'irrigation.

[15]

Sources d'irrigation	Type de culture	Profondeur de la nappe		
		<10m	10-25m	>25m
Eaux souterraines	Autres que champs de riz	25	15	5
Eaux de surfaces	Autres que champs de riz	30	20	10
Eaux souterraines	Champs de riz	45	35	20
Eaux de surfaces	Champs de riz	50	40	25

Les volumes d'eau d'irrigation dans la plaine d'Hennaya sont estimés en fonction des cultures irriguées. Dans le cadre de l'établissement des bilans d'irrigations annuelles.

Le ministère de l'agriculture algérien a fixé un volume d'eau utilisé pour l'irrigation de 6000 m³/ha/an en moyenne. Les principales cultures irriguées dans la plaine d'Hennaya sont les agrumes et la pomme de terre, deux cultures gourmandes en besoins en eau.

Les besoins en eau estimés pour ces deux cultures sont évalués à 1200 m³/ha/an ou bien 12000 mm/an. Si on soustrait à ce chiffre les 400 mm/an des précipitations moyennes annuelles, on obtient 800 mm/an.

Pour la réalisation de la carte de recharge nette due à l'irrigation (Figure 4.8) l'estimation de 800 mm/an est prise en considération dans le cadre de cette étude au lieu du chiffre fixé par le ministère pour répondre à la réalité existante sur le terrain.

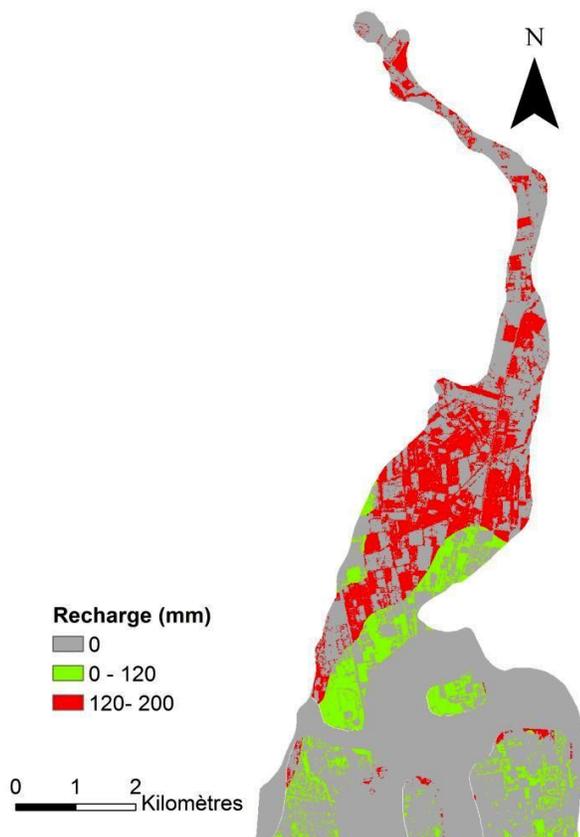


Figure 4.8: Carte de recharge nette due à l'irrigation.

Et finalement, l'addition de chaque pixel des deux cartes (Figure 4.7, Figure 4.8), nous permet d'obtenir la recharge nette totale dans la plaine d'Hennaya (Figure 4.9):

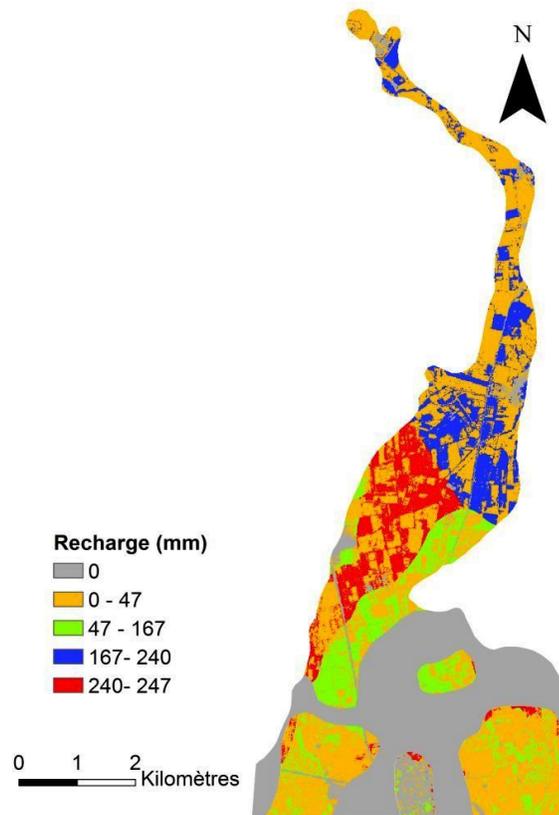


Figure 4.9: Carte de recharge totale.

4.6 Pluies efficaces

Les pluies efficaces sont égales à la différence entre les précipitations totales et l'évapotranspiration réelle.

L'estimation des pluies efficaces dans la plaine est calculée en appliquant l'équation de la méthode Smith [16].

$$ER = \begin{cases} \frac{P(125-0.2P)}{125}, & \text{pour } P \leq 250 \text{ mm/mois} \\ 125 + 0.1P, & \text{pour } P > 250 \text{ mm/mois} \end{cases}$$

Où ER : *effective rainfall*: pluies efficaces

P: précipitations.

Ce paramètre est utilisé uniquement dans le cadre de l'évaluation de la vulnéra-

bilité par la méthode DOPES avec une cotation en fonction des pluies efficaces mensuelles. Dans ce sens, les calculs de ce paramètre sont effectués en se basant sur la pluviométrie moyenne du mois le plus pluvieux qui est le mois de novembre des différentes stations pluviométriques prises en considération.

L'interpolation des données de chaque station et l'application de l'équation de Smith à chaque pixel génèrent la spatialisation des pluies efficaces dans la plaine d'Hennaya (Figure 4.10).

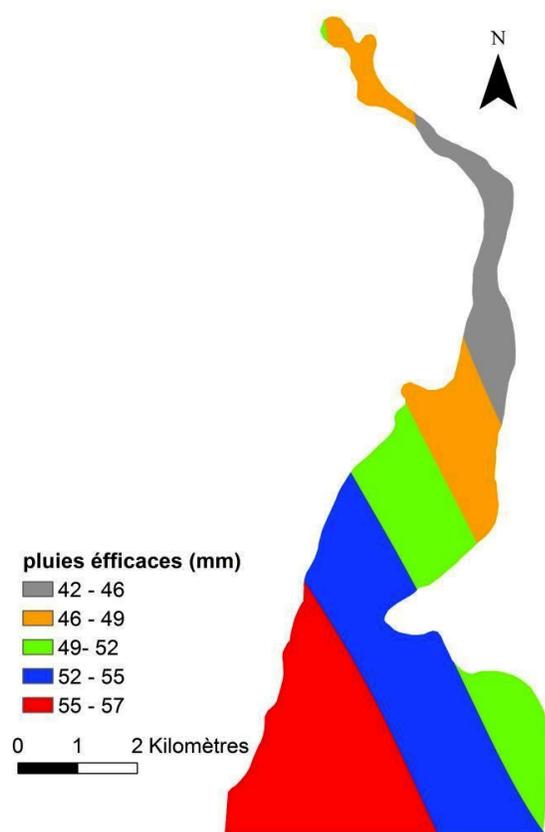


Figure 4.10: Carte des pluies efficaces.

On remarque que les pluies efficaces décroissent du Sud au Nord avec une faible variation des valeurs.

4.7 Conductivité Hydraulique des formations aquifères

La détermination des caractéristiques hydrodynamiques et notamment la perméabilité a été effectuée sur la base des données des essais de pompage réalisés par le bureau d'études Technoexportstray au niveau des puits existants (Figure 4.11):

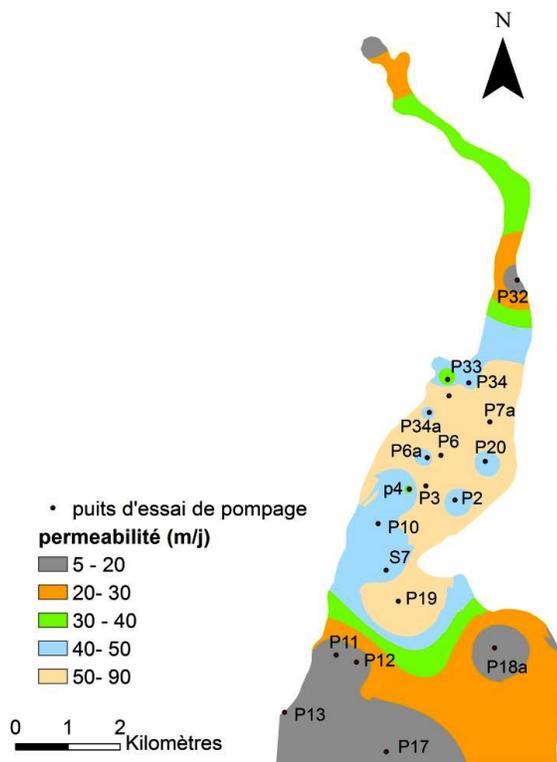


Figure 4.11: Carte des perméabilités.

La carte nous indique que la perméabilité est plus importante dans la partie centrale de l'aquifère au niveau du complexe commun conglomérats, travertins, graviers et graviers argileux.

4.8 Pédologie

La pédologie de la plaine d'Hennaya (Figure 4.12) est réalisée sur la base de la cartographie à l'échelle 1/20000 des sols de la commune, effectuée par le BENEDER (Bureau National d'études pour le Développement Rural) en novembre 2008.



Figure 4.12: Carte des sols de la plaine d'Hennaya.

La carte nous indique que les sols limoneux argileux dominent la plaine d'Hennaya et représentent 75,4% de sa surface totale.

4.9 Densité du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la plaine d'Hennaya a été réalisé à l'aide du logiciel Global Mapper en effectuant les étapes suivantes:

1. Téléchargement du DEM (Digital Elevation Model) gratuitement à partir du site UAF Alaska Satellite Facility, (NASA) avec une résolution Geotiff de 12,5m (Figure 4.13).

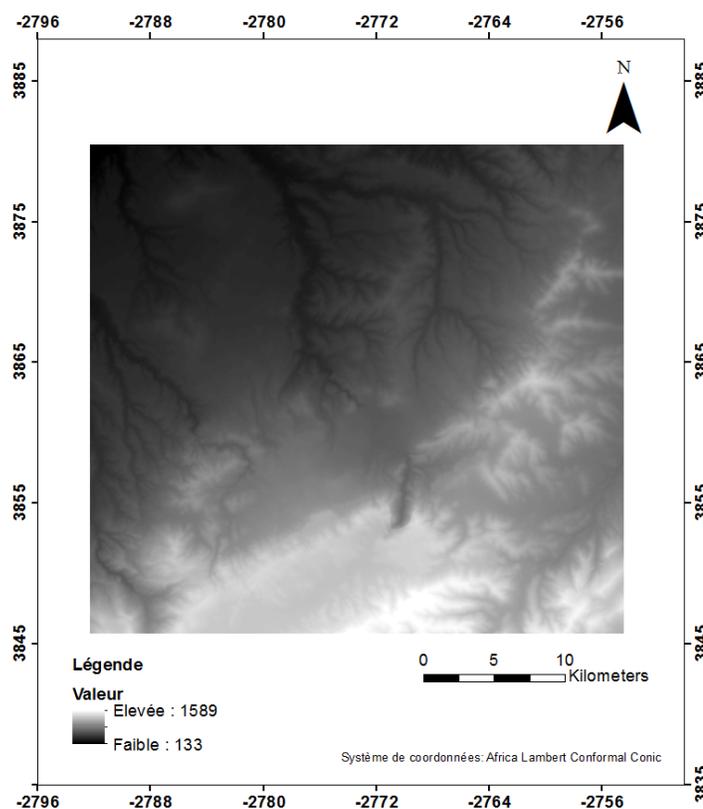


Figure 4.13: Carte DEM de la région d'Hennaya.

2. Importation du DEM dans le logiciel Global Mapper et utilisation de l'outil Watershed generation options, ce qui nous a permis de générer le réseau hydrographique (Figure 4.14):

La densité de drainage est définie comme étant le rapport de la longueur totale des cours d'eau sur la surface du bassin. Ce paramètre est utilisé dans l'étude de la vulnérabilité par la méthode DOPES. Dans ce cas, au lieu d'utiliser la surface du bassin versant on utilise la surface de l'aquifère. La formule est présentée comme suit:

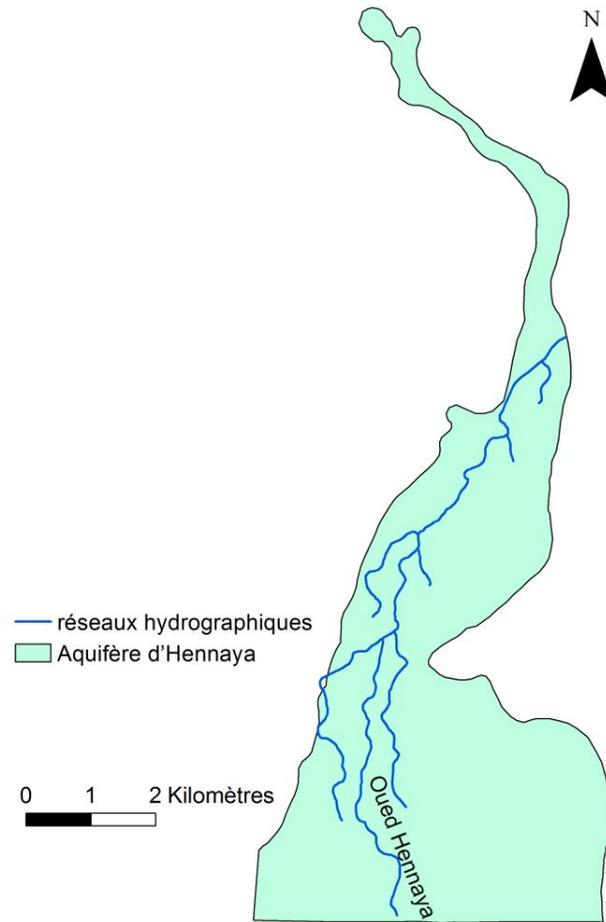


Figure 4.14: Carte du réseau hydrographique.

$$D_d = \sum_{x=1}^n \frac{L_X}{A}$$

Où L_X est la longueur totale de cours d'eau (Km).

A est la surface de l'aquifère (Km²).

$$D_d = 21,816/29,8 = 0,732$$

4.10 Vitesse de propagation de la nappe

La vitesse de l'eau influe sur la propagation des polluants dans la nappe et par conséquent, plus la vitesse est grande, plus la sensibilité de l'aquifère est importante. En absence de tests de traçage, la vitesse peut être estimée par la vitesse effective de l'eau souterraine (V_e), déduite de la loi de Darcy [39].

$$V_e = \frac{K \cdot i}{ne} \quad (4.2)$$

Où K conductivité hydraulique (m/s).

i gradient hydraulique.

ne porosité effective.

Le gradient hydraulique est donné par la formule suivante:

$$i = \frac{\Delta H}{L}$$

Où ΔH différence de potentiel entre les isopièzes.

L distance entre isopièzes.

ΔH et L sont calculés à partir de la carte piézométrique (Figure 2.12).

L'extraction de plusieurs points de ΔH et L à partir de la carte piézométrique, en effectuant des interpolations permet de générer la carte du gradient hydraulique (Figure 4.15):

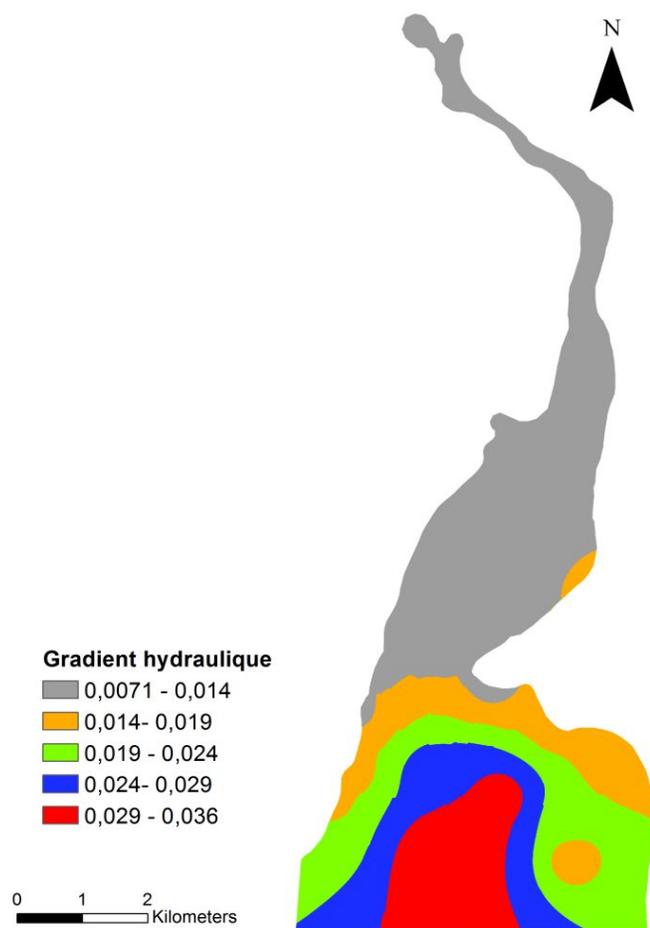


Figure 4.15: Carte du gradient hydraulique, (Juin2011).

D'après la carte, on remarque que le gradient hydraulique est plus faible dans la partie centrale et le nord par rapport au sud.

La porosité estimée des milieux géologiques est donnée par le tableau 4.4 suivant:

Table 4.4: Porosité totale.

Formations	Porosité totale	Sources
Alluvions	0.08-0.1	[96]
Grés	0.035-0.38	[13]
Pierre calcaire, dolomité primaire	0.005-0.125	[13]

L'application de la formule (4.2) permet de générer la carte des vitesses effectives dans les milieux aquifères (Figure 4.16):

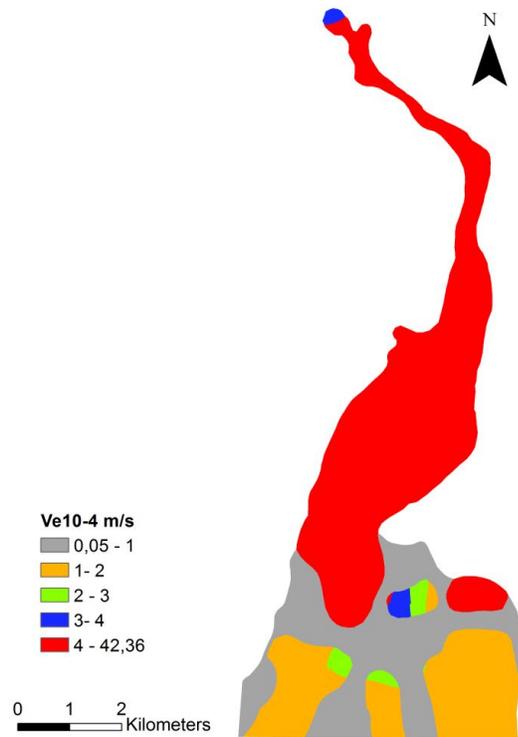


Figure 4.16: Carte des vitesses effectives.

