

Année Universitaire : 2011-2012



Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et
Techniques

**Intégration du SIG et de la méthode DRASTIC pour l'étude de
la vulnérabilité de la nappe phréatique de la ville de Bel ksiri**

Présenté par:

Naoual Afkir

Encadré par:

- Kamal El Haji, ISHEDD - Rabat
- Raouf Jabrane, FST - Fès

Soutenu Le 22 Juin 2012 devant les jurys composé de:

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| - Pr. A. ELGAROUANI | Président |
| - Pr. R. JABRANE | Encadrant |
| - Pr. K. EL HAJI | Co-encadrant |
| - Pr. Pr. H. TABYAOUI | Examineur |
| - Pr. A. CHAOUNI | Examineur |

Stage effectué à : ISHEDD - Rabat





Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: Afkir Naoaul

Année Universitaire : 2011/2012

Titre: Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraine de la ville de Bel ksiri

Résumé

Les cartes de vulnérabilité aux pollutions constituent une base d'information essentielle pour la gestion des ressources en eau, pour l'évaluation des risques de pollution des nappes et la mise en place de mesures destinées à la prévention des pollutions accidentelles.

C'est dans ce but que cette étude a été initiée en vue de produire une carte de vulnérabilité de la nappe phréatique de la ville de Bel ksiri (Maroc) en appliquant la méthode DRASTIC couplée à un Système d'information géographique (SIG). L'aire de cette nappe est occupée essentiellement par des zones agricoles caractérisées par une utilisation de plus en plus importante des engrais chimiques, en plus des rejets des zones industrielles (usines de la betterave et canne à sucre) qui représentent un risque permanent pour la qualité des eaux souterraines.

La méthode DRASTIC prend en compte la majeure partie des facteurs hydrogéologiques qui affectent et contrôlent l'écoulement des eaux souterraines (profondeur de la nappe, recharge nette, lithologie de l'aquifère, type du sol, topographie (pente), lithologie de zone non saturée et conductivité hydraulique). Elles ont été acquises à plusieurs sources et converties par le SIG sous formes de cartes thématiques. Pour chaque paramètre, un coefficient et un poids ont été attribués d'après son importance dans le modèle DRASTIC. La carte obtenue met en évidence deux classes de vulnérabilité, une classe de vulnérabilité modérée qui est la plus dominante car couvre presque la totalité de la surface de Bel ksiri et une classe de vulnérabilité faible.

Mots clés: Vulnérabilité, pollution, ressources eau, risque, nappe phréatique, Maroc, DRASTIC, SIG.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail

A mon cher père

Mr. Omar Afkir, exemple de droiture et source de valeurs pour moi. Vous étiez toujours soucieux de mon avenir, et j'ai trouvé toujours conseil auprès

REMERCIEMENT REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail de projet de fin d'étude pour l'obtention du Master en "Hydrologie de surface et Qualité des eaux", je tiens à présenter mes reconnaissances et mes remerciements à mon professeur et mon encadrant et chef de département de la Géologie à la faculté des sciences et techniques de Fès ,Monsieur Raouf JABRANE, pour tout le temps qu'il m'a consacré, sa directive précieuse, et pour la qualité de son suivi durant toute la période de mon stage .

Je veux également exprimer ma très grande gratitude à Monsieur Kamal EL HAJI, mon encadrant externe et président de l'I institut Supérieur des Hautes Etudes en Développement Durable (ISHEDD) à Rabat, qui a accepté de m'accueillir et d'encadrer mes travaux durant les 4 mois de stage, au sein de son établissement.

Je le remercie pour sa disponibilité, ses conseils fructueux, ses critiques et ses propositions scientifiques qu'il m'a prodigué tout au long de mon projet.

Je remercie aussi tout le personnel d'ISHEDD, pour leur gentillesse et leur soutien, notamment Mme Caroline COLLECT, Mme Najlae BOURKAI et Mme Hayat HAFIDI.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à Monsieur Jamal CHAO, enseignant à ISHEDD, pour tout le temps qu'il m'a accordé, malgré ces multiples occupations

Mes remerciements s'adressent à Monsieur Zohair AISSAOUI, inspecteur réseau TOTAL à Rabat pour tout son aide.

Merci infiniment à Monsieur Ilias KACIMI, enseignant à ISHEDD, pour son aide.

Je remercie évidemment tous les membres du jury qui ont assuré un suivi régulier à ce travail.

Merci également à tous mes professeurs et mes collègues du Master.