On remarque que les vitesses sont grandes dans la partie centrale et au Nord par rapport au Sud.

4.11 Conductivité de l'eau

Durant la campagne piézométrique en 2011, des mesures in situ de la conductivité de l'eau ont été effectués.

L'interpolation des valeurs des conductivités de l'eau au niveau des puits d'observation permet de générer la carte des conductivités (Figure 4.17).

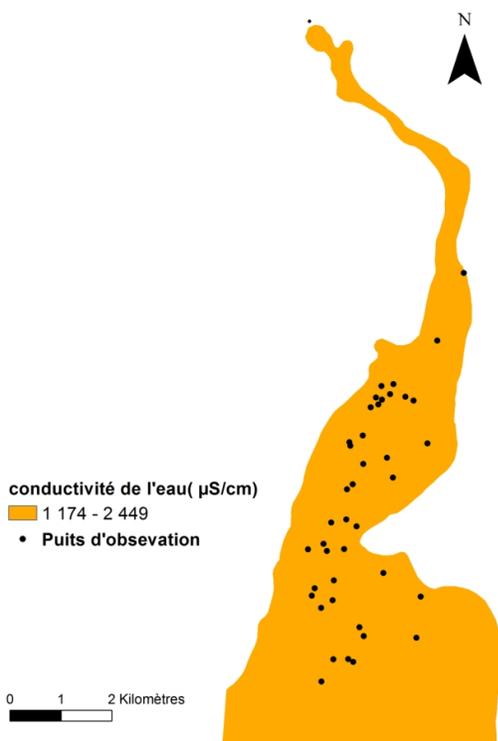


Figure 4.17: Carte de la conductivité de l'eau.

La conductivité caractérise le degré de minéralisation (Tableau 4.5) .

Nous remarquons sur la Figure 4.17, que la conductivité est supérieure à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, nous pouvons en conclure que les eaux souterraines de la plaine d'Hennaya ont une minéralisation élevée.

Table 4.5: Relation entre minéralisation et conductivité.

[21]

Conductivité (c) $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation
$100 < c < 200$	faible
$200 < c < 333$	moyenne
$333 < c < 666$	moyenne accentuée
$666 < c < 1000$	importante
$c > 1000$	élevée

4.12 Productivité de la nappe

Sur la base des essais de pompage effectués au niveau des ouvrages captant la nappe (Figure 4.18), par le bureau d'étude Technoexportstroy, la carte de l'abondance en eau dans la plaine d'Hennaya est établie.

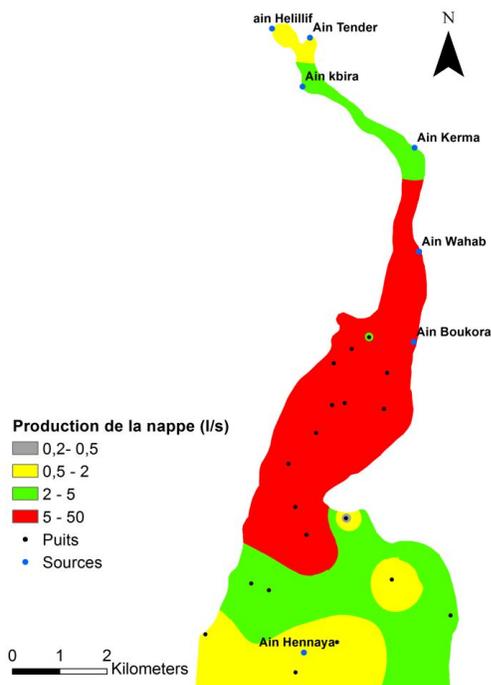


Figure 4.18: Carte de productivité de la nappe.

On remarque que la productivité de la nappe est beaucoup plus importante dans

le centre et au nord par rapport au sud qui est faible.

4.13 Conclusion

La caractérisation des paramètres pour la détermination de la vulnérabilité révèle que la zone d'étude a une topographie de faible à moyenne, la superficie irriguée est de 1121 ha, la profondeur de la nappe comprise entre 10 et 20 m est la plus importante, l'aquifère est alluvionnaire avec une couverture argileuse au Sud qui entrave l'infiltration. La recharge varie entre 37 mm et 247 mm.

Les pluies efficaces présentent une faible variation de 42 à 57 mm, la perméabilité est plus importante dans la partie centrale de l'aquifère, la pédologie du sol est généralement limoneux-argileux, le réseau hydrographique est faible, les vitesses de propagation de la nappe sont importantes dans la partie centrale et au Nord par rapport au Sud. La minéralisation des eaux souterraines est élevée, enfin la production de la nappe est beaucoup plus importante dans le centre et au nord de l'aquifère.

Chapitre 5

Application des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

5.1 Présentation des résultats d'évaluation de la vulnérabilité

En se basant sur la caractérisation des différents paramètres déterminant la vulnérabilité des eaux souterraines, tout en utilisant l'outil de reclassification dans ArcGis et en respectant la cotation, la pondération et l'application des formules pour chaque méthode utilisée, nous avons pu générer les cartes de vulnérabilité (Figure 5.1).

Dans cette étude, l'application des méthodes est conforme à ce qui est présenté dans la littérature, sauf pour la méthode DOPES, où une modification a été faite, car l'utilisation de cette méthode telle qu'elle est, ne donne pas des résultats satisfaisant du fait qu'elle ne tient pas compte des caractéristiques de la zone vadose.

Dans notre approche, la zone d'aquifère confinée avec des épaisseurs considérables d'argiles dans la plaine d'Hennaya sera logiquement évaluée de faible vulnérabilité. Ceci est dû aux faibles cotations attribuées à l'argile pour les méthodes paramétriques, la recharge est nulle dans cette partie d'aquifère et les profondeurs sont importantes. Globalement, pour la méthode DOPES, la zone d'aquifère confiné n'est pas évaluée et elle est classée directement de faible valeur de vulnérabilité.

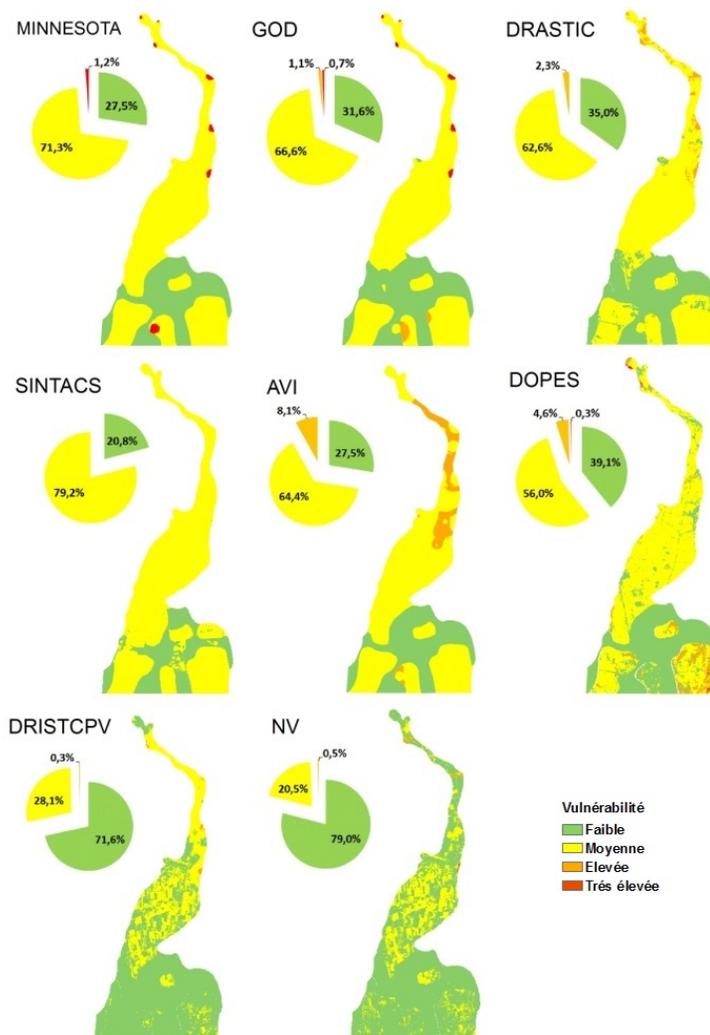


Figure 5.1: Carte des différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité avec % de surface.

Dans le but de pouvoir comparer le degré de vulnérabilité pour les huit méthodes utilisées, l'uniformité des classes est obligatoire pour une bonne interprétation. Quatre classes sont retenues dans cette étude, à savoir, faible, moyenne, élevée et très élevée. Pour les méthodes qui présentent cinq classes, on a unifié la classe faible et très faible en une seule.

Les résultats de la classification du degré de la vulnérabilité fait ressortir de visu deux groupes de concordance. Le premier groupe comporte DRASTIC, SINTACS, GOD, DOPES, Minnesota et AVI. Le deuxième groupe comporte NV et SINAN.

Le premier groupe présente une vulnérabilité moyenne qui varie entre 56 et 79% de la surface totale et une vulnérabilité faible qui varie entre 20,82% et 33,14%. Par contre c'est presque le contraire pour le deuxième groupe, qui présente une vulnérabilité moyenne qui varie entre 20,50 et 28,12% et une vulnérabilité faible qui varie entre 71,5 et 79%.

Conclusion faite, ces deux groupes divergent dans l'évaluation de la vulnérabilité.

Concernant la méthode NV, en analysant comment cette méthode a été établie, on constate que c'est la méthode d'évaluation de la vulnérabilité DRASTIC multipliée par un coefficient. Voilà pourquoi, on ne s'attend pas à avoir un accord entre ces deux méthodes. Ensuite, si elle ne concorde pas avec la méthode DRASTIC. Cela veut dire qu'il n'y a pas de commun accord avec le premier groupe.

La méthode NV offre une grande précision dans les estimations vis à vis de l'impact réel de chaque type d'utilisation des terres [30]. Dans notre cas d'étude, cette hypothèse doit être confirmée par des analyses chimiques des eaux souterraines.

Si les analyses sont positives et que la méthode NV est confirmée, la méthode SINAN présentera un réel intérêt, du fait de son accord commun avec la méthode NV sans tenir compte de calculs de l'occupation de sol dans ces étapes.

DRASTIC est parmi les modèles les plus utilisés au monde, rien qu'en matière des travaux publiés, une quantité très considérable est disponible pour les chercheurs. Dans ce sens, beaucoup de travaux se basent sur cette méthode pour la comparaison avec de nouvelles méthodes mises au point.

La cohérence des méthodes DRASTIC, SINTACS, GOD, MINNESOTA et AVI est logique dans ce travail. C'est parce que ces méthodes sont très connues dans la

littérature par leurs fiabilités des résultats On constate aussi pour le premier groupe, que la vulnérabilité est importante dans l'aquifère libre et faible dans la partie captive. La méthode DOPES adhère au premier groupe après modification. C'est une méthode intéressante par sa simplicité des paramètres. Son inconvénient, c'est qu'elle ne prend pas en considération les caractéristiques de la zone vadose, alors que ce paramètre est un élément clé dans l'étude de la vulnérabilité intrinsèque.

Dans notre approche pour cette méthode, l'évaluation de la vulnérabilité a été faite uniquement dans les zones perméables et semi perméables dans la partie non saturée de l'aquifère. Pour la partie imperméable, nous l'avons considéré de faible vulnérabilité et les résultats sont satisfaisants.

5.2 Validation des cartes d'évaluation de la vulnérabilité

Dans la littérature, deux méthodes sont utilisées pour la validation. La première, la plus utilisée, est l'analyse chimique des eaux souterraines avec la confrontation des résultats par rapport au degré de vulnérabilité.

La deuxième est la comparaison avec d'autres méthodes.

La validation en fonction des données d'analyses chimiques est conditionnée par l'inventaire des quantités de matières polluantes présentes à la surface et la fréquence d'analyse des éléments chimiques.

Ainsi, à titre d'exemple, si on procède à une validation par les concentrations aux nitrates dans les zones agricoles, l'utilisation de très faibles quantités d'engrais dans une zone de forte vulnérabilité donnera des concentrations de nitrates faibles dans une zone très sensible. Dans ce cas, statistiquement, la cohérence entre les zones et l'analyse chimique sera faible, par conséquent la validation est fautive.

La remarque faite dans beaucoup de travaux publiés, l'inventaire des quantités de matières polluantes et la fréquence d'analyses chimiques ne sont pas pris en considération, nous citons à titre d'exemple les travaux suivants: [93],[97],[98].

Si on se réfère au suivi de nitrates, les quantités utilisées varient temporellement.

La validation avec une seule analyse faussera les résultats et l'interprétation des résultats d'étude de la vulnérabilité sera à revoir.

En plus, des investigations de terrain doivent être entreprises pour compléter la validation, l'état des lieux des ouvrages captant la nappe est d'une grande importance.

Ce qui n'est pas le cas dans la plaine d'Hennaya. Les puits agricoles réalisés illicitement n'ont subi aucun aménagement (Figure 5.2), mise à part les puits réalisés durant la période coloniale.

Ajouter à cela, en Algérie, les ouvrages de captages illicites ne sont pas contrôlés et il n'y a pas suivi durant la réalisation.

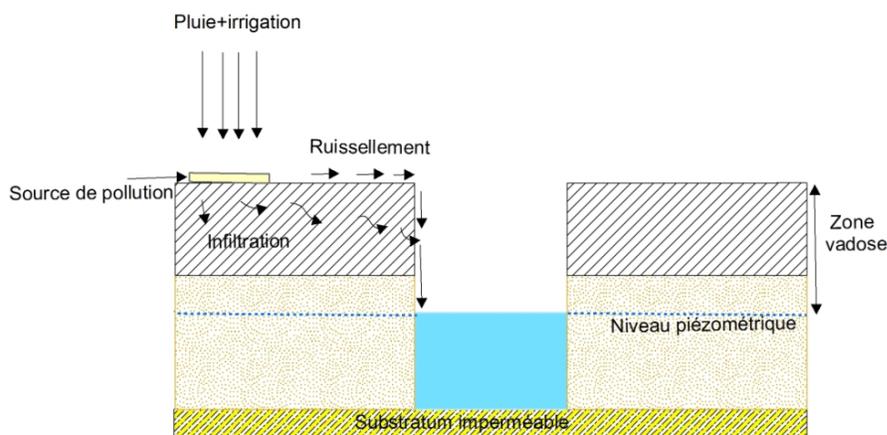


Figure 5.2: Schéma des puits dans la plaine d'Hennaya.

Dans cette situation, la pluviométrie ou bien l'irrigation véhiculent les polluants directement vers les eaux des puits et la couche protectrice de l'aquifère qui est la zone vadose, ne joue aucun rôle.

Dans ce cas de figure, la validation des cartes de vulnérabilité par les analyses chimiques des eaux souterraines n'a pas de sens et elle peut se faire par l'évaluation de l'adéquation entre les différentes méthodes utilisées.

La corrélation statistique spatiale grâce au test de Kappa est utilisée pour évaluer l'adéquation des résultats obtenus pour chacune des 08 méthodes.

Dans notre approche, toutes les méthodes sont prises comme références à tour de

rôle pour la comparaison, la méthode prise en considération est celle qui corrèle avec le plus de méthodes.

Dans ce sens, un classement est fait en admettant que deux cartes sont en accord si le coefficient Kappa est supérieur à 0.5, (Tableau 4.1).

Pour répondre à l'objectif de validation, 624 points sont choisis comme zones tests (Figure 5.3).

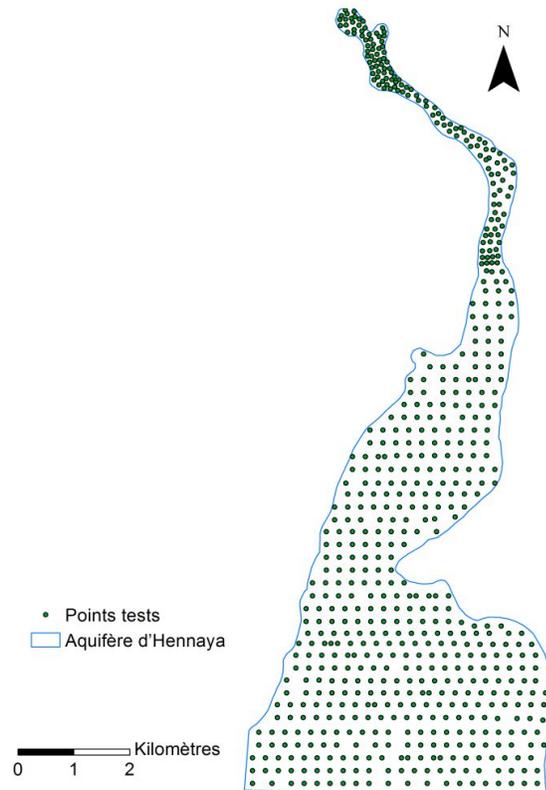


Figure 5.3: Spatialisation des points choisis comme zones tests pour la validation.

Le coefficient de Kappa est calculé à partir des matrices de confusion.

56 matrices sont réalisées pour répondre à l'objectif de validation, dont on présente un cas ci-dessous (Tableau 5.1):

Table 5.1: Matrice de confusion entre la méthode GOD et DOPES avec Excel.

		DOPES				Total général
		faible	moyen	élevée	très élevée	
GOD (référence)	faible	150	57	4	2	213
	moyen	23	348	-	4	375
	élevée	2	31	-	1	34
	très élevée	-	2	-	-	2
	Total général	175	438	4	7	624

Par la suite, le coefficient de Kappa est calculé (Tableau 5.2) pour voir dans quelle mesure les cartes diffèrent les unes des autres.

Table 5.2: Matrice de test de corrélation entre les différentes méthodes utilisées.

	DRASTIC	NV	SINTACS	DROPES	GOD	AVI	MINNESOTA	SINAN
DRASTIC	1,00	0,22	0,52	0,53	0,77	0,55	0,75	0,34
NV	0,21	1,00	0,10	0,22	0,18	0,15	0,16	0,46
SINTACS	0,53	0,10	1,00	0,49	0,66	0,54	0,74	0,20
DROPES	0,53	0,22	0,49	1,00	0,58	0,48	0,64	0,32
GOD	0,78	0,18	0,66	0,58	1,00	0,64	0,86	0,34
AVI	0,55	0,15	0,54	0,48	0,64	1,00	0,70	0,17
MINNESOTA	0,75	0,16	0,74	0,64	0,86	0,70	1,00	0,30
SINAN	0,35	0,46	0,21	0,32	0,34	0,17	0,30	1,00

Ensuite, un classement est effectué par rapport au nombre d'adéquation entre différentes méthodes. En cas d'exéco, on procède par classement dont le coefficient Kappa est le plus grand (Tableau 5.3).

Table 5.3: Classement des méthodes pour le premier groupe.

Méthode	Classement
Minnesota	1
GOD	2
DRASTIC	3
SINTACS	4
AVI	5
DOPES	6

Dans cette étude, c'est le premier groupe qui est pris en considération, puisqu'il comporte plus de conformité entre les méthodes.

D'après le tableau de classement, la méthode Minnesota est classée en première position. Ce cas répond largement à notre objectif d'étude, parce que c'est une méthode qui se base uniquement sur les caractéristiques de la zone vadose, à savoir, sa perméabilité, son épaisseur et la nature des formations géologiques.

Et en plus, sa corrélation avec la méthode DRASTIC est presque parfaite avec un coefficient de Kappa de 75%. La méthode DRASTIC est très connue et utilisée partout dans le monde pour la fiabilité de ses résultats.

Plusieurs auteurs se sont basés sur cette méthode en la prenant comme référence pour la comparaison de leurs résultats.

La carte de vulnérabilité de la méthode Minnesota fait ressortir trois classes (Figure 5.4):

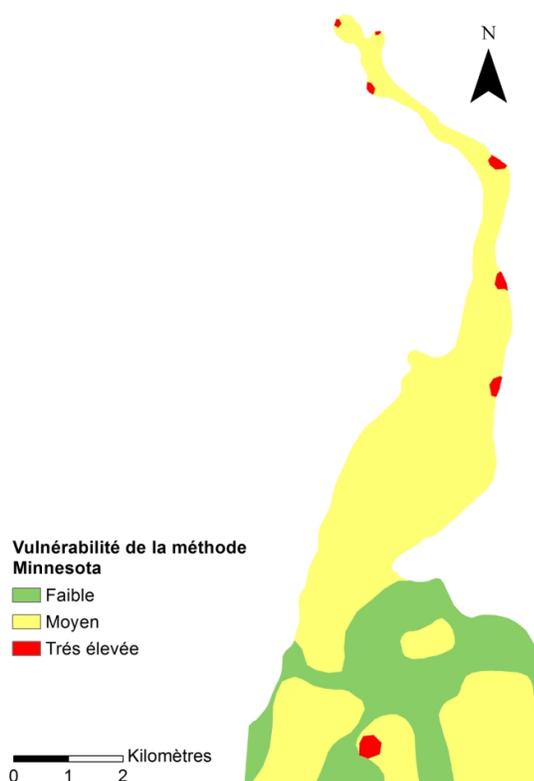


Figure 5.4: Carte de vulnérabilité par la méthode Minnesota.

Les valeurs très élevées de vulnérabilité se situent au niveau des résurgences de la nappe.

Les zones de vulnérabilité faible qui représentent 27,5% de la surface totale sont dans la partie confinées de l'aquifère au niveau de l'agglomération d'Hennaya au sud et cela peut être favorable à la protection contre la pollution urbaine.

Les résultats de la carte montrent aussi une vulnérabilité moyenne avec 71,3% de la surface totale. C'est la classe de vulnérabilité la plus importante de l'aquifère qui se situe dans les grès qui affleurent au sud et dans la partie centrale et nord de l'aquifère des unités hydrogéologiques conglomérat, travertins, graviers et graviers argileux.

Finalement, la carte de vulnérabilité établie par la méthode Minnesota constituera un outil d'aide à la décision dans le cadre de la protection de la nappe contre la pollution, due aux activités anthropiques qui sont dans notre cas d'étude les activités agricoles.

Ce qu'on peut dire aussi la validation effectuée est une validation primaire, la validation finale est conditionnée par un suivi qualitatif et quantitatif des analyses chimiques des eaux souterraines. Mais ceci dépend des aménagements des puits existants pour protéger les nappes des polluants qui s'écoulent directement au niveau de ces puits.

Dans ce cadre, deux solutions sont proposées :

1. Régulariser les puits illicites existants par des arrêtés, puisque ça fait des années qu'ils sont en exploitation.
2. L'accompagnement des fellahs par des conseils techniques et pratiques pendant l'aménagement de leurs puits afin que cette action soit réalisée dans les règles de l'art.

5.3 La cartographie des aléas et du risque

5.3.1 Cartographie des aléas

La notion d'aléa c'est la probabilité des potentialités des contaminants due aux actions anthropiques susceptibles de provoquer des modifications de la qualité des eaux souterraines.

La cartographie de l'aléa caractérise le danger des polluants potentiels sur les eaux souterraines.

Les aléas sont classés en trois axes principaux (Tableau 5.4).

Table 5.4: Catégories d'aléas .

[47]

Numéro	Catégorie niveau 1 du danger	Catégorie niveau 2 du danger
1	Infrastructure de développement	eaux usées déchets municipaux carburants transport et trafic installations de loisir dangers divers
1.1		
1.2		
1.3		
1.4		
1.5		
1.6		
2	Activités industrielles	exploitation minière (exploitée et abandonnée) fouilles exploration pétrolière et gazières installations industrielles (non minières) centrales électriques stockage industriel détournement et traitement des eaux usées
2.1		
2.2		
2.3		
2.4		
2.5		
2.6		
2.7		
3	Élevage et agriculture	élevage agriculture
3.1		
3.2		

Évaluation des aléas (dangers) par la méthode cost 620

À l'approche européenne ou l'action cost 620, intitulée "cartographie de la vulnérabilité et du risque pour la protection des aquifère en milieu Karstique" est un forum qui a réunit des experts de 16 pays d'Europe, dans le but d'établir des concepts de gestion des terrains Karstiques.

L'évaluation de l'indice de l'aléa de la méthode cost 620 [47] se fait grâce à la formule suivante:

$$H_i = H.Q_n.R_f$$

Où, H_i : indice de l'aléa.

H : poids de l'aléa.

Q_n : facteur de classement, (varie entre 0,8 à 1,2).

R_f : Facteur de réduction (varie entre 0 et 1).

La classification du niveau de danger est donnée par le tableau 5.5 suivant:

Table 5.5: Classes d'indice de l'aléa.

Indice de danger	Classes des indices du danger	Niveau du danger
0 - 24	1	Très faible
>24 - 48	2	Faible
>48 - 72	3	Modéré
>72 - 96	4	Élevé
>96 - 120	5	Très élevé

Les poids de l'aléa varient de 10 à 100 suivant le type de danger. L'exploitation des valeurs des poids pour les appliquer à notre région d'étude a fait l'objet de certaines remarques qui nous ont induit à chercher une autre méthode pour évaluer l'aléa.

Le poids attribué au rejet des eaux usées dans les oueds est de 45. L'aléa maximal dans ce cas est de 54 avec $Q_n = 1, 2$ et par suite, l'aléa est classé au niveau modéré. Dans notre région d'études, les rejets des eaux usées dans les oueds représentent un grand danger, surtout en été. L'interaction des nappes avec les oueds en plus de l'infiltration des eaux usées présentent un risque de contamination élevé. L'analyse de l'attribution de la valeur de 45 pour les rejets des eaux usées pour l'approche européenne est basée sur le fait que ces pays exigent un traitement des rejets non domestiques pour le déverser dans le réseau public d'assainissement et la réglementation est sévèrement appliquée. En Algérie, ce n'est pas le cas, la réglementation est régie par les normes de rejet du décret exécutif n° 09-209 du 11 juin 2009, fixant les

modalités pour l'octroi de l'autorisation de déverser des eaux usées non domestiques dans un réseau public d'assainissement ou dans une station d'épuration.

Mais l'application de la réglementation sur terrain demande beaucoup d'efforts et un investissement financier important, ce qui limite sérieusement son application. Par suite, ces rejets ont un impact très important sur la pollution des eaux souterraines.

Ceci est valable même pour les zones agricoles intensives, l'aléa maximal est de 36 la classification du danger est "faible". Alors que l'agriculture intensive par l'utilisation d'engrais et de pesticides est connue pour être à l'origine de pollution des aquifères.

En conclusion, nous pouvons dire que l'application ou l'adaptation de cette méthode à notre région d'études nous a laissé perplexe pour trouver une autre méthode d'évaluation du danger.

Évaluation des aléas, approche probabiliste

La démarche d'évaluation des aléas retenue par le Ministère Québécois est inspirée des méthodes d'évaluation préconisées dans le domaine de l'eau potable par l'Organisation mondiale de la Santé. La détermination du danger combine la gravité des conséquences avec la probabilité que l'évènement se produise (Tableau 5.6) .

Table 5.6: Évaluation du potentiel du danger associé à un évènement potentiel.

[48]				
Probabilité	Gravité des conséquences			
	(1) Mineures	(2) Sérieuses	(3) Graves	(4) Catastrophiques
Presque certain (A)	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
Possible (B)	Très faible	Faible	moyen	Élevé
Peu possible (C)	Très faible	Très faible	Faible	Moyen

- Évaluer la gravité des conséquences

Pour évaluer la gravité des conséquences, il faut d'abord associer à l'activité ou à l'évènement l'un des quatre niveaux de gravité définis au tableau 5.7 en tenant uniquement compte des caractéristiques de cette activité ou de cet évènement.

Ces caractéristiques incluent la nature de l'activité ou de l'événement et son importance, de même que le type et la quantité de contaminants qu'ils rejettent ou est susceptible de rejeter dans l'environnement. Dans le cas des événements potentiels, il faut considérer le pire des scénarios raisonnablement envisageables [48].

Table 5.7: Définitions de la gravité des conséquences d'une activité ou d'un événement

[48]

Gravité des conséquences	Définition
Mineure	Problème de qualité de l'eau esthétique ou organoleptique perceptible par les consommateurs, mais pouvant être toléré par ceux-ci
Sérieuse	Problème de qualité de l'eau esthétique ou organoleptique inacceptable pour les consommateurs
Grave	Contamination de l'eau pouvant avoir un effet sur la santé de la population à la suite d'une exposition à long terme (contamination chimique à des concentrations représentant des risques de toxicité chronique)
Catastrophique	Contamination de l'eau pouvant avoir un effet sur la santé de la population à la suite d'une exposition à court terme (contamination microbiologique ou contamination chimique à des concentrations suffisamment importantes pour représenter des risques de toxicité aiguë)

- Évaluer la fréquence ou la probabilité

Pour évaluer la fréquence ou la probabilité de libération de contaminants associée à une activité ou à un événement, il faut la déterminer, par une estimation ou des données disponibles, et la catégoriser selon les définitions du tableau 5.8 [48].

Table 5.8: Catégories de probabilité applicables à l'évaluation des potentiels du danger associés aux événements potentiels.

[48]

Probabilité	Définition
Presque certain	Il est presque certain que l'événement se produira au moins une fois dans les cinq prochaines années.
Possible	Il est possible que l'événement se produise au cours des cinq prochaines années.
Peu probable	Il est concevable que l'événement puisse se produire, mais il y a peu de risques que cela se produise dans les cinq prochaines années.

La classification des types d'aléas dans la région d'études par la méthode probabiliste est donnée comme suit (Tableau 5.9) :

Table 5.9: Classification des types d'aléas.

Type d'aléa	Classification
- Urbanisation avec tuyaux d'égouts qui fuient.	(B-3) - moyen
- Rejets d'eau usées dans les oueds	(A-3) - Élevé
- Routes	(B-3) - moyen
- Cimetière	(C-2) - Très faible
- Élevage	(B-2) - faible et (B-3) - moyen
- Zone agricole intensive	(A-3) - Élevé
- Irrigation avec les eaux usées	(A-4) - Très élevé
- Les points d'eau	(A-4) - Très élevé

Les cartes d'aléas sont réalisées conformément au tableau 5.9, (Figure 5.5,5.6) :

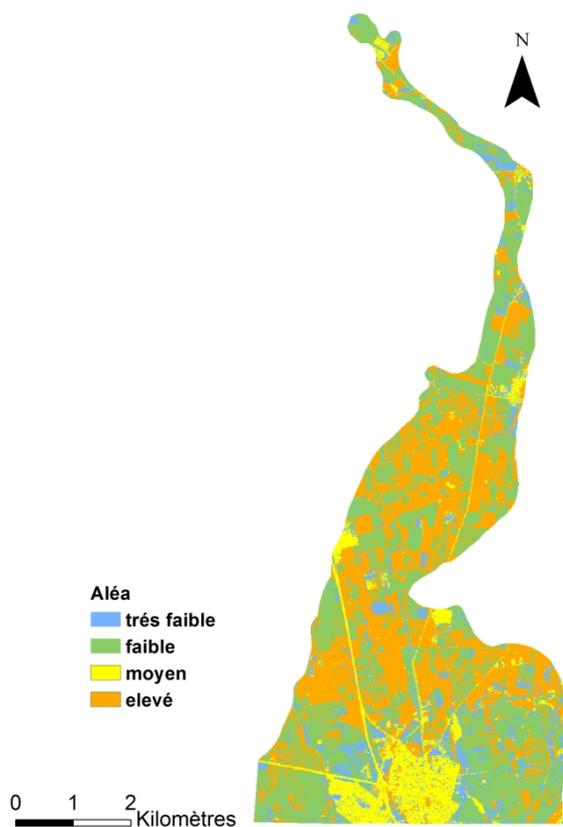


Figure 5.5: Carte d'aléas classés dues à l'occupation du sol.

On remarque que les dangers moyens et élevés sont présents au sud et au nord dans une grande superficie de la plaine; ce qui explique le taux de nitrates dépassant les normes dans presque tous les points d'eau.

Avec le mode de vie actuel et l'utilisation de divers produits chimiques toxiques, l'irrigation avec les eaux usées est très nocive pour l'environnement, elle est donc classée dans l'aléa "très dangereux".

L'aléa des points d'eau est classé "très dangereux" car d'abord le niveau piézométrique à proximité des sources est très faible, ensuite les puits d'eau agricole n'ont subi aucun aménagement de protection.

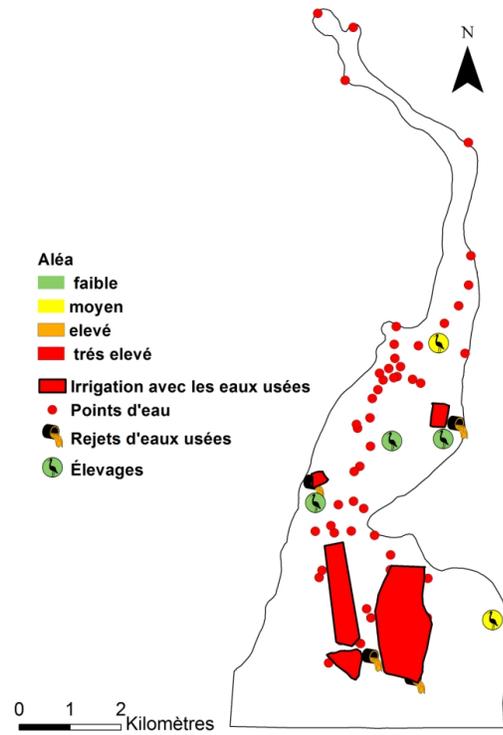


Figure 5.6: Carte d'aléas dues à diverses sources de pollution.

5.3.2 Cartographie du risque

La carte à risque est le croisement de la carte d'aléa et de la carte de vulnérabilité.

L'indice du risque est donné par la formule suivante:

$$R_i = A + B$$

Où R_i : indice du risque.

A : classe de l'indice de l'aléa.

B : Classe de l'indice de vulnérabilité.

Le degré et classe du risque, les classes de l'aléa et de la vulnérabilité sont donnés par le tableau suivant (Tableau 5.10):

Table 5.10: Le degré et classe du risque et les classes de l'aléa.

Niveau d'aléa et vulnérabilité intrinsèque	Classe d'aléa et vulnérabilité	Indice du risque	Classe du risque	Niveau du risque
Très faible	5	-	-	-
Faible	4	>7	1	Faible
Moyen ou modéré	3	5 - 6	2	Moyen
Fort ou élevé	2	1 - 4	6	Élevé
Très fort	1	-	-	-

Les cartes à risque sont réalisées comme suit (Figure 5.7,5.8) :

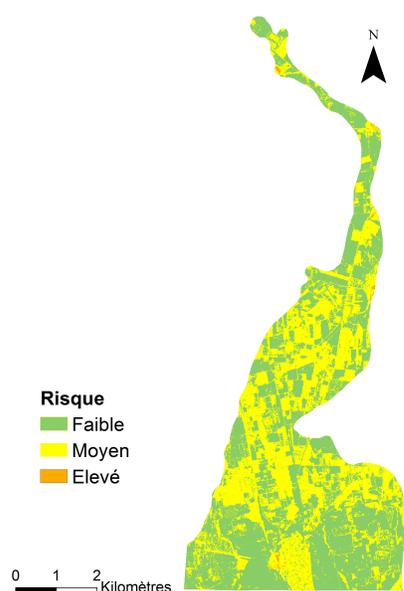


Figure 5.7: Carte à risque due à l'occupation du sol.

On remarque que le risque est "moyen" dans les zones à vocation arboricoles et maraichères, il peut être atténué en contrôlant l'utilisation des pesticides et des engrais. Par contre, au sud, le risque qui est dû aux fuites des réseaux d'assainissement dans les zones urbaines est très difficile à gérer et exige un important investissement pour résoudre le problème.

La superficie irriguée par les eaux usées a considérablement diminué ces dernières années à cause de la répression exercée par les autorités. Ce risque va complètement

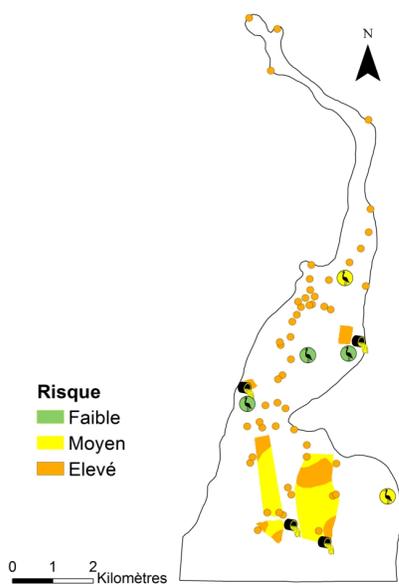


Figure 5.8: Carte à risque due à diverses sources de pollution.

disparaître grâce à un projet de réalisation d'une station d'épuration à Hennaya, qui est programmé pour le quinquennat prochain et qui traite les rejets de la partie ouest de Tlemcen ainsi que ceux d'Hennaya.