Mes remerciements vont enfin à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

TABLE DES MATIERES

Sommaire

I. Introduction.....	
II. Problématique	
III. Objectifs	
IV. Méthodologie	
IV.1. Etude des activités humaines de la zone d'étude.....	
V.1.1. Situation géographique.....	
IV.1.2. Activités industrielles	
IV.1.3. Activités commerciales.....	
IV.1.4. Activités municipales	
IV.2. Etude des comportements du sol et perméabilité des eaux souterraines.....	17
IV.2.1. Notions générales	
IV.2.2. la zone d'étude	
IV.3. Choix de méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines	26
IV.3.1. Concept de vulnérabilité des eaux souterraines	2
IV.3.2. Relation degré de vulnérabilité- type de nappe.....	3
IV.3.3. les techniques d'évaluation de vulnérabilité des eaux souterraines	33

IV.3.4. Les outils utilisés pour la planification de l'urbanisation.....	40
IV.3.5. Choix de la méthode utilisée.....	
IV.3.6. Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines de la ville de Bel Ksiri par la méthode DRASTIC	
V. Matériels et méthodes	
V.1. Etapes de réalisation de la carte pour la méthode retenue	43
V.1.1. Profondeur du plan d'eau (D).....	
V.1.2. Recharge efficace (R).....	
V.1.3. Nature lithologique de l'aquifère (A)	
V.1.4. Nature de sol (S).....	
V.1.5. Topographie (T)	
V.1.6 Impact de la zone non saturée (I).....	
V.1.7 Conductivité hydraulique (perméabilité de la zone saturée) (C).....	53
V.2. Réalisation de la carte de vulnérabilité des eaux souterraines de la ville de Bel Ksiri.	54
VI. Analyses et interprétations.....	
VII. Conclusions et recommandation.....	
BIBLIOGRAPGHIE.....	
Annexes	

LISTE DES FIGURES

Figure1 : Zone d'étude au Maroc (ville de Bel Ksiri).....	12
Figure 2 : Schéma des eaux usées rejetées directement dans l'Oued Sebou	13
Figure 3: Carte de situation des revendeurs des pesticides dans le Gharb	16
Figure 4 : Perméabilité des roches	19
Figure 5: Carte topographique de la ville en trois dimensions (3D).....	20
Figure 6: Carte géologique du Bassin du Gharb	21
Figure 7: Pluviométrie moyenne annuelle du Maroc	22
Figure 8: Pluviométrie des vingt dernières années de la ville de Bel ksiri	23
Figure 9 : Carte des ressources en eaux profondes et de surface de la région Gharb-Chrarda-Beni Hssen	24
Figure 10 : Différents états piézométriques de la nappe	25
Figure 11: Schéma de la contamination des eaux	27
Figure 12 : Schéma de la vulnérabilité des nappes phréatiques à la pollution.....	32
Figure 13 : Schéma de la vulnérabilité des nappes captives à la pollution.....	33
Figure 14 : Les paramètres intervenant dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines.....	35
Figure 15: Carte de la limite de la zone d'étude en maillage.....	43
Figure 16: Schéma du trajet d'un polluant selon la profondeur de la nappe.....	44
Figure 17 : Carte des cotes correspondant à la profondeur du plan d'eau de la nappe phréatique de Bel ksiri	45
Figure 18 : Carte des cotes correspondent à la recharge de la nappe phréatique de Bel ksiri..	47
Figure 19 : Carte des cotes correspondent à lithologique de la zone saturée de la nappe phréatique de Bel ksiri.....	48
Figure 20 : Carte des cotes correspondent à la nature du sol de la nappe phréatique de Bel ksiri.....	50
Figure 21 : Schéma de l'infiltration du contaminant selon la pente.....	51
Figure 22: Carte des cotes correspondent à la topographie de la nappe phréatique de Bel ksiri.....	52
Figure 23 : Carte des cotes correspondent à lithologique de la zone non saturée de la nappe phréatique de Bel ksiri.....	53
Figure 24: Carte des cotes correspondent à la perméabilité de la nappe phréatique de Bel ksiri.....	54
Figure 25: Carte intermédiaire de la vulnérabilité de la nappe phréatique de Bel ksiri.....	55
Figure 26: Carte de la vulnérabilité classée de la nappe phréatique de Bel ksiri.....	57
Figure 27: Carte de vulnérabilité en 3D	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les principaux circuits de commercialisation des pesticides dans la ville de Bel ksiri [4].	15
Tableau 2: Variation de la perméabilité en fonction de la texture du sol.	18
Tableau 3: Perméabilité moyenne de sols de textures différentes (cm/heure).	18
Tableau 4: Variation de la perméabilité en fonction de la structure	19
Tableau 5: Critères de vulnérabilité couramment prise en compte	31
Tableau 6: Poids attribués aux paramètres DRASTIC	35
Tableau 7: Critère d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC	36
Tableau 8 : Cotes du type d'aquifère utilisées pour les paramètres de la méthode GOD	37
Tableau 9 : Cotes de la lithologie de la ZNS utilisées pour les paramètres de la méthode GOD	37
Tableau 10 : Cotes de la profondeur de la nappe/sol utilisées pour les paramètres de la méthode GOD	37
Tableau 11 : Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode.	38
Tableau 12 : Critère d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SINTACS	38
Tableau 13 : Principales classes d'occupation des sols et valeurs correspondantes de la méthode SI.	39
Tableau 14: Poids attribué au paramètres SI	39
Tableau 15 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI	40
Tableau 16: Ponctuation attribuée à chaque profondeur du plan d'eau [26] [24].	44
Tableau 17 : Intervalles de recharge nette et leurs notes [26] [24].	46
Tableau 18 : Ponctuation pour le paramètre lithologique d'aquifère [26], [24].	47
Tableau 19 : Ponctuation attribuée à chaque nature du sol [26] [24].	49
Tableau 20 : La ponctuation attribuée au paramètre topographie [26] [24].	51
Tableau 21 : La ponctuation attribuée au paramètre topographie [26] [24].	53
Tableau 22 : Intervalles de vulnérabilité [26] [24].	56