L'élimination du risque dû aux puits existants est faisable par leur réaménagement, reste à trouver une formule par les autorités locales pour obliger les agriculteurs à réaliser cette action.

5.4 Discussion des résultats obtenus

L'application des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité fait ressortir un groupe comportant six méthodes, à savoir, Minnesota, GOD, DRASTIC, SINTACS, AVI, DOPES.

La méthode Minnesota est classée en première position, ceci a été fait par le test statistique spatial du coefficient KAPPA avec la comparaison de corrélation entre les différentes méthodes du groupe.

La méthode Minnesota répond à l'objectif de l'étude, puisqu'elle se base sur deux paramètres et qu'elle est en accord presque parfait avec la méthode DRASTIC pour un coefficient KAPPA de 75%. Cette méthode présente aussi un grand avantage dans le cas où on dispose de peu de données sur les zones non saturées par l'utilisation du niveau 1 pour l'évaluation de la vulnérabilité.

Cette méthode a fait ressortir trois classes de vulnérabilité qui sont : 1,2% pour la classe "très élevée", 27,5% pour la classe "faible" et 71,3% pour la classe "moyenne" par rapport à la surface totale.

La validation primaire est faite par comparaison avec d'autres méthodes, mais la validation finale est conditionnée par les analyses chimiques des eaux souterraines.

La fiabilité d'interprétation des résultats est liée à l'aménagement des puits existants. Des solutions sont proposées dans cette étude pour mener les agriculteurs à réaliser des aménagements comme la régularisation des puits illicites et l'interdiction des aides de l'état pour ceux qui ne répondent pas à un cahier de charges établis par les autorités locales.

Chapitre 6

Périmètres de protection et réglementation

6.1 Délimitation des périmètres de protection

An niveau du périmètre d'Hennaya, deux sources sont utilisées pour l'AEP, la première est la source d'Ain Boukora qui est captée traditionnellement, elle enregistre un débit très faible de l'ordre de 0.2 l/s pendant la période des hautes eaux. De ce fait, nous n'avons pas jugé intéressant de l'envisager dans cette étude.

La deuxième source est celle d'Ain Wahab, elle est branchée au réseau d'AEP alimentant la région avec un débit moyen de 5l/s. Actuellement, ce captage est contaminé, (source DRE Tlemcen) et la zone d'étude ne compte aucun périmètre de protection réglementaire. La détermination des aires de protection de ces captages est une nécessité pour préserver la qualité de la source d'eau pour la consommation humaine.

6.1.1 Protection immédiate

L'aménagement de l'ouvrage de captage de source en question doit répondre aux normes de techniques de réalisation. Dans certains pays comme le Canada, ces aménagements sont réglementés (Figure 6.1):

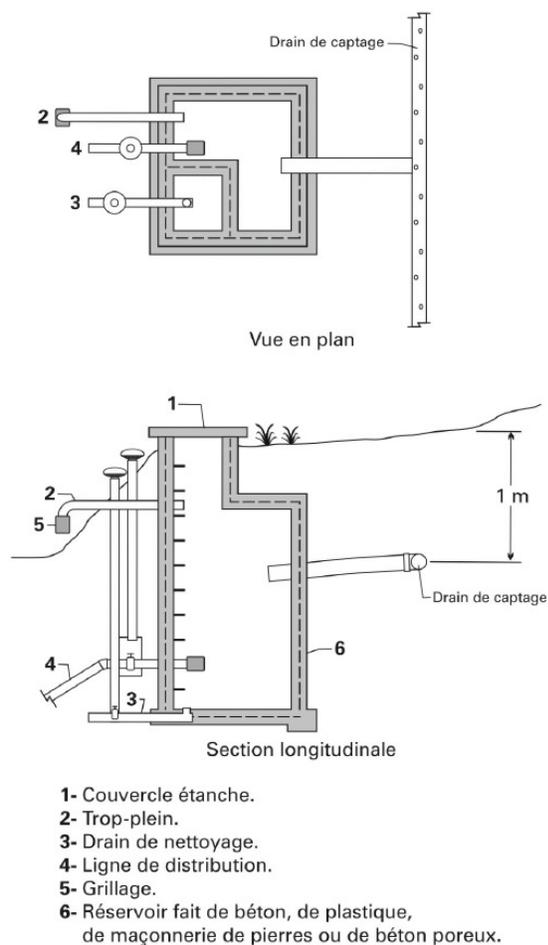


Figure 6.1: Schéma d'aménagement d'un ouvrage de captage de source [10].

Le PPI a pour but d'empêcher la contamination directe de l'eau de source et correspond à la parcelle où est implémenté l'ouvrage. Le propriétaire est exproprié de cette surface.

Le PPI doit être délimité en réalisant une clôture autour de la source avec une porte d'accès sécurisé. Toutes les activités à l'intérieur sont interdites mise à part l'entretien et l'exploitation de l'ouvrage.

Les distances de clôture sont réglementées en USA, elles sont supérieures à 30m. En Burundi, un guide pour la protection des captages a été établi en coopération Allemande. Il spécifie que le PPI pour les sources doit avoir une distance minimum

de 30m vers l'amont topographique, 5m vers l'aval et 5m à droite et à gauche de la source (Figure 6.2):

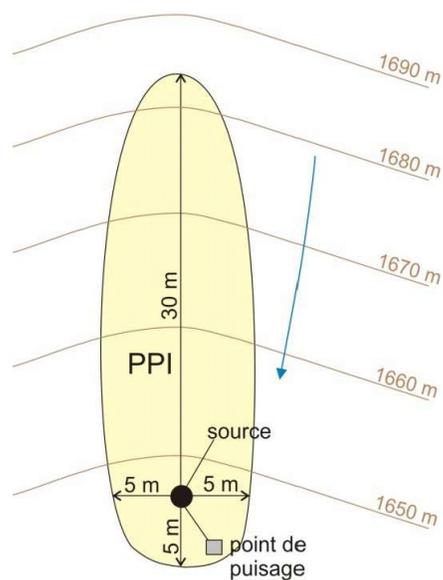


Figure 6.2: PPI d'une source au Burundi [11].

Si le point de puisage est situé à moins de 5 m à l'aval de la source, il doit être protégé par une dalle de béton (Figure 6.3):

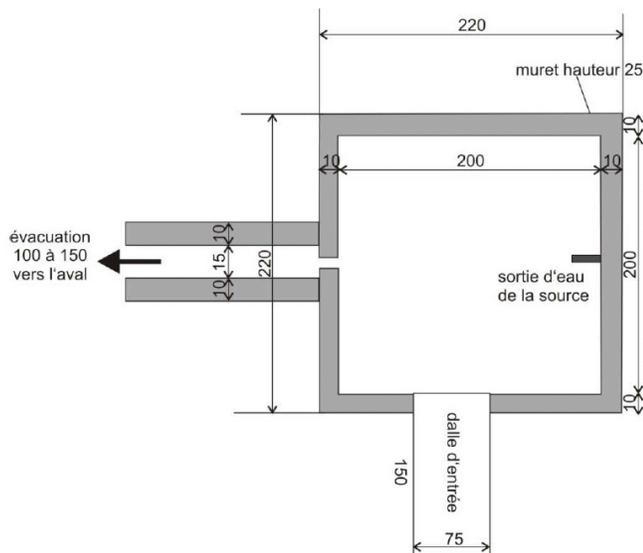


Figure 6.3: Exemple de protection au lieu de puisage avec une dalle en béton [11].

Ces mesures drastiques appliquées en Burundi sont d'une grande importance pour la préservation qualitative de l'eau. Ce n'est pas le cas de la source d'Ain Wahab, un abri a été réalisé mais le PPI est inexistant. Cette réalité du terrain donne une idée sur la cause de la dégradation qualitative de la source.

Pour la protection immédiate de cette source, nous nous sommes rendu compte qu'un rayon minimal de 30 m autour du captage est très souvent proposé dans la littérature.

6.1.2 Délimitation des PPR et PPE

Pour la délimitation des PPR, trois méthodes sont utilisées dans ce travail.

La méthode de Wyssling, très utilisée dans la littérature et l'équation du cylindre pour son avantage sécuritaire du fait qu'elle ne dépend pas des données piézométriques, enfin la méthode parabolique.

a- Méthode de Wyssling

À l'origine, cette méthode a été utilisée pour la délimitation des périmètres de protection des forages et des puits, mais au Burundi, dans le cadre d'un travail en

coopération Allemande, les chercheurs l'ont utilisé pour les sources d'eaux [11]. Dans ce travail, nous allons discuter des résultats obtenus après l'application de cette méthode.

Dans le cas où la caractérisation de l'aquifère a été faite, on détermine les aires de protection rapprochés et éloignés à l'aide de la méthode Wyssling [8]. Elle calcule les données pour le traçage des isochrones en se basant sur le choix des données du temps de transfert. Dans notre cas, à défaut de valeurs de ces derniers dans les textes réglementaires algériens, on peut se fixer une valeur ou se référer aux normes d'autres pays.

Le calcul avec cette méthode nécessite les données suivantes:

K : Perméabilité de l'aquifère.

e : Puissance de l'aquifère.

i : Gradient hydraulique à l'amont de l'ouvrage.

n_e : Porosité efficace.

Q: Débit du captage.

La méthode de Wyssling consiste à déterminer dans un premier temps la zone d'appel du captage (Figure 6.4), puis à calculer les isochrones correspondant au temps de transfert, qui est soit imposé par la réglementation soit choisit.

Calcul des dimensions de la zone d'appel

- Largeur du front d'appel en amont de l'ouvrage (B).

$$B = \frac{Q}{(K.e.i)}$$

- Largeur du front d'appel à hauteur du captage

$$B' = \frac{B}{2}$$

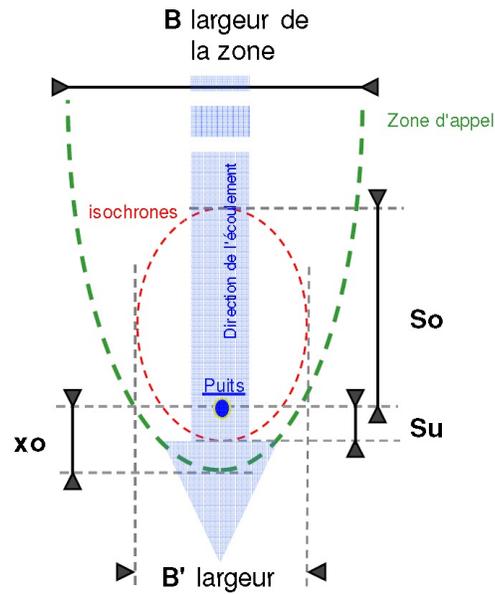


Figure 6.4: Schéma du principe Wyssling [9].

- Le rayon d'appel, (c'est la distance séparant l'ouvrage au point de stagnation aval)

$$X_0 = \frac{B}{2\pi}$$

Calcul des isochrones

$$V_e = \frac{K.i}{n_e}$$

$$L = V_e.t$$

Où V_e : vitesse effective.

t : temps de transfert.

$$S_0 = \frac{L + \sqrt{L(L + 8X_0)}}{2}$$

$$S_u = \frac{-L + \sqrt{L(L + 8X_0)}}{2}$$

Application Numérique

Dans notre cas, la zone en aval de la source est non aquifère, de ce fait : $X_0 = S_u = 30m$, relatif au rayon du PPI. Nous avons choisi un temps de transfert de 50 jours pour le PPR, très utilisé dans la littérature. Pour le PPE, nous nous sommes référés aux normes françaises qui imposent des temps de séjours de 100 jours, 200 jours ou bien 365 jours et il englobe l'intégralité du bassin versant s'il s'agit d'un milieu Karstique.

Comme nous travaillons dans une zone en milieu continu, nous avons pris 200 jours comme temps de transfert.

Données source Ain Wahab (Tableau 6.1) :

Table 6.1: Caractéristiques de la source d'Ain Wahab.

[80]

Symbole	Unité	Valeurs
K	m/j	19
e	m	11
i	—	0,0078
n_e	—	0,08
Q	l/s	5

Résultats de calcul pour Ain Wahab (Tableau 6.2,6.3).

Table 6.2: Valeurs correspondantes à la zone d'appel.

Symbole	Unité	Valeurs
B	m	265
B'	m	132,5
X_0	m	30
V_e	m/j	1,85
L(50 jours)	m	92,5
L(200 jours)	m	370

Table 6.3: Isochrones de la source d'Ain Wahab.

Symbole	Isochrones en (m)	
	50 jours PPR	200 jours PPE
S_0	134	423

La réalisation de la carte est donnée comme suit (Figure 6.5).

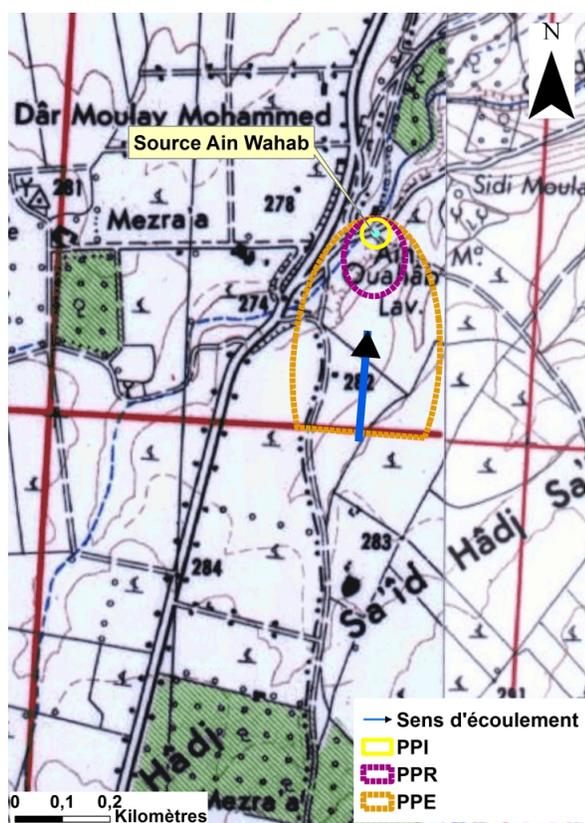


Figure 6.5: Délimitation de PPR et PPE de la source d'Ain Wahab par la méthode Wyssling.

b- Délimitation des PPR et PPE par la méthode de l'équation du cylindre

Dans le cas où nous n'avons pas les données piézométriques mais que nous disposons des données comme la porosité efficace et épaisseur de l'aquifère, nous pouvons calculer les aires des PPR et PPE par la formule suivante:

Équation du cylindre [88] :

$$r = \sqrt{\frac{t \cdot Q_{source}}{\pi(1-f) \cdot e \cdot n_e}}$$

Le traçage de la zone de contribution est situé au foyer de l'arc du cercle (Figure 6.6):

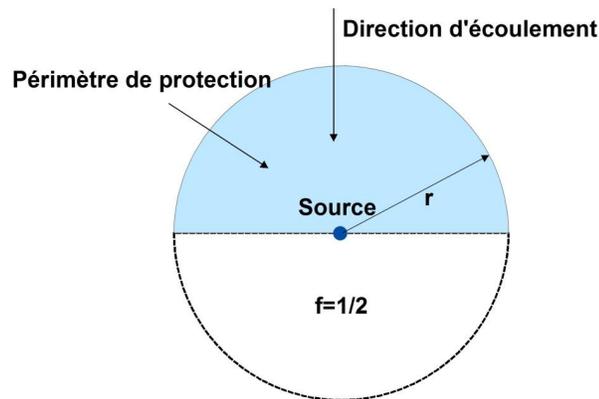


Figure 6.6: Délimitation de PPR et PPE par l'équation du cylindre pour une source [88].

C'est une méthode intéressante parce qu'elle ne tient pas en compte des fluctuations temporelles piézométriques.

Pour la délimitation des PPR et PPE, l'ajout d'une ligne à 30 m de l'arc du cercle à l'aval de la source relative au rayon du PPI, (Figure 6.7):

A:N:

Les résultats de l'application de la formule de l'équation du cylindre sont donnés comme suit (Tableau 6.4).

Table 6.4: Isochrones des sources Ain Wahab l'équation du cylindre.

Sources	Symbole	Isochrones en (m)	
		50 jours PPR	200 jours PPE
Ain Wahab	r	125	250

La réalisation de la carte d'Ain Wahab est donnée comme suit (Figure 6.7).

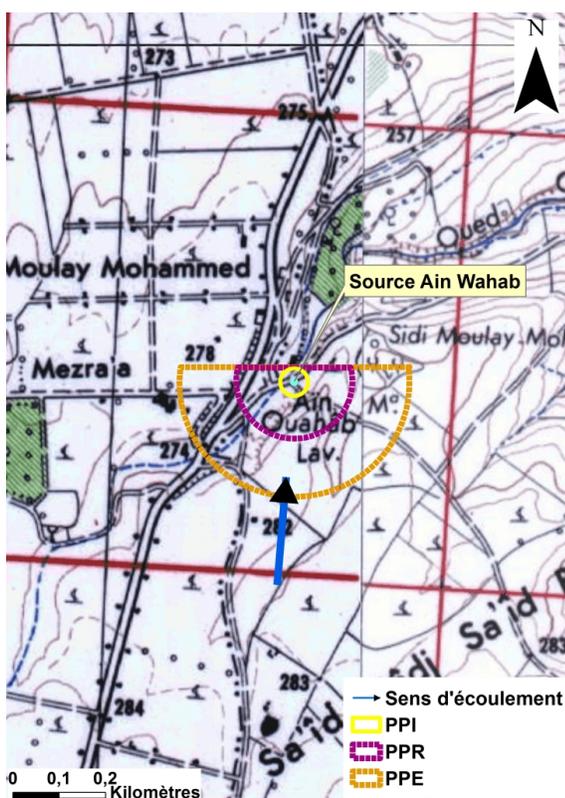


Figure 6.7: Délimitation de PPR et PPE par la méthode de l'équation du cylindre d'Ain Wahab .

c- Délimitation des PPR et PPE par la méthode empirique du Burundi (parabolique).

C'est une méthode très intéressante dans le cas où l'aquifère est inconnu; la délimitation est très simple à utiliser et se base uniquement sur les données de production des sources. Le PPR s'étend jusqu'à 250 m à l'amont de la source. La forme parabolique des aires de protection dépend des débits des sources (Figure 6.8):

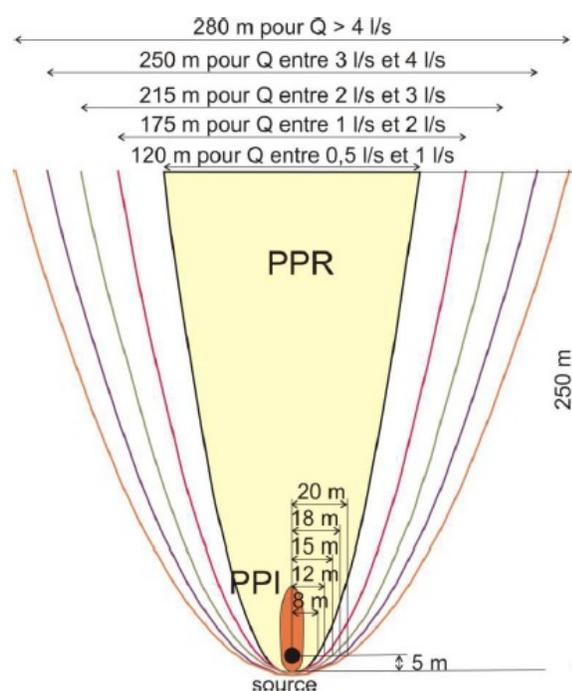


Figure 6.8: Méthode parabolique pour la délimitation des PPR [11].

Le PPE s'étend jusqu'à 500 m à l'amont de la source. La forme parabolique des aires de protection dépend des débits des sources (Figure 6.9):

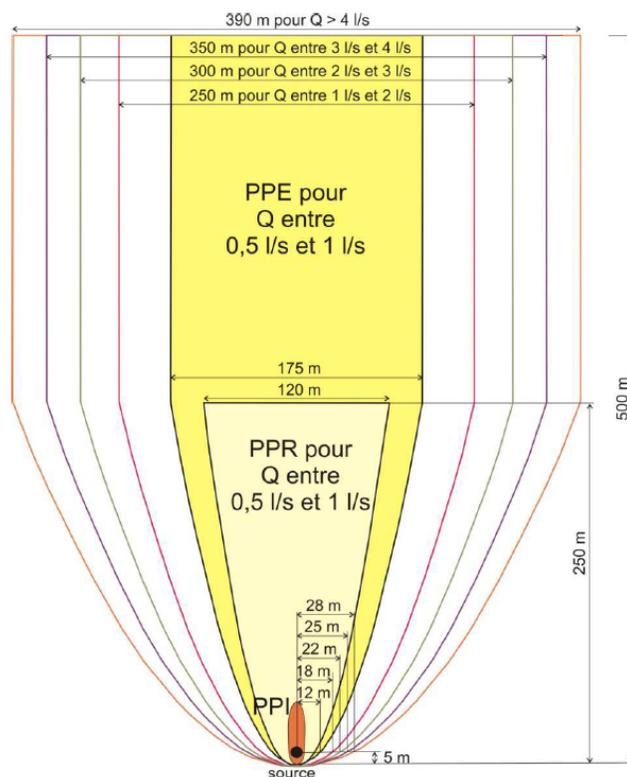


Figure 6.9: Méthode parabolique pour la délimitation des PPE [11].

Une application numérique pour la source est donnée comme suit (Tableau 6.5) :

Table 6.5: Distance des PPR et PPE pour Ain Wahab.

Source	Distance à l'amont de la source, (m)		Parabole (m)	
	PPR	PPE	PPR	PPE
Ain Wahab	250	500	280	390

La réalisation de la carte d'Ain Wahab est donnée comme suit (Figure 6.10).

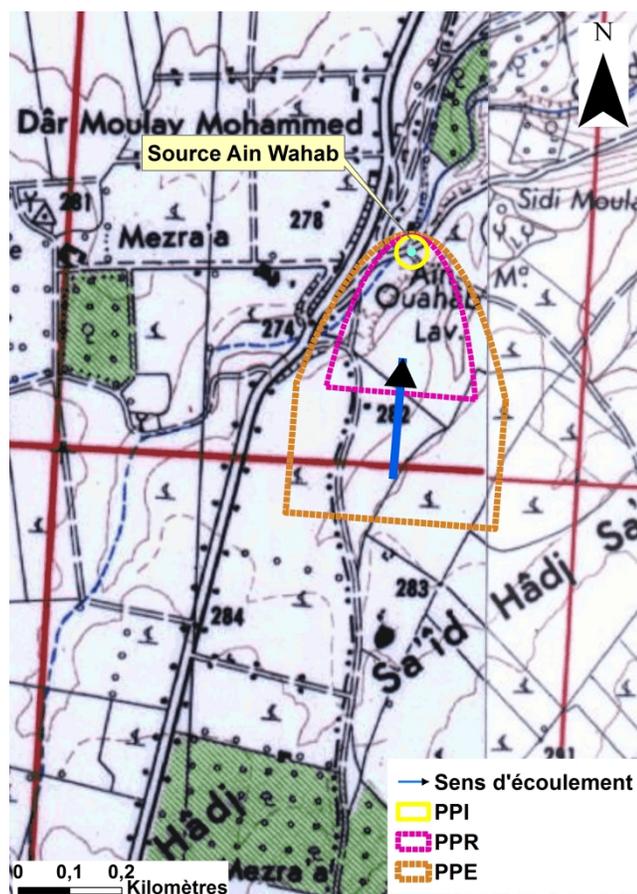


Figure 6.10: Délimitation de PPR et PPE d'Ain Wahab par la méthode parabolique.

6.1.3 Paramètres géométriques de comparaison des PDP

La quantification de la précision entre la méthode de référence Wyssling et la méthode à comparer (Figure 6.11), a été faite à l'aide des trois paramètres géométriques qui se présentent comme suit [88]:

SE: Superficie de la méthode de référence; SAC: Superficie de la méthode à comparer; SC: Superficie commune; SNP: Superficie non protégée; STP: Superficie trop protégée.

a) RAC : Rapport d'aire commune

$$RAC = \frac{SC}{SE} \cdot 100$$

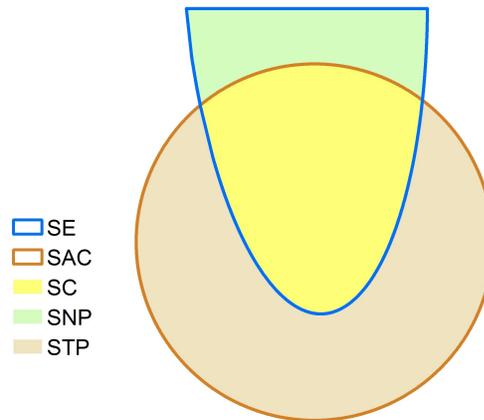


Figure 6.11: Paramètres géométriques de comparaison [88] modifié.

Plus ce rapport est élevé, plus le périmètre de la méthode à comparer couvre l'ensemble des périmètres de référence.

b) RANP : rapport d'aire non protégé.

$$RANP = \frac{SNP}{SE} \cdot 100$$

Ce rapport est inversement proportionnel au RAC.

c) Où: RATP : Rapport d'aire trop protégé.

$$RATP = \frac{STP}{SAC} \cdot 100$$

Plus ce rapport est élevé, plus la superficie de PDP de la méthode à comparer protège inutilement certaines zones.

Application Numérique

1. Comparaison en prenant la méthode du cylindre comme référence

D'après les résultats des RAC et RATP qui figurent dans le tableau 6.6, on conclut qu'il n'y a aucune adéquation des deux méthodes Wyssling et empirique du Burundi avec celle prise comme référence.

Table 6.6: Calcul des rapports de comparaison en prenant comme référence la méthode du cylindre.

Méthodes	Périmètres	Surface (m ²)					Rapports en %		
		SE	SC	SNP	STP	SAC	RAC	RANP	RATP
Wyssling	PPR	31899	16100	15799	552	16653	50	50	3.3
	PPE	112730	61279	52057	56726	118005	54	46	48
empirique du Burundi	PPR	31899	20087	11812	42783	62870	63	37	68
	PPE	112730	66385	47011	120122	186570	59	41	64

2. Comparaison en prenant la méthode Wyssling comme référence

Table 6.7: Calcul des rapports de comparaison en prenant comme référence la méthode de Wyssling.

Méthodes	Périmètres	Surface (m ²)					Rapports en %		
		SE	SC	SNP	STP	SAC	RAC	RANP	RATP
de l'équation du cylindre	PPR	16653	16100	552	15799	31899	97	3	49
	PPE	118011	61286	56726	52081	113335	52	48	46
empirique du Burundi	PPR	16653	16653	0	46187	62869	100	0	73
	PPE	118011	118011	0	68165	186566	100	0	36

En analysant les résultats qui figurent dans le tableau 6.7, on constate que la méthode empirique du Burundi est plus intéressante car le RAC pour le PPR ET PPE est égal à 100%. Cela veut dire que cette méthode englobe la totalité du périmètre de référence. Cependant ces périmètres sont plus larges que la méthode de référence parceque le RATP est de 73% pour le PPR et 36% pour le PPE.

6.2 Réglementation

Dans ce qui suit nous donnons quelques remarques qui pourraient contribuer à enrichir les textes réglementant la protection des eaux souterraines.

6.2.1 Enrichissement de la législation existante

L'établissement des normes d'aménagement des captages d'eau dans la législation algérienne n'est pas pris en compte dans la protection des eaux souterraines. Ce volet est très important en matière de prévention contre le risque de pollution; un ouvrage mal aménagé peut être la source de pollution des eaux souterraines en véhiculant les polluants vers la nappe. Pour ce qui est des périmètres de protection qualitative, à titre d'exemple, l'article 2 du décret exécutif 2007, qui a pour objet la création des périmètres de protection, définit pour le PPI ce qui suit: le périmètre de protection immédiate qui a pour but d'empêcher l'introduction directe de substances polluantes dans l'eau. Son étendue est constituée sur les terrains d'emprise des ouvrages et installations de mobilisation, de traitement et de stockage d'eau. Nous pouvons dire que cette délimitation du PPI reste vague et cette situation peut créer des conflits parce que ces terrains doivent faire l'objet d'expropriation ou indemnisation. La fixation des distances au tour du captage d'eau est importante pour uniformiser l'emprise de ces surfaces dans le territoire. Concernant la délimitation de PPR, toujours le même article 02, stipule que 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. Les remarques faites pour cet article c'est que le temps de transfert doit être fixé dans le cas où les données hydrogéologiques sont disponibles. Dans le cas contraire, on propose de fixer des distances bien définies de protection. Concernant l'activité à l'intérieur des périmètres qualitatifs, l'article 39 de la loi d'août 2005 relative à l'eau définit qu'à l'intérieur des périmètres de protection qualitative, l'ensemble des activités, y compris les activités agricoles ou industrielles, peuvent être réglementées ou interdites. Dans cet important volet, il reste beaucoup de détails à apporter, par exemple concernant l'agriculture, est-ce qu'on tolère l'engraissement biologique et à quelle quantité? L'interdiction de l'utilisation des engrais et pesticides a un grand impact sur la qualité et la quantité de la production. L'indemnisation des agriculteurs n'est pas prise en charge dans la législation en ce qui concerne ces cas.

6.2.2 Application de la législation

Dans le contexte de l'application de la réglementation, il y a encore beaucoup d'efforts à déployer, à titre d'exemple, l'arrêté établi par le wali de la wilaya de Tlemcen qui détermine les zones à protéger pour certaines sources et forages, préconise une distance de 250 m à l'aval des ouvrages de captage ! Or, une grande zone de la wilaya de Tlemcen est à caractère karstique ce qui rend cette distance insuffisante dans les zones en question. Cet arrêté aurait dû prendre en considération les différences de distances à imposer entre les zones à caractères karstiques et les autres. Il devrait aussi négliger les captages à très faibles débits. En plus, on constate que sur le terrain le PPR et les PPE sont pratiquement inexistantes sauf pour les usines de mise en bouteilles de l'eau. Les captages de sources aménagés traditionnellement ne font l'objet d'aucun contrôle. Leur aménagement ne répond pas généralement aux normes techniques, les points de puisage sont réalisés au niveau des sources. Ce qu'on peut dire c'est que les captages raccordés aux réseaux d'AEP font l'objet de contrôle, pour ce qui est des captages réalisés traditionnellement, ils sont laissés à l'abandon. Cette situation engendre parfois des problèmes graves, à titre d'exemple l'accroissement des maladies à transmission hydrique (MTH).

6.3 Conclusion

La source d'eau d'Ain Wahab utilisée pour l'AEP est contaminée à cause de l'inexistence des périmètres de protection qualitative. Trois méthodes sont proposées pour la délimitation des PPR et PPE. La comparaison de ces dernières a montré que la méthode Burundi qui utilise très peu de données est en adéquation acceptable avec la méthode Wyssling, qui elle, exige plus de paramètres hydrogéologiques.

Concernant la législation, les textes nécessitent un complément important pour répondre aux normes de protection environnementale. L'application de la réglementation sur le terrain nécessite une bonne volonté et une responsabilisation des acteurs concernés.

Chapitre 7

Irrigation par les eaux usées épurées et protection des eaux souterraines

7.1 Généralités

Les taux des nitrates des points d'eau analysés de la nappe d'Hennaya varient de 85 à 108 mg/l [89] ces concentrations dépassent les normes de qualité de consommation humaine. Cette situation témoigne d'une pollution diffuse qui est due probablement à l'utilisation d'engrais, l'irrigation avec les eaux usées et l'élevage. Ajouter à cela l'utilisation des pesticides. Ces derniers sont connus comme une source potentielle de pollution qui provoque la dégradation de la qualité des eaux souterraines. Dans le but de la protection de ces eaux, un suivi qualitatif des eaux usées épurées de la STEP (station d'épuration) d'Ain El Houtz est assuré par ses gestionnaires et ceux de l'ANRH et l'INSID (Institut Nationale du Sol d'Irrigation et Drainage). L'irrigation avec les eaux épurées peut aussi avoir un impact négatif sur la qualité de la nappe, pour vérifier cette hypothèse on doit étudier en détails ce phénomène.

La réutilisation des eaux usées épurées (EUE) est une pratique intéressante pour une meilleure gestion des ressources en eau dans le monde entier. Ce fait est particulièrement important dans les zones arides et semi-arides, où les ressources en eau se

raréfient quantitativement et qualitativement [65].

Il convient de souligner que, dans les régions où la demande en eau augmente dans l'agriculture, les EUE représentent une source supplémentaire d'eau et d'engrais renouvelables et fiables [62]. De plus, les boues résiduelles provenant de l'épuration des eaux usées ont une valeur importante pour l'amélioration des sols et le développement des plantes [50].

La réutilisation des EUE pour l'irrigation présente de nombreux avantages mais également plusieurs inconvénients, notamment en l'absence de traitement tertiaire. Les grandes fluctuations de la pollution quotidienne nécessitent des mesures pour moderniser le processus technologique de l'épuration [54].

Sinon, l'instabilité de la qualité des EUE peut poser un problème de conformité aux normes d'utilisation, ce qui induit de grandes difficultés de gestion. Récemment, des recherches ont conclu qu'il est faisable d'utiliser les effluents issus du système de traitement secondaire pour l'irrigation. Cependant, un niveau relativement élevé de métaux lourds, de polluants organiques persistants, d'ions de sel et d'autres éléments, ainsi qu'une certaine quantité de bactéries pathogènes, ont limité sa réutilisation agricole directe [76]. L'épuration insuffisante des effluents urbains et industriels entraîne une pollution non seulement des eaux de surface mais également des eaux souterraines [64, 78, 79].

Dans ce contexte, plusieurs études menées à différents endroits de la planète ont montré que l'irrigation avec les EUE avait modifié la composition chimique des aquifères. Par exemple, dans l'état de Californie, cette pratique agricole a entraîné une contamination par les nitrates [58]. À Gérone, en Espagne, la concentration en chlore a atteint 1200 mg/dm^3 dix mois après le début de l'irrigation [55]. En Tunisie, la teneur en métaux lourds dépasse les valeurs des normes de réutilisation [57]. En Iran, les eaux souterraines ont un niveau de salinité élevé [74].

En Algérie, les stations d'épuration des eaux usées sont équipées d'un système de traitement primaire et secondaire qui vise à éliminer uniquement la matière organique par un traitement biologique. Le décret fixant les normes algériennes pour l'irrigation avec les EUE a été élaboré uniquement pour éviter les risques sanitaires et pour prévenir la contamination des cultures. Toutefois, en ce qui concerne les zones

vulnérables, les limites de concentration imposées par le présent décret ne peuvent empêcher les risques encourus d'une contamination éventuelle par infiltration de EUE dans les eaux souterraines. Pour une gestion efficace des risques, le ministère recommande un suivi rigoureux de la qualité des eaux souterraines, en particulier dans les aquifères vulnérables.

Ce chapitre a pour but une comparaison des paramètres analysés avec les normes d'utilisation des EUE pour l'irrigation en Algérie [51] et de voir si ses valeurs de concentration peuvent avoir un impact négatif sur la qualité des eaux souterraines.

7.2 Matériels et méthodes

7.2.1 Situation du périmètre irriguée

Le périmètre irrigué est situé dans la plaine de Hennaya, au nord de Tlemcen (Figure 7.1). Il a été mis en service en 2009 et est alimenté par les effluents des systèmes de traitement secondaire produits par la station d'épuration des eaux usées à boues activées d'Ain El Hout. Ce périmètre s'étend sur 912 ha et fait partie des grands périmètres irrigués (GPI), nouvellement créés par le Ministère des ressources en eau et gérés par l'Office national de l'irrigation et du drainage, (ONID).

La station d'épuration d'Ain El Hout est située à 11 km en amont du périmètre d'Henaya. Cette station d'épuration traite actuellement 15 000 m³/j. Ce volume est véhiculé aux bornes d'irrigation par gravité. Les agrumes constituent la principale activité de culture sur les parcelles irriguées.

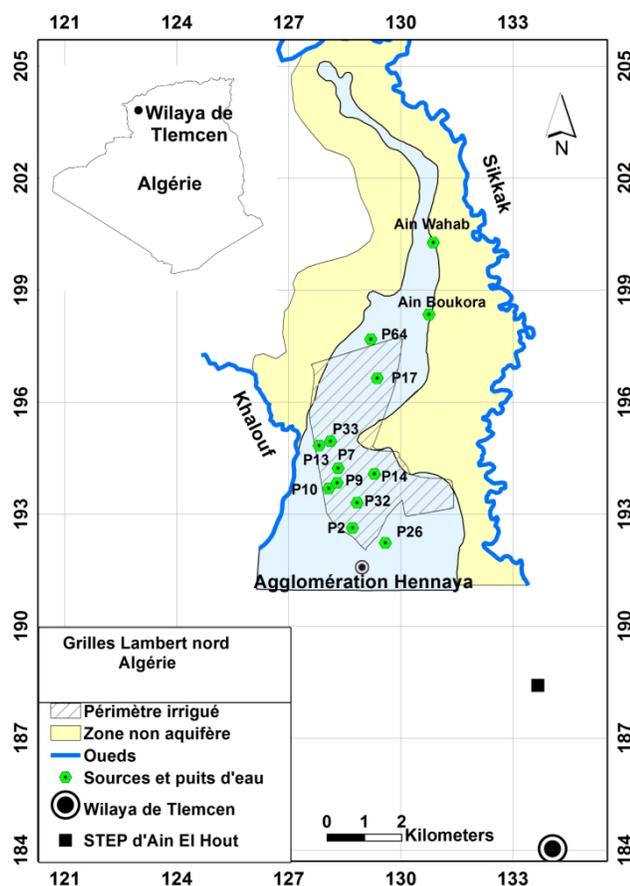


Figure 7.1: Localisation du périmètre irrigué.