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Cycle de l'eau.

Annexe 2 : Perméabilité des sols.

Annexe 3 : Pollution des eaux souterraines: cas des stations-service.

LISTE DES ABREVIATIONS

CID	Conseil, Ingénierie et Développement.
CPRAC	Centre d'Activités Régionales pour la Production Propre.
DISCO	Discontinuités - Couverture protectrice.
DRPE	Direction de la Recherche et de la Planification des Eaux.
DRASTIC	D: Profondeur de la nappe (Depth); R: Recharge de la nappe; A: Nature lithologique de l'Aquifère; S: Nature du Sol; T: Topographie; I: Impact de la zone non saturée C: Conductivité hydraulique.
EPIK	Epikarst ; Protective Cover (couverture protectrice : sol) ; Infiltration Conditions (conditions d'infiltration) ; Karst network development (développement du réseau karstique).

GOD	G: Groundwater occurrence O: Overall aquifer class D: Depth of water table.
MNT	Modèle Numérique de Terrain.
ONEP	Office National de l'Eau Potable.
PA	Plan d'Aménagement.
PAC	Plan d'Aménagement Communal.
PAS	Plans d'Aménagement Spécifiques.
PASR	Plan d'Aménagement Sectoriel de Restructuration.
PDAR	Plan de Développement des Agglomérations Rurales.
PZ	Plan de Zonage.
RISKE	Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst.
SAFED	Société Africaine d'Etude des techniques et de Développement.
SDAU	Schéma Directeur d'Aménagement Urbain.
SDAUL	Schéma Directeur d'Aménagement urbain du Littoral.
SI	Susceptibilité Index ou méthode d'Indice de Susceptibilité.
SUNABEL	Sucrerie Nationale de Betteraves du Loukkos.
SUNACAS	Sucrerie Nationale de canne à sucre de Sebou.
SUPEFT	Société d'ingénierie en hydraulique et environnement.
SURAC	Sucrerie Raffinerie du Gharb.
USEPA	United States Environmental Protection Agency (L'Agence Américaine de protection de l'environnement).
ZIS	Zone Interface Sol.
ZNS	Zone Non Saturée.
ZS	Zone Saturée.



I. Introduction

L'eau présente, depuis toujours, une problématique d'actualité, non seulement de point de vue quantité mais aussi qualité.

Au cours des dernières années, la qualité des eaux souterraines s'est détériorée dans de nombreuses régions du Maroc, à la suite de développement de l'urbanisation, l'expansion de l'agriculture, et l'élimination des déchets solides.

Pour la sauvegarde de ces ressources, il est nécessaire de prévoir des moyens de protection qui restent des actions d'autant plus nécessaire que la décontamination des nappes d'eaux souterraines polluées, qui est une entreprise longue et coûteuse.

Plusieurs mesures de prévention et de protection s'imposent. La protection impose en premier lieu des mesures en fonction des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et par la suite l'élaboration de la carte des zones vulnérables qui se présente comme un outil efficace pour limiter et contrôler les risques de dégradation de la qualité des eaux souterraines.

Ce travail fait l'état de l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines de la ville de Bel Ksiri.

II. Problématique

Le problème qui se pose est une éventuelle contamination des eaux souterraines de la ville de Bel Ksiri qui est le siège de plusieurs unités agro-industrielles, dont deux sucreries SUNACAS et SURAC qui sont installées dans le périmètre urbain de l'ouest de la ville.

Les sucreries de la betterave ont une activité à caractère saisonnier (la saison s'étale du mois de Juin au mois d'Aout) et sont de grandes consommatrices d'eau ($80\,000\text{ m}^3/\text{jour}$).

L'eau consommée sert au lavage et au transport de la betterave, au refroidissement, à la diffusion durant l'extraction du sucre et au lavage des sols, des cuves et des machines. Les eaux de lavage et du transport représentent 50% de la pollution en matière organiques et 90% de la pollution en matière en suspension. Ces rejets liquides sont déversés directement dans des cours d'eau.