7.2.2 Évaluation du taux d'infiltration des eaux usées épurées dans l'aquifère

Les volumes alloués mensuellement pour l'irrigation au niveau des parcelles de 2013 à 2016 ont été obtenus par l'ONID. Les températures mensuelles moyennes ont été obtenues de la station météorologique de Zenata (Tableau 2.1). Quant aux valeurs de précipitations mensuelles, elles sont obtenues à partir de cinq stations pluviométriques (Tableau 2.1). On utilise la méthode des isohyètes pour calculer les valeurs moyennes des précipitations mensuelles.

L'estimation de l'infiltration est faite par la technique du bilan hydrique de Thornthwaite [81].

La réserve utile RU est égale à la capacité en eau disponible dans le sol, elle est calculée par la formule de Perarnaud [73]. Nous prenons généralement la réserve facilement utilisable (RFU) égale à la moitié de la RU.

$$RU = D.(H_{pc} - H_{pf})/(100.Z)$$

Où:

D = densité apparente du sol;

HPC = humidité pondérale à la capacité de champ HC;

HPf = poids de l'humidité au point de flétrissement Hf;

Z = épaisseur du sol explorée par les racines, en mm.

La recharge est estimée par le bilan hydrique basé sur la teneur en eau disponible dans le sol. Ce dernier a une capacité de charge maximale; si l'eau y dépasse cette valeur, elle s'infiltré dans l'aquifère.

- **Estimation de l'infiltration totale due aux précipitations et à l'irrigation.**

L'équation du bilan hydrique est donnée par la formule suivante:

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

Où,

P : Précipitations;

ETR : L'évaporation réelle;

R : Ruissellement;

I : Infiltration totale;

R+I : représente l'excédent.

ΔR : la variation du stock.

A partir de la formule plus haut, nous pouvons tirer le terme excédent comme suit:

$$Excédent = P - ETR - \Delta R$$

Le ruissellement de surface dans le périmètre irrigué est très faible parce que le relief est pratiquement plat. Les pentes varient généralement de 0 à 2%. Par conséquent, le terme de ruissellement R, qui dépend très fortement des conditions topographiques locales, peut être négligé.

Finalement :

$$Excédent = I$$

Ce qui implique que :

$$I = P - ETR - \Delta R$$

- **Estimation de l'infiltration due à l'irrigation avec les EUE**

Il est difficile d'estimer la recharge réelle de l'irrigation par les EUE, par contre nous pouvons estimer une valeur minimale, qui confirme l'existence d'une percolation jusqu'à la nappe phréatique.

Pour ce calcul, nous avons supposé que la totalité de la fraction précipitée s'était infiltrée et nous avons adopté la méthode suivante:

$$I = IP + IEUE$$

Où,

IP: infiltration due aux précipitations;

IEUE: infiltration due à l'irrigation par EUE.

$$\text{Si } I > p \quad IEUE(min) = I - P$$

$$\text{Si } I < p \quad IEUE = 0$$

7.2.3 Qualité des eaux usées épurées et des eaux souterraines

Les résultats des analyses des EUE et des eaux souterraines ont été obtenues auprès des institutions de suivi de l'irrigation avec les EUE (Tableau 7.1) . Nous avons dû compléter ces données par des échantillonnages et analyses que nous avons effectuées nous même.

Table 7.1: Informations sur les sources des données.

type d'eau	Type d'analyse	Institutions	Laboratoires	nombres d'analyses	Date
EUE	Physico-chimique	Gestionnaire STEP, DRE, DSA	Laboratoire interne STEP. Le contrôle de la qualité a été effectué à une fréquence de quatre fois par mois.	136	01.01.2016 à 30.05.2017
	métaux lourds et éléments toxiques	Gestionnaire STEP	- Laboratoire privé El-Feth, dans la ville d'Oran. - ONA	01 03	2014, 2015, 2016 et 2017
	Microbiologie	Gestionnaire STEP	- Laboratoire privé El-Feth, dans la ville d'Oran. - Institut Pasteur d'Alger	02 01	2011 et 2017
Puits et sources (Fig.1)	Microbiologie	Auteurs	- Laboratoire vétérinaire régional de la ville de Tlemcen - Institut Pasteur d'Alger.	14	2011

Office national d'assainissement (ONA); Direction des services agricoles (DSA); Direction des ressources en eau (DRE).

7.2.4 Caractérisation de la zone non saturée

Pour la caractérisation de la zone non saturée, nous avons utilisé les données de 46 sondages mécaniques (Figure 7.2) réalisés par le bureau d'études [80] Les terres recouvrant les zones aquifères constituent un réacteur qui contribue à purifier les

eaux d'infiltration. Il est important de connaître les fonctions et les limites de ce filtre naturel. Pour cela, le pouvoir épurateur du sol, en particulier dans la zone non saturée, est important à déterminer [56]. Dans ce contexte, REHSE [75] a présenté une méthode empirique d'évaluation du pouvoir d'épuration Md du transfert de polluants dans la couverture des eaux souterraines (sol et zone non saturée). La méthode estime la dégradation et l'élimination des déchets organiques, des bactéries pathogènes et des virus dans les sédiments poreux.

Le pouvoir purifiant (Md) est calculé par la formule suivante:

$$Md = h_1 i_1 + h_2 i_2 + h_3 i_3 + \dots$$

Où: $h_1, h_2, h_3 \dots$ = les épaisseurs de différentes couches de la zone non saturée;
 $i_1, i_2, i_3 \dots$ = indice de purification (Tableau 7.2) correspondant à chaque type de sol rencontré.

Table 7.2: Indice de purification pour les différents matériaux.

[84] modifié.

M	Description du matériau	Indice de purification
1	Humus 5-10%, Humus 5-10% Argile	0,8
2	Argile sans fentes de retrait, limon argileux, sable très argileux	0,5
3	Silt argileux à silt	0,4
4	Silt, sable silteux, sable peu silteux et peu argileux	0,22 - 0,33
5	Sable fin à moyen	0,17
6	Sable moyen à grossier	0,1
7	Sable grossier	0,07
8	Gravier silteux, riche en sable et argile	0,13
9	Gravier peu silteux, beaucoup de sable	0,08
10	Gravier fin à moyen, riche en sable	0,04
11	Gravier moyen à grossier, peu de sable	0,03
12	Galets, peu de gravier et de sable	0,02

Deux cas peuvent être énoncés: $Md \geq 1$ et $Md < 1$. Dans le premier cas, la purification est totale. Dans le second cas, l'auto-purification n'est pas complète. Dans ce cas, la contamination continue dans l'aquifère. Dans notre approche, premièrement, nous n'avons pas pris en compte la couverture pédologique par précaution.

Deuxièmement, nous attribuons 0,5 (Tableau 7.2) à la paramétrisation de l'indice car la zone vadose est constituée principalement d'argile, d'argile calcaire et de gravier argileux.

7.3 Résultats et discussions

7.3.1 Estimation de la recharge par les eaux usées épurées

Les calculs résumés dans le tableau 7.3 présentent le bilan hydrique. Il convient de noter que la faible pluviométrie pour la zone d'étude est enregistrée en été, elle atteint son maximum en novembre. Notez également que l'année hydrologique est constituée d'une seule période au cours de laquelle l'évapotranspiration est toujours supérieure aux précipitations. Dans ce cas, la reconstitution de l'eau dans le sol, essentielle à la croissance des plantes, dépend de l'irrigation. La zone en question reçoit en moyenne moins de 395,5 mm de pluie par an. Toutefois, les besoins en eau des cultures dominantes de la région, les agrumes, vont de 900 à 1 200 mm/année [60]. Ainsi, l'insuffisance pluviométrique est relativement comblée par l'irrigation avec les EUE dont la quantité dépasse 200% des précipitations moyennes annuelles.

Table 7.3: Calcul du bilan hydrique dans le périmètre irrigué (mm).

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Jull	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
<i>P</i>	57.7	46.3	41.3	40.2	35.7	5.8	1.7	2.8	18.7	35.7	61.0	48.5	395.5
<i>Ir</i>	116.4	103.4	49	0	6.7	69.6	86.6	97	113.4	84.2	67.2	44.8	838.3
<i>TI = P + Ir</i>	174.1	149.7	90.3	40.2	42.4	75.4	88.3	99.8	132.1	119.9	128.2	93.3	1233.7
<i>ETP</i>	64.8	63	74.9	87.8	106	119.8	129.7	123.3	104.20	90.70	68.70	61.60	1094.5
<i>TI - ETP</i>	109.3	86.7	15.4	-47.6	-63.6	-44.4	-41.4	-23.5	27.9	29.2	59.5	31.7	139.3
<i>RFUD</i>	80	80	80	80	32.4	0	0	0	0	27.9	57.1	80	517.4
<i>RFUF</i>	80	80	80	32.4	0	0	0	0	27.9	57.1	80	80	517.4
<i>ETr</i>	64.8	63	74.9	87.8	74.8	75.4	88.3	99.8	104.2	90.7	68.7	61.6	954
<i>Exédent</i>	109.3	86.7	15.4	0	0	0	0	0	0	0	36.6	31.7	279.7
<i>I</i>	109.3	86.7	15.4	0	0	0	0	0	0	0	36.6	31.7	279.7
<i>ITWW</i>	51.6	40.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92

P : précipitations mensuelles ;

Ir : quantité d'irrigation mensuelle ;

RFUD: La réserve facilement utilisable début du mois ;

RFUF :La réserve facilement utilisable fin du mois ;

ETr : évapotranspiration réelle ;

I: infiltration total;

IEUE: infiltration minimum due à l'irrigation par les EUE.

L'analyse de l'irrigation mensuelle montre que les apports en eau des mois de janvier et février sont très importants par rapport au déficit pluviométrique (ETP-P), ils sont respectivement de 7,1 mm et 16,7 mm pour ces mois. Cette situation a conduit à un excédent d'eau important, ce qui peut s'expliquer comme suit: la gestion de l'irrigation dans la région s'effectue de manière traditionnelle et non scientifique. Des pratiques de sur-irrigation ont été identifiées, en particulier pendant la période de maturation du fruit qui commence de fin décembre à fin février. En conséquence, cette pratique d'irrigation a induit un excès d'eau, favorisant ainsi l'infiltration dans les couches inférieures du sous-sol.

La valeur minimale de recharge due à l'utilisation des EUE est de 92 mm, ce qui correspond à 11% des quantités d'irrigation. Ce résultat confirme qu'une partie importante de cette eau s'infiltré et atteint l'aquifère, d'où la nécessité de surveiller la qualité des EUE afin d'évaluer objectivement son impact sur la qualité des eaux souterraines.

7.3.2 Qualité des eaux usées épurées

Paramètres physico-chimiques

La qualité d'épuration des eaux usées est contrôlée en surveillant divers indicateurs physicochimiques soigneusement sélectionnés qui reflètent le type et le niveau de contamination présents dans l'eau [68]. Nous présentons au tableau 7.4 la valeur moyenne des résultats des analyses pour tous les paramètres contrôlant la qualité des EUE. Nous constatons que la DCO et la DBO sont nettement inférieures aux seuils des normes de réutilisation de l'eau dans l'irrigation. Ce qui confirme l'efficacité d'épuration destinée à éliminer les déchets organiques. L'azote peut agir comme un

engrais pour les plantes, mais lorsqu'il est très concentré, il peut être à l'origine d'une contamination de l'aquifère par les nitrates. Ce n'est pas notre cas, les EUE montrent des quantités faibles et admissibles de NH_4^+ , N-NO_2^- et N-NO_3^- . La valeur moyenne du pH est de 7,4, ce qui indique que l'effluent est légèrement alcalin. La conductivité électrique moyenne (CE) est de 928 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui indique une faible salinité selon la classification de la FAO [63]. Il est connu que les eaux très riches en sel peuvent polluer l'aquifère et créer des problèmes de salinité et d'alcalinité dans les sols et doit donc être évité en tant que ressource en eau d'irrigation [66]. Les valeurs de N-NO_2^- , N-NO_3^- , PO_4^{3-} , pH, T, EC respectent même les normes de la consommation humaine [90]. Les faibles écarts-types montrent une faible variation des paramètres physico-chimiques à la sortie de la STEP.

Table 7.4: Valeurs moyennes et statistiques descriptives des paramètres chimiques des eaux usées traitées.

Paramètres	EUE				Normes
	valeur moyenne	Max	Min	écarts types	
MS,mg/L	14.20	42	7	5.68	30
DBO ₅ ,mg O ₂ /L	13.14	59.7	5.4	7.60	30
COD,mg O ₂ /L	29.20	57	13	9.56	90
NH ₄ ⁺ ,mg/L	2.64	6.77	0.32	1.63	-
N-NO ₂ ⁻ ,mg/L	0.19	0.83	0.02	0.17	-
N-NO ₃ ⁻ ,mg/L	1.82	8.4	0.3	1.49	30
PO ₄ ³⁻ , mg/L	4.19	11	0.032	2.20	-
O ₂ , mg/L	4.34	5.02	4.03	0.16	-
pH	7.47	8.16	7.31	0.13	6.5-8.5
T, °C	17.30	24.5	8	3.80	-
CE,μS/cm	927.74	1081	585	84.67	3000

MS= matière en suspension ; DBO₅= demande biochimique en oxygène en cinq jours;

DCO=besoins chimiques en oxygène ; CE= conductivité électrique ; normes [51].

Il convient de noter, d'après le tableau 7.4, que les résultats des mesures effectuées sur les EUE sont conformes aux normes énoncées précédemment dans l'arrêté sur-mentionné. Cela confirme la bonne performance du processus d'épuration.

Métaux lourds et éléments toxiques

La haute concentration de métaux lourds dans les eaux usées brutes est l'une des préoccupations majeures de la gestion des stations d'épuration, elle affecte l'activité microbienne du système et entrave le processus d'épuration biologique des déchets [52]. Afin de protéger le processus de purification, des normes algériennes ont été établies en juin 2009 fixant des valeurs limites pour la teneur en substances nocives autres que domestiques au moment de leur rejet déversant dans une station d'épuration. Le tableau 7.5 montre que les résultats des échantillons analysés sont généralement très satisfaisants. Cela peut avoir deux explications, la première est que Tlemcen est une ville à vocation agricole où il y a très peu d'industries, les rejets sont donc domestiques et il est connu que les déchets industriels sont la principale source de contamination par les métaux lourds [72]. Le second concerne le mode d'épuration, car le procédé à boues activées permet une bonne élimination des métaux tels que Cd, Cr, Cu, Zn, Ni et Pb. Il permet aussi l'enlèvement des métaux dû à l'adsorption des floes [83].

Table 7.5: Concentrations de métaux lourds et d'éléments toxiques détectés (en mg/dm³) dans les EUE de la STEP d'Ain El Houtz.

Eléments	Résultat d'analyse (mg/L)				Normes (mg/L)
	12.08.2014	26.07.2015	13.07.2016	15.03.2017	
<i>Aluminium</i>	-	0.1010	0.0960	0.0724	20.0
<i>Arsenic</i>	-	0.0063	0.0001	0.0043	2.0
<i>Béryllium</i>	-	0.0009	0.0300	0.0710	0.5
<i>Bore</i>	-	0.1010	0.0584	0.0920	2.0
<i>Cadmium</i>	0.002	0.0100	<0.001	0.0029	0.05
<i>Chrome</i>	<0.50	<0.010	-	0.0700	1.0
<i>Cobalt</i>	<0.10	0.0030	<0.010	0.0490	5.0
<i>cuivre</i>	<0.05	<0.010	0.01	0.0320	5.0
<i>Cyanure</i>	-	0.0791	0.0805	0.0400	0.5
<i>Fluo</i>	-	-	0.0213	0.0634	15.0
<i>Fer</i>	0.150	0.0300	0.1690	0.0630	20.0
<i>Plomb</i>	-	0.0050	0.0100	0.0058	10.0
<i>Lithium</i>	-	0.0691	0.0051	0.0100	2.5
<i>Manganèse</i>	-	-	0.0182	0.0500	10.0
<i>Mercur</i>	-	0.0025	<0.004	0.0037	0.01
<i>Molybdène</i>	-	0.0030	0	0	0.05
<i>Nickel</i>	0.420	0.0070	<0.01	0.0840	2.0
<i>Sélénium</i>	-	0.0071	0	0.0018	0.02
<i>Vanadium</i>	-	0.0044	0.0620	0.0490	1.0
<i>Zinc</i>	<0.20	<0.040	0.1300	0.0954	10.0

- : élément non analysés; normes [51].

Les concentrations de métaux lourds et d'éléments toxiques (Tableu 7.5) se sont révélées très faibles; par conséquent, l'utilisation des EUE ne présente aucun risque de contamination des eaux souterraines.

Paramètres microbiologiques

Les résultats des analyses microbiologiques (Tableau 7.6) confirment qu'en réalité, les procédés classiques de traitement des eaux usées (traitements primaires et secondaires) permettent une épuration satisfaisante de la charge organique, mais semblent moins efficaces pour éliminer les micro-organismes pathogènes [67]. Nous notons également une instabilité des paramètres microbiologiques à la sortie de la station d'épuration. Quand une telle situation se présente, le responsable fait face à des

problèmes, il autoriserait un agriculteur à irriguer puis à l'interdire si les résultats d'analyses ultérieures dépassaient les normes. C'est une vraie aberrance; L'irrigation n'a jamais été interdite dans ce cas. Le responsable du périmètre a autorisé l'irrigation uniquement vers l'arboriculture.

Table 7.6: Données microbiologiques sur des échantillons d'eau prélevés dans les effluents de stations d'épuration.

Paramètres	Echantillons			Normes
	28.08.2011	15.03.2017	12.04.2017	
Coliformes fécaux, UFC/ (100mL), moyenne géométrique	7200	240	75	<1000
Nématodes intestinaux (œufs/L), (moyenne arithmétique)	-	30	abs	<1

Normes [51]; abs : absence; -: élément non analysés

La concentration élevée d'agents pathogènes dans les effluents d'épuration secondaire peut contaminer la nappe phréatique d'Henaya, d'où la nécessité de caractériser la qualité microbiologique de cette dernière afin de faciliter l'évaluation du risque de pollution.

7.3.3 Qualités microbiologiques des eaux souterraines

L'utilisation des EUE dans l'irrigation est associée à certains risques pour la santé en raison de la possibilité de la présence d'un large spectre d'agents pathogènes [71]. Dans certains cas, l'eau contaminée peut également avoir un impact négatif sur la qualité des eaux souterraines. Par exemple, dans le nord-est du Caire (Égypte), l'irrigation avec les EUE est privilégiée pour certaines cultures de plein champ, mais les échantillons d'eau souterraine ont été examinés de manière positive, présence de bactéries pathogènes (salmonelles) et de bactéries coliformes fécaux. En conséquence,

les eaux souterraines sont de mauvaise qualité et ne conviendraient pas à la consommation humaine ou à l'irrigation [49]. Au contraire, en ce qui concerne notre étude, l'analyse des échantillons d'eau prélevés dans les sources et les puits n'a révélé aucune coliforme fécale, *Escherichia coli* ou Entérocoque (Tableau 7.7). Il est à noter que malgré le fait que presque tous les agriculteurs de la région boivent de l'eau directement de leurs propres puits d'irrigation, aucune maladie transmise par l'eau n'a été déclarée dans la région depuis 2011 dans les centres de santé ruraux de la région. Cela nous permet de conclure que ces eaux souterraines sont de bonne qualité microbiologique, conforme aux normes de potabilité [90].

Table 7.7: Résultats d'analyses microbiologiques dans des échantillons d'eau prélevés dans des sources et des puits.

Date	Sources et puits d'eau	E coli	Entérocoques intestinaux	Coliformes fécaux
		UFC/(100 mL)		
27.04.2011	P102	abs	abs	-
	P7	abs	abs	-
03.07.2011	P02	abs	abs	-
	P7	abs	abs	-
	P32	abs	abs	-
	P64	abs	abs	-
26.06.2011	P33	abs	abs	-
	P13	abs	abs	-
	P14	abs	abs	-
14.08.2011	Ain Boukora	abs	abs	-
	P17	abs	abs	-
	P26	abs	abs	-
28.08.2011	P10	-	-	abs
	P09	-	-	abs

abs : absence; -: élément non analysés

Il a été observé que, malgré les concentrations élevées dans les EUE (Tableau 7.6), ils n'ont aucun impact négatif sur l'aquifère. Dans notre approche, on peut directement conclure que la dégradation des contaminants est attribuée à la capacité de purification de la couche protectrice au-dessus de l'aquifère. Autrement, si la pollution de la nappe phréatique est détectée, nous ne pouvons pas directement incriminer l'efficacité de purification de la zone non saturée, d'autres facteurs peuvent

être à l'origine de cette contamination, des enquêtes de terrain sont nécessaires pour tirer des conclusions.

7.3.4 Évaluation de l'indice de purification de la zone vadose de l'aquifère

Sur le plan hydrologique, la zone non saturée est souvent le principal facteur contrôlant le mouvement de l'eau de la surface terrestre vers l'aquifère. Ainsi, il affecte fortement le taux de recharge de l'aquifère, essentiel pour l'utilisation et la gestion des eaux souterraines. Il est souvent considéré comme un filtre éliminant les substances indésirables. Les caractéristiques d'isolation et d'absorption de la zone non saturée sont souvent utilisées pour prévenir ou atténuer la contamination [82]. Dans ce contexte, la bio-filtration du sol (BFS) est un système de recharge des aquifères pratiqué dans différentes régions du monde, utilisant les effluents primaires, secondaires et tertiaires issus d'épuration des eaux usées [77]. Pendant cette dernière décennie, les systèmes BFS ont été étudiés à la fois en laboratoire et sur le terrain pour montrer que leur capacité à éliminer les agents pathogènes est très élevée [59].

Dans notre étude de cas, la recharge non intentionnelle de l'aquifère avec irrigation a montré que le pouvoir de purification de la zone vadose offre un très bon potentiel d'élimination des bactéries et des nématodes dans la zone irriguée par les EUE. Le gestionnaire de périmètre prévoit l'extension de cette zone. C'est pourquoi il est important de délimiter les zones vulnérables dont le pouvoir épurateur est inférieur à 1. L'efficacité du traitement des zones non saturées contre la dégradation naturelle des polluants, dépendant principalement de son épaisseur et des différentes formations géologiques qui le composent. La carte du pouvoir purifiant (Md) (Figure 7.2) a été établie sur la base de données détaillées issues de sondages mécaniques réalisés par le bureau d'études [80].

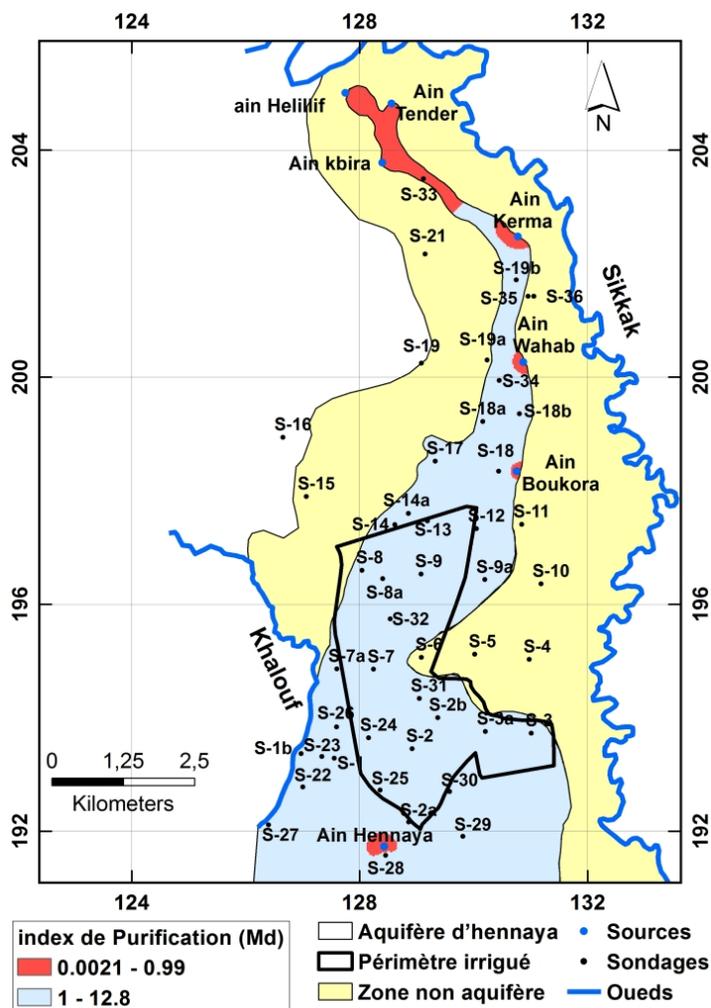


Figure 7.2: Indice de la purification Md.

Dans le périmètre irrigué de Henaya, la valeur de Md varie de 2,1 à 12,7. Dans ce cas, la purification est totale, ce qui prouve que la zone vadose joue le rôle crucial de protection contre toute pollution microbienne. Il est également noté que les zones vulnérables dont le Md est inférieur à 1 sont situées aux émergences de l'aquifère et occupent 2% de sa surface totale, d'où la nécessité de faire des périmètres de protections à ces captages.

7.4 Conclusion

L'estimation de la valeur minimale de la recharge montre qu'une certaine quantité d'eaux usées épurées s'est infiltrée dans les eaux souterraines. La purification des eaux usées par le procédé de traitement des boues activées de la station d'Ain El Hout s'est révélée efficace, comme l'ont confirmé les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques. La caractérisation des EUE a montré de fortes concentrations de microorganismes pathogènes. Au contraire, les résultats des analyses microbiologiques dans les puits et les sources sont de bonne qualité et conformes aux normes de l'eau de consommation humaine. Cela prouve qu'il n'y a pas de contamination des eaux souterraines par l'irrigation EUE. Cela est dû au rôle de filtre naturel que joue la zone non saturée du périmètre d'Henaya, car les microorganismes pathogènes ont été complètement éliminés lors du passage des EUE de la surface à la nappe phréatique.

Conclusion générale

Les eaux souterraines en Algérie constituent une provision d'eau potable importante. L'accroissement des besoins en eau lié à l'insuffisance pluviométrique spécifique du climat semi aride a engendré la surexploitation et la contamination des nappes phréatiques. L'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, la délimitation des périmètres de protection s'avèrent des outils efficaces pour maintenir le bon état qualitatif de cette ressource. Or en Algérie, une difficulté majeure à laquelle nous devons faire face est le manque de données, rendant l'utilisation de certaines méthodes impossible. Une solution à ce problème est la considération de méthodes qui nécessitent peu de données tout en étant aussi fiables que les méthodes plus précises utilisant plus de paramètres.

Pour tester cette fiabilité, nous avons choisi un site d'étude parce qu'il dispose d'une base de données conséquente pour la caractérisation hydrologique et hydrogéologique du milieu. Ce site pilote est la plaine d'Hennaya qui renferme un aquifère alluvionnaire d'une superficie d'environ 29 Km² et se situe au nord de la Wilaya de Tlemcen. La région est caractérisée par une agriculture intensive à dominance agrumicole avec l'utilisation de quantités importantes d'engrais chimiques, ce qui a induit une augmentation des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines. Ceci a été mis en évidence par les teneurs élevées dépassants les normes de potabilité aux niveaux de quelques points d'eau analysés.

En plus, la nappe est surexploitée car elle est utilisée à deux fins, en AEP et en agriculture, sa protection est donc inévitable. Pour évaluer la vulnérabilité de la nappe, notre choix s'est porté sur huit méthodes qui sont: Minnesota, GOD, DRASTIC, SINTACS, AVI, DOPES, SINAN et NV.

Nous avons réalisé le teste de fiabilité entre toutes ces méthodes, deux à deux, en prenant une méthode de référence à tour de rôle. L'indice KAPPA détermine l'erreur de corrélation entre les différentes méthodes.

Un classement est effectué par nombre d'adéquation entre les différentes méthodes et celle qui a le plus d'accord commun avec les autres est classée première.

D'après nos calculs, c'est la méthode Minnesota qui est classée en première position, ce qui fait qu'elle répond à nos critères. Elle présente aussi un grand avantage dans le cas où on dispose de peu d'informations sur les zones non saturées par l'utilisation du niveau 1, qui se base uniquement sur la profondeur de la nappe et la nature des formations aquifères pour l'évaluation de la vulnérabilité.

Nos calculs ont aussi prouvé que la méthode Minnesota est en accord presque parfait avec la méthode DRASTIC pour un coefficient KAPPA de 75%. Cette dernière méthode est très utilisée dans le monde entier, elle a prouvé son efficacité et beaucoup de chercheurs la prennent directement comme référence dans leurs travaux de comparaisons.

Le problème de disponibilité de données se pose aussi pour la délimitation des périmètres de protection. Trois méthodes sont alors proposées pour la délimitation des PPR et PPE de la source d'eau d'Ain Wahab. La méthode Wyssling, la méthode empirique parabolique du Burundi, enfin la méthode du cylindre. La comparaison entre elles a montré que la méthode Burundi qui utilise très peu de données est en adéquation acceptable avec la méthode Wyssling, qui elle, était développée pour les forages et les puits et exige plus de paramètres hydrogéologiques. Nous pensons que cette cohérence est probablement due à la forme parabolique commune entre les deux méthodes.

Concernant la législation, les textes nécessitent un complément important pour les normes d'aménagement des captages et le dimensionnement des périmètres de protection dans le but d'uniformiser la réglementation sur tout le territoire national, en combinaison avec une bonne volonté des acteurs concernés par son application sur le terrain.

Dans cette étude, un autre problème est abordé, c'est la réutilisation des eaux usées épurées dans l'agriculture. Le système d'épuration biologique n'élimine pas tous les contaminants, un suivi qualitatif des EUE est nécessaire pour la protection des eaux souterraines. Dans notre cas, à la sortie de la station d'épuration d'Ain El Houtz, il a été décelé que certains paramètres microbiologiques étaient élevés mais sans aucun impact sur la qualité de la nappe d'Hennaya. Ceci est dû au pouvoir purificateur de la zone vadose pour les désintégrations de ces polluants.

Comme perspectives, nous pouvons suggérer d'appliquer les huit méthodes d'évaluation de la vulnérabilité considérées dans cette étude sur d'autres régions, ainsi que de tester d'autres éventuelles parmi plus de 50 méthodes existantes.

En ce qui concerne les périmètres de protection de captage, les bons résultats obtenus par la méthode Wyssling nous poussent à essayer de la tester aux sources et de la valider par des analyses chimiques de l'eau souterraine.

Bibliographie

- [1] ALLER L., BENNET T., LEHR J.H., PETTY R.J., HACKET G .1987. DRAS-TIC : A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings (EPA 600/2-87). Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, États-Unis, 455 p.
- [2] 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, 162p.
- [3] MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE (MEDDE).2013. Protection d'aire d'alimentation de captage en eau potable, contre les pollutions liées à l'utilisation de fertilisants et de pesticides. guide méthodologique. France.
- [4] PARADIS D., LEFEBVRE R., MICHAUD Y. 1997. Analyse hydrologique pour l'évaluation de la recharge en eau souterraine dans le bassin versant de la rivière Portneuf sur le piémont laurentien (Québec). dans Recherches en cours 1997-E; Commission géologique du Canada. p. 83-88.
- [5] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE .2001. Caracterización de las fuentes agrarias de contaminación de las aguas por nitratos [Description des sources agricoles qui causent la pollution de l'eau par les nitrates]. Secretaría de estado de Aguas y Costas, Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de Aguas, Madrid, 151 pp.

- [6] SOUTTER M., MERMOUD A., MUSY A. 2007. Ingénierie des eaux et du sol: processus et aménagements. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, ©2007. 294 pages. Livre.
- [7] GHEISARI N. 2017. Groundwater Vulnerability Assessment Using a GIS-Based Modified DRASTIC Model in Agricultural Areas. Thesis Department of Civil Engineering Faculty of Engineering University of Ottawa, Canada.
- [8] WYSSLING L.1979: Eine neue Formel zur Berechnung der Zuströmungsdauer (Laufzeit) des Grundwassers zu einem Grundwasser-Pumpwerk. *Eclogae geologicae Helvetiae* .Nr 72(2) p. 401-406..
- [9] SIVOM HADREP.2016. Régularisation administrative du captage de la Chevalerie. Dossier d'autorisation au titre du Code de la Santé Publique – A141400–H16-60.
- [10] MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS (MDDEP).2010. Guide d'interprétation technique du règlement sur le captage des eaux souterraine, (Q-2,R.1.3). Québec.
- [11] VASSOLO S.2014. Guide National de Détermination des Périmètres de Protection des Captages d'Eau destinée à la Consommation Humaine. Annexe au Décret N°100/189 du 25 août 2014 portant modalités de détermination et d'instauration des périmètres de protection des captages d'eau destinés à la consommation humain. Coopération Allemande / Institut Fédéral des Géosciences et Ressources Naturelles (BGR) / GPES Gestion et Protection des Ressources en Eau Souterraine au Burundi
- [12] MORRIS B., FOSTER S.2000. Cryptosporidium contamination hazard assessment and risk management for British groundwater sources. *Water Science & Technology* . Nr 41(7) p.67-77.
- [13] MARSILY G. 1986. Quantitative Hydrogeology. Academic Press. Orlando.

- [14] KUMAR C.P.2012. Assessment of groundwater potential. The International Journal of Engineering And Science (IJES).Nr 1(1) p. 64-79 .
- [15] MINISTRY OF WATER RESOURCES (MWR).1997.Groundwater Resource Estimation Methodology - 1997. Report of the Groundwater Resource Estimation Committee Government of India, New Delhi.
- [16] ARJEN Y.H., ASHOK K.C., PIETER V.O.2019. Progress in Water Footprint Assessment. <http://www.mdpi.com/journal/water>. Switzerland.
- [17] LANDIS J.R., GARY G.K. 1977. The Measurement of observer Agreement for categorical Data. Biometrics. Nr 33 p. 159-174.
- [18] LASSIEUR S.2006. Utilisation de la télédétection et des techniques SIG pour détecter et prévenir les activités de déforestation illégales. Nato NC3 Agency (LaHay, pays Bas).p. 17
- [19] VAN STEMPVOORT D., EVERT L., WASSENAAR L. 1993.Aquifer Vulnerability Index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. Canadian Water Resources Journal. Nr 18(1) p.25-37.
- [20] RIBEIRO L.2000. Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação. Nota interna,(não publicada), ERSHA-CVRM, 8 p.
- [21] RODIER J., LEGUBE B., MERLET N. 2009. L'Analyse de l'eau .9e édition,. Paris, Dunod.
- [22] ISABALLE B.2007. Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresse en milieu méditerranéen, thèse doctorat, Université Laval, p265.
- [23] FERDINANT B.1996. Précis de télédétection, Vol 2, Application thématiques, presse de l'Université du Québec,617p.

- [24] MURAT V., PARADIS D., SAVARD M. M., NASTEV M., BOURQUE E., HAMEL A., LEFEBVRE R., MARTEL R. 2003. Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du Sud-ouest du Québec : Évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. Ressources naturelles Canada, Commission Géologique, 16p.
- [25] FOSTER S.1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden, W. & Van Waegeningh , H.(eds) Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, p. 69- 86.
- [26] EUROPEAN COMMUNITY.1993. Corine land cover.Guide technique. Office des Publications Officielles des Communautés Européennes, Série environnement, sécurité nucléaire et protection civile, 144 p.
- [27] CIVITA M.1994. La carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento : Teoria e pratica. Pitagora (Éditeurs), Bologna, Italie, 325 p.
- [28] ANTONINO ., GIOACCHINO C., ROCCO F.A.2015. Groundwater nitrate risk assessment using intrinsic vulnerability methods: A comparative study of environmental impact by intensive farming in the Mediterranean region of Sicily, Italy. Journal of Geochemical Exploration. Nr 156 p. 89-100.
- [29] ENGEL B.A., K.C.S. NAVULUR, B.S. COOPER, L. HAHN (1996). Estimating groundwater vulnerability to non-point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale. Int. Assoc. Hydrol. Sci., 235. 521-526.
- [30] JUAN J. M., MERCEDES A., MARIA V.2010. Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain:the risk of nitrate pollution. Hydrogeology Journal. Nr 18 p. 681–698.
- [31] MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN (MAPA).2007. Balance del nitrógeno en la agricultura Española durante 2005 [Nitrate balance in Spanish agricultural systems in 2005]. Secretaría General de Agricultura y Alimentación. Dirección General de Agricultura, Madrid, 51 pp.