Quant aux déchets solides, près de 200 000 tonnes par an de déchets sont déposés à proximité des usines. La quantité de fioul utilisée par les sucreries pour la production de l'énergie représente plus



de 112 000 tonnes de fioul par an, ce qui correspond à plus de 120 000 tonnes de gaz carbonique par an émis dans l'atmosphère [1].

III. Objectifs

Le but de ce travail est d'identifier les zones à haut risque de contamination à la ville de Bel ksiri, donc montrer quelles sont, suivant les terrains rencontrés en surface, les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans ces terrains c'est-à-dire la vulnérabilité de ces nappes.

Pour cela Il est nécessaire d'élaborer une carte de vulnérabilité des eaux souterraines qui permet :

- De définir les zones sensibles dans lesquelles une pollution peut affecter gravement une nappe et d'avoir une idée des moyens à employer si nous voulons protéger cette nappe.
- Permet essentiellement d'orienter le choix de sites des projets de développement pouvant avoir des conséquences négatives sur la qualité des ressources en eau souterraines.

Cela peut être par exemple le choix des zones a priori favorables ou défavorables à l'implantation de sites de stockage de déchets. Le choix d'implantation définitive ne se fera évidemment pas sur la base de ce document mais suite à des études complémentaires plus détaillées. La carte de vulnérabilité, en association avec d'autres documents, sert à préciser les secteurs dans lesquels doivent porter des études complémentaires pour implanter l'aménagement prévu au mieux et en toute connaissance de cause.

IV. Méthodologie

Afin d'atteindre les objets cités ci-dessus nous avons adopté la méthodologie suivante :

- En premier lieu nous avons répertorié toutes les activités humaines potentiellement polluantes sur le territoire de la ville de Bel Ksiri (activités industrielles, activités commerciales, activités municipales).
- En deuxième lieu nous avons étudié les comportements du sol (topographie, la lithostratigraphie) et perméabilité des eaux souterraines (profondeur de la nappe, recharge, et écoulements locaux et régionaux).
- En dernier lieu et pour concrétiser cette étude nous avons procédé au choix de la méthode qui nous permette d'évaluer les impacts négatifs des activités cités ci-dessus sur la qualité et la quantité des eaux souterraines de Bel Ksiri, cette évaluation nous a permis en fin de

compte de dresser une carte de vulnérabilité des eaux souterraines, qui sera un outil fondamental pour la gestion intégrée des activités humaines d'une part et de la ressource en eau d'une autre part.

IV.1. Etude des activités humaines de la zone d'étude

Avant de passer à l'étude des activités humaines concernant la ville de Bel ksiri, il est nécessaire de la localiser géographiquement.

V.1.1. Situation géographique

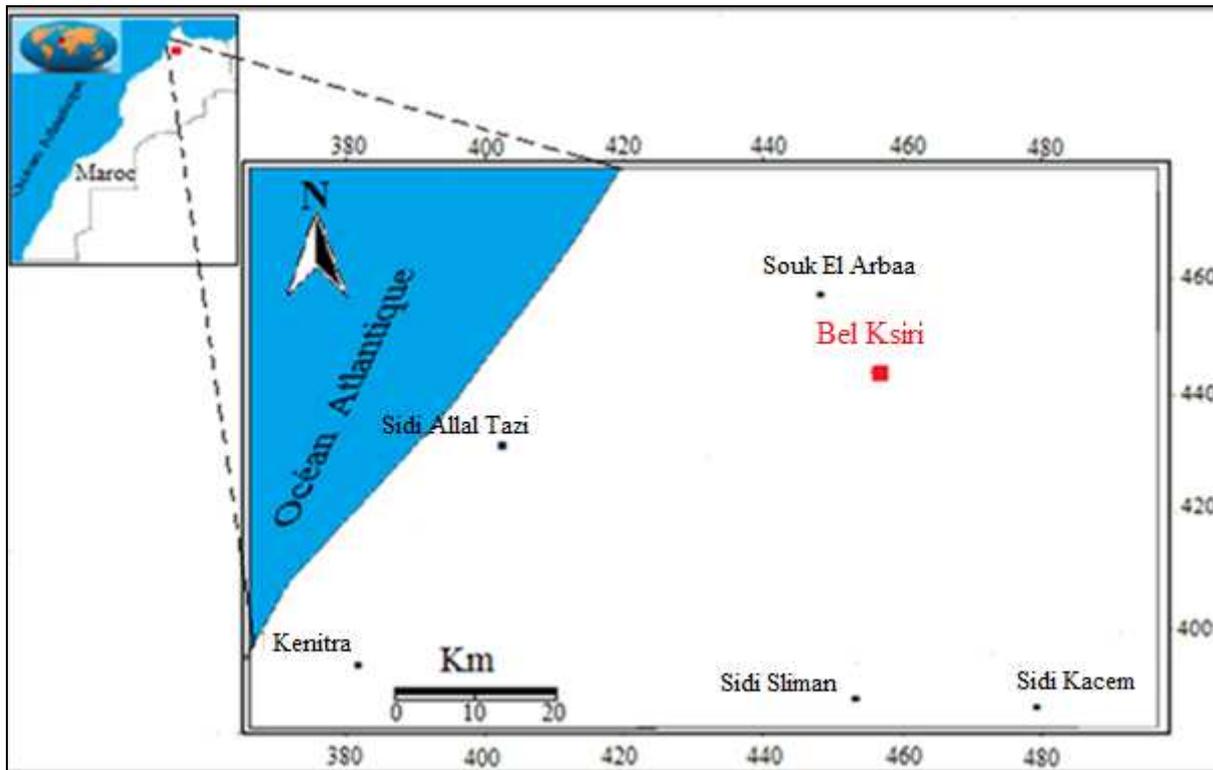


Figure1 : Zone d'étude au Maroc (ville de Bel Ksiri).

La ville de Bel ksiri est située dans la région Nord-Est de la plaine du Gharb, à environ 47 km au Nord-Est de la ville de Sidi Kacem et se trouve à environ 14,5 km au Sud de Souk El Arbaa du Gharb et 44 km au nord de Sidi Slimane, la population de la ville était de 27.630 habitants en 2004.

Coordonnée:

Sa situation en coordonnées Lambert se présente comme suit :

X : 445.600 à 450.000 NGM.

Y : 441.000 à 443.800 NGM.

IV.1.2. Activités industrielles

L'activité industrielle de la zone porte essentiellement sur l'industrie agro-alimentaire: sucreries, conditionnement des agrumes, silos à grains, coopératives laitières.

Deux sucreries SURAC et SUNACAS sont installées dans le périmètre urbain de l'ouest de la ville.

- L'usine SUNABEL est spécialisée dans la betterave. Elle traite en moyenne 4000 tonnes de betteraves par jour. Sa capacité de traitement s'élève à 320 000 tonnes de betteraves pour une période de 3 mois. Sa production de sucre est de 600 tonnes par jour.
- L'usine SURAC est spécialisée dans la canne à sucre. Elle traite en moyenne 1900 tonnes de betteraves par jour (233000tonnes sur une campagne). Sa production de sucre est de 350 tonnes par jour [2].

Les sucreries rejettent leurs déchets chargés en produits chimiques dans les bretelles des Oueds qui les charrient vers le Sebou.



Figure 2 : Schéma des eaux usées rejetées directement dans l'Oued Sebou [3].



IV.1.3. Activités commerciales

Parmi les activités commerciales nous citons:

- Les stations de service

Les stations de service sont une source importante de pollution urbaine. L'origine de cette pollution provient soit de la mauvaise altitude telle que le déversement d'hydrocarbure lors du remplissage des stockages de la station ou de la distribution de carburant, soit des corrosions des cuves enterrées ou des fuites des canalisations.

Les ruissellements provoquent le déplacement des polluants, qui peuvent contaminer ainsi la couche supérieure ou inférieure du sol et atteindre dans certains cas les nappes souterraines, ou les entraîner dans les rivières.

Dans le cas des fuites des carburants des cuves et canalisations, les polluants rejoignent plus facilement les nappes souterraines étant donné que ces installations se trouvent déjà enterrées dans les sols (Voir Annexes 3).

Dans la ville de Bel ksiri nous trouvons trois stations de service localisés sur la route de Souk El Arbaa du Gharb: TOTAL, OILIBYA et SHELL.

- La station de service TOTAL accueil 150 à 180/J de véhicules et vendent entre 2T à 3T d'essence/J.

- La station de service OILIBYA consomme presque la même quantité d'essence par jour tandis que SHELL consomme un peu moins que les deux stations, entre 1T et 2T d'essence /J.

La fuite engendrée lors du service de 5T à 8T d'essence /J par les trois stations serait paraître négligeable, or pendant un mois nous avons 150 T à 240 T d'essence et pendant une année nous avons 1800 T à 2880 T d'essence.

- Le stockage des produits chimiques agricoles

Le stockage des produits chimiques agricoles, près de conduits d'eaux souterraines, telles que les puits, les trous d'évier, est susceptible de s'accumuler et de provoquer une contamination. Cette contamination peut également se produire quand les produits chimiques sont stockés dans des secteurs découverts, non protégés du vent et de la pluie.



Les activités agricoles de la ville de Bel ksiri sont dominées par les cultures sucrières et maraîchères. La superficie agricole utile du cercle Bel ksiri est d'environ 70132 ha, dont 43941 ha sont des terrains irrigués, 42% de cette surface est cultivée en céréales, le reste est réparti entre la culture de forage, les cultures industrielles (betterave à sucre et canne à sucre), maraîchage, arboriculture, légumineuses et autres cultures [2].