- [32] ARAUZO M., MARTÍNEZ B.J., VALLADOLID M.2008. Contaminación por nitrógeno en el sistema "río-acuífero aluvial" de la cuenca del Jarama (Comunidad de Madrid, España): [Nitrogen pollution of the "river-aquifer system" in the Jarama basin (Comunidad de Madrid, Spain)]. *Agricultural or urban sources Limnetica*. Nr 27 p.195-210.
- [33] HEUER K., BROOKS P., TONNESSEN K.A.1999. Nitrogen dynamics in two high elevation catchments during spring snowmelt 1996, Rocky Mountains, Colorado. *Hydrol Process*. Nr 13 p.2203-2214.
- [34] LIN B., SAKODA A., SHIBASAKI R., GOTO N., SUZUKI M.2000. Modelling a global biogeochemical nitrogen cycle in terrestrial ecosystems. *Ecol Model* .Nr 135 p.89-110.
- [35] HAFEDH HAMZA M., AYED A., ALAIN F., RAMIRO R., AJMI M ., ABDEL-JAOUED S.2008. Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltine-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-est tunisien) selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI. *Revue des sciences de l'eau*. Nr 21(1) p. 75-86.
- [36] MURAT V.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 en sciences (M.Sc.).Canada
- [37] CIVITA M., DE MAIO M.1997. SINTACS Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilita'degli acquiferi all'inquinamento. *Metodologia and Automatizzazione*, vol.60. Pitagora Editrice, Bologna.
- [38] SINAN M.2000. 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, Atelier international sur l'utilisation des techniques spatiales pour le développement durable, École Hassania des travaux publics, Rabat, Maroc, 12 p.

- [39] SINAN M ., RAZACK M .2009. An extension to the DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquifer of Marrakech (Morocco). *Environ Geol* .Nr 57 p.349-363
- [40] KIRCHNER J., VAN TONDER G., LUKAS E.1991. The exploitation potential of Karoo aquifers. *Water Research commission Contract*. Nr 170(2) p.91.
- [41] ALLIER D., VITTECOQ B., MARDHEL V.2008. "Évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique", rapport final, BRGM/RP-56283-FR.
- [42] CLOUTIER V .,LEFEBRE R .,SAVARD M.,THERIEN T. 2001. Analyse statistique multi variable de l'hydrogéochimie régionale des aquifères fractures du sud-ouest du Québec,54 ch. *Canadian géotechnique conférence* .p.1068-1076..
- [43] SCHNEBELEN N., MAROUX B., SEGUIN J.J., DUBREUILH J. 2001. Contrôle qualité et gestion des nappes d'eau souterraine en Gironde- État des connaissances à fin 2000, Rapport BRGM/RP-51307-FR,96 p et figures.
- [44] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). 1993. Wellhead Protection: A guide for Small Communities EPA/625/R-93/002.Office of Ground Water, Washington D, C.
- [45] LALLEMAND-BARÈS A.1994."Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions", Rapport BRGM, R37929, p .15.
- [46] ARMAND ANOH K ., KOUA T.,EBLIN S.G., KOUDOU A., KAN JEAN KOUAMÉ K.J.,JOURDA J.P ., LAZAR O.G .2018. Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux de surface du bassin versant du lac de taabo en côte d'ivoire aux flux diffus de phosphore. *Rev. Ivoir. Sci. Technol*. Nr 32 p.131 – 152.
- [47] ZWAHLEN F.2004. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers – COST Action 620. European Commission, Directorate-

General XII Science, Research and Development, Brussels, Luxembourg : 297
 p.[http://capella.unine.ch/chyn/pdf/FinalReport COST 620.pdf](http://capella.unine.ch/chyn/pdf/FinalReport%20COST%20620.pdf).

- [48] SHANKS C.M.,ROBERT C.,THÉBERGE S.2018. Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 189 pages. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/prelevements/guide-analyse-vulnerabilite-des-sources.pdf>.
- [49] ABD EL LATEEF E.M., HALL J.E., LAWRENCE P.C., NEGM M.S.2006. Cairo-East Bank effluent re-use study 3 – Effect of field crop irrigation with secondary treated wastewater on biological and chemical properties of soil and groundwater.Biologia. Nr 61(19) p. S240–S245.
- [50] ANTOLIN M.A., PASCUAL I., GARCIA C., POLO A., SANCHEZ-DIAZ M.2005. Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. Field Crops Research . Nr 94 (2-3) p. 224–237.
- [51] ARRÊTÉ INTERMINISTÉRIEL du 02.01.2012 fixant les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation [Inter-ministerial order of 02.01. 2012 setting specifications for treated wastewater used for irrigation purposes]. Official journal of the Algerian republic Nr 41 of 15.07.2012.18,21.
- [52] AZIZI S., KAMIKA I., TEKERE M.2016. Evaluation of Heavy Metal Removal from Wastewater in a Modified Packed Bed Biofilm Reactor. Plos one. Nr 11(5) p. 1-13
- [53] BLANEY H F., CRIDDLE W D.1950. Determining water requirements in irrigated area from climatological irrigation data. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service Tech. Nr 96 p. 48.
- [54] BUGAJSKI P., NOWOBILSKA–MAJEWSKA, E., KUREK K. 2017. The variability of pollution load of organic, biogenic and chromium ions in wastewater

- inflow to the treatment plant in Nowy Targ. *Journal of Water and Land Development*. No. 35(X–XII): 11-17.
- [55] CANDELA L., FABREGAT S., JOSA A., SURIOL J., VIGUES N., MAS J. 2007. Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: Application in a golf course (Girona, Spain). *Science of the Total Environment*. Nr 374 p. 26-35.
- [56] CHAOUI W., BOUSNOUBRA H., CHAOUI K. 2013. Étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux superficielles et souterraines de la région de Bouchegouf (Nord-Est Algérien) [Study of vulnerability to pollution of surface and groundwater in the Bouchegouf region (North-East Algeria)]. *Nature & Technologie*. Nr 08 p. 33-40.
- [57] DAHMOUNI M., HOERMANN G., JOUZDAN O., HACHICHA M. 2019. Spatio-temporal variability of hydrochemical parameters and heavy metals in shallow groundwater of the area of Cebala–Borj–Touil, irrigated with treated wastewater (Tunisia). *Journal Environmental Earth Sciences*. Nr 78(57) p. 1-14.
- [58] EKDAHL E.J., CARPIO-OBESO M.P., BORKOVICH J. 2009. Using GeoTracker GAMA to investigate nitrate concentrations in California groundwater, 1980-2008, presented at Groundwater Monitoring [Design, Analysis, Communication, and Integration with Decision Making Conference, Orange, CA]. [25-26.02.2009].
- [59] ELKAYAM R., MICHAIL M., MIENIS O., KRAITZER T. 2015. Soil Aquifer Treatment as Disinfection Unit. *Journal of Environmental Engineering*. Nr 141(12) p. 1-7.
- [60] FAO 1987 [online]. Réponse des rendements à l'eau. Response of water yields. Irrigation and Drainage Paper N° 33. Rome. [Access 06.04.2019]. Available at <https://books.google.dz/Books> .
- [61] FAO 2000 [online]. Crop Evapotranspiration. Irrigation and

- Drainage Paper Nr 56. Rome.[Access 29.12.2018].Available at:<http://academic.uprm.edu/abe/backup2/tomas/fao%2056.pdf>.
- [62] FAO 2003 [online]. l'irrigation avec des eaux usées traitées. irrigation with treated wastewater. User manual . Rome. [Access 29.12.2018]. Available at https://www.pseau.org/outils/ouvrages/fao_irrigation_avec_des_eaux_usees_traitees_2003.pdf.
- [63] FAO 2013 [online]. Bonnes pratiques d'irrigation. Good irrigation practices. Annex 1 . Rome.[Access 22.03.2019]. Available at https://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/Volume2_annex1_fr.pdf.
- [64] FYLYPCHUK V., INDUCHNY S., PEARCE P., FYLYPCHUK L., MARTYNOV S. 2017. Application of expanded polystyrene filter for tertiary treatment of domestic waste effluent in the UK. Journal of water and land development. Nr 35 p. 41–47.
- [65] GÓMEZ-LÓPEZ M.D., BAYO J., GARCÍA-CASCALES M.S., ANGOSTO J.M. 2009. Decision support in disinfection technologies for treated wastewater reuse. Journal of Cleaner Production. Nr 17 p. 1504–1511.
- [66] GUNDUZ O., TURKMAN A., DENIZ ULAS DOGANLAR D.U.(eds.) 2006. Alternative formulations for the reuse of treated wastewater in menemen plain irrigation scheme .Integrated Urban Water Resources Management. Switzerland .Springer. ISBN978-1-4020-4685-8 pp 281-290.
- [67] HASSEN A., MAHROUK M., OUZARI H., CHERIF M., BOUDABOUS A., DAMELINCOURT J.J.2000. UV disinfection of treated wastewater in a large-scale pilot plant and inactivation of selected bacteria in a laboratory UV device. Bioresource Technology . Nr 74 p. 141-150.
- [68] HOWARD I., ESPIGARES E., LARDELLI P., MARTIN J.L., ESPIGARES M.2004. Evaluation of Microbiological and Physicochemical Indicators for Wastewater Treatment.Environmental toxicology. Nr 19 (3) p. 241-249

- [69] LIANGLIANG W., KENA Q., QINGLIANG Z., KUN W., FELIX T.K., FUYI C. 2016. Utilization of artificial recharged effluent for irrigation: pollutants' removal and risk assessment. *Journal of Water Reuse and Desalination*. Nr 7(1) p. 77-87
- [70] LINGLING Z., JUN X., CHONG-YU X., ZHONGGEN W., LESZEK S. 2013. Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. *Journal of Geographical Sciences*. Nr 23(2) p. 359-369.
- [71] LONIGRO A., RUBINO P., LACASELLA V., MONTEMURRO N. 2016. Faecal pollution on vegetables and soil drip irrigated with treated municipal wastewaters. *Agricultural Water Management*. Nr 174 p. 66-73.
- [72] LIXANDRU M. 2017 [online]. Heavy Metals Contamination: Causes, Symptoms and Side Effects. [Access 20.03.2019]. Available at: <https://www.natureword.com/heavy-metals-contamination-causes-symptoms-and-side-effects/>
- [73] PERARNAUD V., RAYNAL N. 1991. Agrométéorologie [agrometeorology]. *Cours et Manuels n°4*. Météo-France, Ecole Nationale de la Météorologie. p. 183.
- [74] RAHIMI M.H., KALANTARI N., SHARIFIDOOST M., KAZEMI M. 2018. Quality assessment of treated wastewater to be reused in agriculture. *Global Journal of Environmental Science and Management*. Nr 4 (2) p. 217-230
- [75] REHSE W. 1977. Elimination und Abbau von organischen Fremdstoffen, pathogenen Keimen und Viren in Lockergestein. Ein Beitrag zur Dimensionierung der Zone II (Engere Schutzzone) für Kies-Sand-Grundwasserleiter [Elimination and Degradation of Organic Waste Substances, Pathogenic Bacteria and Viruses in Porous Sediments. A contribution to the dimensioning of the zone II (Engere Schutzzone) for gravel-sand aquifers]. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*. Nr 128 p. 319-329.
- [76] RIZZO L., SELCUK H., NIKOLAOU A. D., MERIÇ PAGANO S., BELGIORNO V. 2014. A comparative evaluation of ozonation and heterogeneous pho-

- tocatalytic oxidation processes for reuse of secondary treated urban wastewater. *Journal Desalination and Water Treatment* . Nr 52 (7–9) p. 1414–1421.
- [77] SHARMA S.K., KENNEDY M.D. 2016. Soil aquifer treatment for wastewater treatment and reuse. *International Biodeterioration & Biodegradation*. Nr 119 p. 671-677.
- [78] SHIRAZI S.M.,ADHAM M.I., ZARDARI N.H., ISMAIL Z., IMRAN H.M., MANGRIO M.A. 2015. Groundwater quality and hydrogeological characteristics of Malacca state in Malaysia. *Journal of Water and Land Development*.Nr 24 p. 11–19
- [79] SMORÓN S. 2016. Quality of shallow groundwater and manure effluents in a livestock farm. *Journal of Water and Land Development*. Nr 29 p. 59–66.
- [80] TECHNOEXPORSTROY.1971. Etude d'aménagement hydraulique de la plaine de Hennaya[Direction des ressources en eau [Study of hydraulic development of the plain of Hennaya [Direction of Water Resources].[2009 Tlemcen city].
- [81] THORNTHWAITE C.W., MATHER J.R.1955. The Water Balance [online]. vol.8, Nr.1. C.W. New Jersey . *Climatology*. [Access 11.01.2019]. Available at: <https://oregondigital.org/downloads/oregondigital:df70pr001>.
- [82] USGS 2017 [online]. Unsaturated Zone Resources & Information. USA. [Access 16.03.2019]. Available at :<http://water.usgs.gov/ogw/unsaturated.html>
- [83] ÜSTÜN G.E.2009. Occurrence and removal of metals in urban wastewater treatment plants. *Journal of Hazardous Materials*. Nr 172 p. 833–838.
- [84] ES SAOUINI H., AMHARREF M., BERNOUSSI A.2017.Comparative assessment of vulnerability by DRASTIC and TCR methods: application to the r'mel aquifer, morocco. *Journal of Environmental Hydrology*. Nr 25(7) p. 1–10.
- [85] SABAH L.,SALAH C.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*.Nr 34 p .48 -62.

- [86] DUCCI D., SELLERINO M.2013. Vulnerability mapping of groundwater contamination based on 3D lithostratigraphical models of porous aquifers. Science of the Total Environment .Nr 447 p.315–322.
- [87] EWODO MBOUDOU G., OMBOLO A., BON A.F., NTEP F., BINELI E.2016. Apport des méthodes paramétriques DRASTIC, GOD et SI à l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque dans les aquifères du bassin versant de l'Abiergué (région de Yaoundé). Science de la vie, de la terre et agronomie. Nr 4(02) p. 67-78.
- [88] PARADIS D .2000.Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraines dans les aquifères granulaires du piémont laurentien , mémoire de Maitre de Sciences, université du Québec.
- [89] BEMMOUSSAT A.2012 . Impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines à travers le bassin de la Tafna. Thèse magister, University of Tlemcen.
- [90] DÉCRET EXÉCUTIF n°11-125 du 22.03.2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine. [Executive Decree Nr. 11-125 of 22 March 2011 on the quality of water for human consumption]. Official journal of Algerian republic Nr 18 of 23.03.2011. 6,9.
- [91] VERNOUX J.F.,WUILLEUMIER A.,SEGUIN J.J.,DOERFLIGER N.2007.Méthodologie de délimitation des captages et leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses .BRGM/RP-55332-FR. .
- [92] SONIA SIAUVE S. , AMORSI N.2015. Protection des aires d'alimentation des captages en eau potable. Étude de pratiques en Europe.WWW.oieou.org/documentation.
- [93] BOUSELSAL B.,KHERICI N.,HADJ-SAÏD S.2015. Vulnerability and pollution risk of el oued free-water table S.E. Algeria) : application of drastic method. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie.Nr 26(12) p.43-63.

- [94] CIVITA M., DE MAIO .2000. Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5. Pitagora Editrice Bologna.
- [95] FAO 2013. Bonnes pratiques d'irrigation [Good irrigation practices].Annex 1 [online]. Rome. Food and Agriculture Organization.[Access 22.03.2019]. Available at: https://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/Volume2_annex1_fr.pdf
- [96] CASTANY G. 1998 .Hydrogéologie : principes et méthodes.Livre edition Dunod. Paris.
- [97] AL KUISI M., EL-NAQA A., HAMMOURI N.2006. Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area, Jordan. Environ Geol.Nr 50 p.651-667.
- [98] BARZEGAR R., ASGHARI MOGHADDAM A., BAGHBAN H.2016. A supervised committee machine artificial intelligent for improving DRASTIC method to assess groundwater contamination risk: a case study from Tabriz plain aquifer, Iran. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment .Nr 30 p.883-899

Résumé

Dans ce travail, nous avons considéré les huit méthodes suivantes: DRASTIC, SINTACS, AVI, NV, GOD, DOPE, SINAN et MINNESOTA, pour réaliser les cartes de vulnérabilité de l'aquifère d'Hennaya. Grâce à un classement par coefficient KAPPA, nous avons pu démontrer que la méthode Minnesota est la plus appropriée. Cette méthode se base uniquement sur la donnée d'un seul paramètre qui est la zone vadose. Elle représente à notre avis une solution pour palier au manque de connaissances des aquifères régionaux. Le calcul du pouvoir purificateur indique une purification complète car il varie de 2,1 à 12,7, ce qui montre la bonne qualité microbiologique des eaux souterraines, cependant, nous prouvons que la dégradation s'est faite au niveau de la zone vadose.

Mots clés : l'aquifère d'Hennaya, vulnérabilité MINNESOTA, pouvoir purificateur.

Summary

In this work, we considered the following eight methods: DRASTIC, SINTACS, AVI, NV, GOD, DOPE, SINAN and MINNESOTA, to realize the Hennaya aquifer's vulnerability maps. Using a KAPPA coefficient ranking, we were able to demonstrate that the Minnesota method is the most appropriate. This method is based only on the data of a single parameter which is the vadose zone. It represents in our opinion a request to overcome the lack of knowledge of regional aquifers. The calculation of the purifying power indicates a complete purification because it varies from 2.1 to 12.7, which shows the good microbiological quality of the groundwater, however, we prove that the degradation was done at the level of the vadose zone.

Keywords : Hennaya aquifer, vulnerability, MINNESOTA, purifying power.

ملخص

في هذا العمل ، درسنا الطرق الثمانية التالية: DRASTIC ، و SINTACS ، و AVI ، و NV ، و GOD ، و DOPE ، و SINAN ، و MINNESOTA ، لإدراك خرائط قابلية التأثير مياه الجوفية الحنايا. باستخدام تصنيف معامل KAPPA ، تمكنا من إثبات أن طريقة مينيسوتا هي الأنسب. تعتمد هذه الطريقة فقط على بيانات المعلمة الفردية وهي منطقة vadose. في رأينا ، إنه يمثل حلاً للتغلب على نقص معرفة طبقات المياه الجوفية الإقليمية. يشير حساب قدرة التطهير إلى تنقية كاملة حيث يتراوح من 2.1 إلى 12.7 ، مما يدل على الجودة الميكروبيولوجية الجيدة للمياه الجوفية ، ومع ذلك ، فإننا ثبت أن التحلل حدث على مستوى منطقة الغدوز.

الكلمات المفتاحية: مياه الجوفية الحنايا, التأثير, MINNESOTA, التحلل.