Les agriculteurs de Bel ksiri utilisent intensivement des fertilisants et produits phytosanitaire; ce qui en résulte l'infiltration dans les eaux souterraines des produits agrochimiques.

Les normes élémentaires des modes de manipulation et de stockage des pesticides sont quasi inexistantes.

Quant aux techniques d'application des pesticides, les agriculteurs ne disposent ni des moyens de protection et de dosage, ni d'un minimum de formation.

La commercialisation des pesticides dans la ville de Bel ksiri est présentée par six principaux circuits (Tab.1, fig.3).

Tableau 1: Les principaux circuits de commercialisation des pesticides dans la ville de Bel ksiri [4].

Les principaux circuits de commercialisation des pesticides dans la ville de Bel ksiri		
Nombre de commerçants dans la ville	Nature du commerçant	niveau d'instruction du vendeur
6	Toutes ventes détail/semi-grossiste	1 niveau ingénieur, 4 niveau Bac ou plus, 1 non déterminé



- Une deuxième décharge se trouve au niveau du foret SOGETA sur la route menant à Souk El Arbaa [2].

Les décharges publiques non contrôlées représentent un risque de pollution, car la pente faible de la ville favorise le déplacement des eaux de pluie pénétrant dans les déchets, contribuant ainsi à la formation des eaux de lixiviations en entraînant une dégradation de la qualité des eaux souterraines.

Les principales conclusions de cette étude peuvent être résumées de la manière suivante :

- ✓ Le foyer de pollution le plus menaçant est généré par les industries agro-alimentaires spécialisées dans les sucreries de la betterave.
- ✓ Les activités agricoles et les décharges publiques non contrôlées représentent également une part non négligeable dans la pollution des eaux de surface et souterraines.
- ✓ La ville souffre d'un sous équipement en ouvrages d'assainissement, en effet ; 20% de la population ne dispose pas d'un réseau d'égout et vit par conséquent dans des conditions hygiéniques inacceptables qui constituent un danger potentiel pour la santé des citoyens de toute la ville en cas de contamination du réseau d'eau potable par les fosses d'eau usées.

Les eaux usées de toute la ville sont rejetées à l'état brut sans aucun traitement dans le milieu naturel: Oued Sebou et canal en terre Harar.

IV.2. Etude des comportements du sol et perméabilité des eaux souterraines

IV.2.1. Notions générales

Avant de déterminer la perméabilité des eaux souterraines, il apparaît important de rappeler quelques définitions:

- Eaux souterraines

Les eaux souterraines sont l'un des éléments du cycle de l'eau. Elles se forment par infiltration des précipitations ou des eaux superficielles, comme les ruisseaux et rivières. Elles sont naturellement protégées par les couches qui les recouvrent. Le sol joue ainsi un rôle particulièrement important pour assurer leur qualité. Une épaisse couche de sol en bonne santé et biologiquement actif est capable de filtrer les particules et les agents pathogènes présents dans l'eau, ainsi que de retenir, voire à décomposer, les polluants qui y sont dissous.

Les eaux souterraines peuvent alimenter les eaux superficielles ou jaillir du sol sous forme de source. L'homme les exploite parfois au moyen de stations de pompage, notamment pour s'approvisionner en eau potable.



- La perméabilité des sols

La perméabilité est une mesure de la capacité d'un type de sol (ou formation) à se laisser traverser par l'eau.

De nombreux facteurs influent sur la perméabilité du sol. Certains, comme les fissures et les trous, sont très localisés, et il est difficile de calculer des valeurs représentatives de la perméabilité au départ des mesures faites.

La perméabilité du sol est liée à la texture et à la structure du sol.

La taille des pores du sol a beaucoup d'importance en ce qui concerne le taux d'infiltration et le taux de percolation. La taille et le nombre des pores dépendent étroitement de la texture et de la structure du sol et influent également sur sa perméabilité.

- Variation de la perméabilité en fonction de la texture du sol

En général, plus la texture du sol est fine, plus la perméabilité est faible (Tab.2 et 3).

Tableau 2: Variation de la

perméabilité en fonction de la texture du sol

Sol	Texture	Perméabilité
Sols argileux	Fine	De très faible à Très forte
Sols limoneux	Modérément fine Modérément grossière	
Sols sableux	Grossière	

Tableau 3: Perméabilité

moyenne de sols de textures différentes (cm/heure)

Sable	5,0
Limon sableux	2,5
Limon	1,3
Limon argileux	0,8
Argile silteuse	0,25
Argile	0,05

- Variation de la perméabilité en fonction de la structure

La structure peut influencer considérablement les taux de perméabilité (Tab.4).

Tableau 4: Variation de la perméabilité en fonction de la structure

Type de structure	Perméabilité
Lamellaire -se chevauchant beaucoup -se chevauchant légèrement	De très faible à très forte
Anguleuse	
Prismatique	
Granulaire	

La perméabilité exprimée par le coefficient de perméabilité k , décrit le débit d'eau à travers une section de roche définie, pour une pente d'écoulement donnée, correspondant au gradient hydraulique. Elle dépend de la dimension, de la forme et des connexions des pores des sols ou des fissures des roches.

Tous les terrains (sols ou roches) sont perméables, mais à des degrés très divers (fig.4).

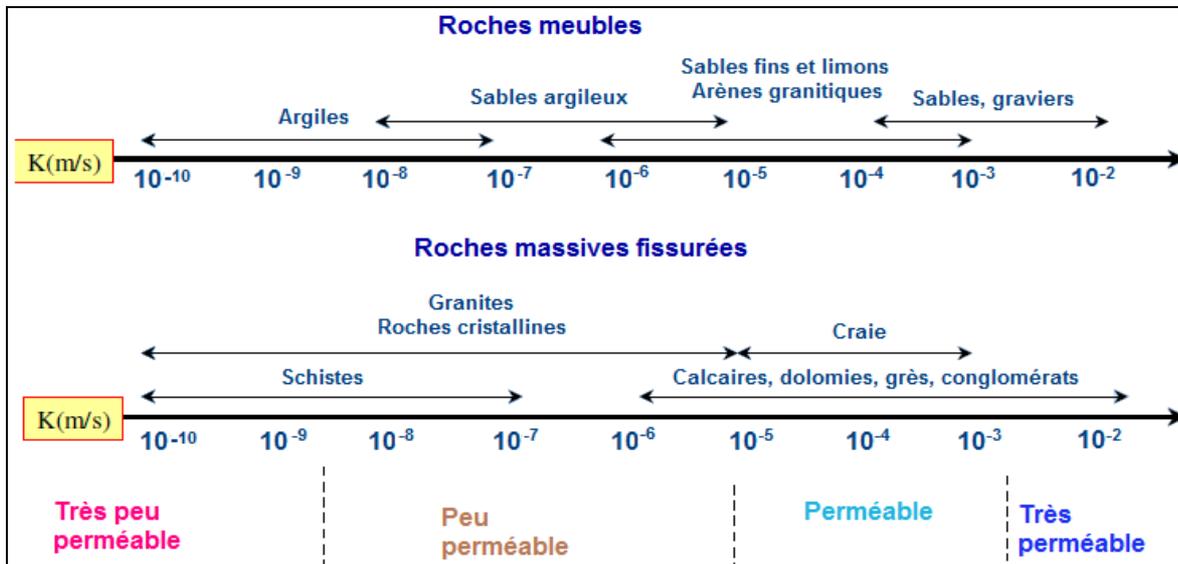


Figure 4 : Perméabilité des roches [5].

IV.2.2. la zone d'étude

- La perméabilité

Au niveau de la nappe du Gharb, l'ordre de grandeur de la perméabilité est situé entre 2 à 5.10^{-4} m/s. Les valeurs de transmissivité sont bonnes : en général de l'ordre de 1.10^{-2} m²/s (5.10^{-3} m²/s dans le cas le plus défavorable). Les valeurs du coefficient d'emménagement sont comprises entre 1 et 2.10^{-3} .

- La topographie

La zone d'étude se particularise par un caractère topographique plat.

L'analyse de la figure (5) que nous l'avons transformé du MNT en trois dimension permet de constaté que les pentes des terrains sont, dans l'ensemble de la région faibles sauf dans le Sud Est et au Nord Est de la zone où nous constatons des pentes importantes.

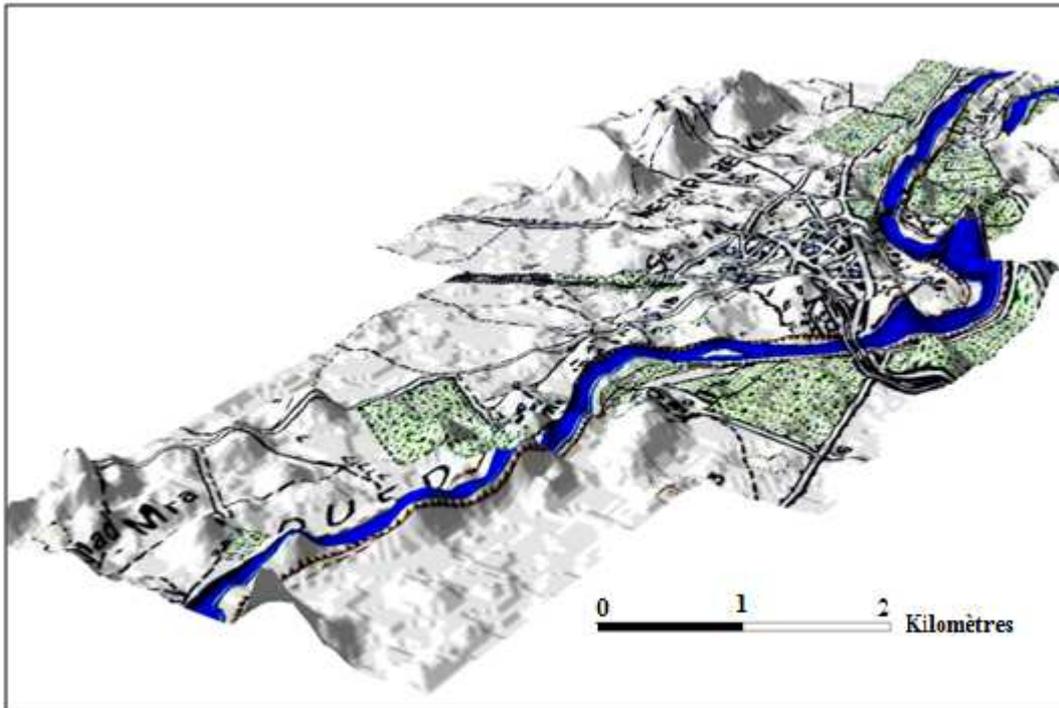


Figure 5: Carte topographique de la ville en trois dimensions (3D)

- La lithostratigraphie

La zone d'étude se trouve au Nord-Est de la plaine du Gharb, dont les séries sédimentaires Villafranchien et Quaternaire (Moulouyien-Régrégien-Salétien) d'importants épandages de galets et cailloutis, bien représentés au Nord et à l'Est de la plaine, qui peuvent atteindre 250m d'épaisseur [2].

L'aire de l'étude se caractérise par un sol généralement argilo-limoneuses (fig.6).

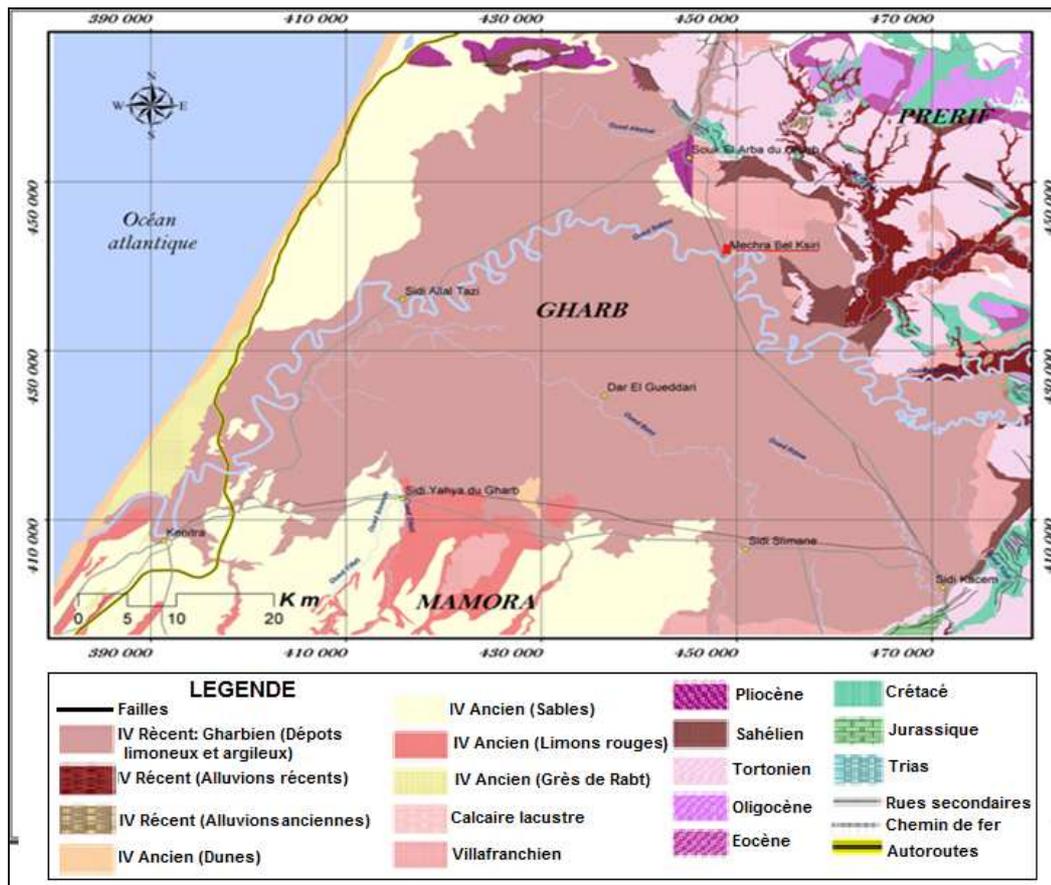


Figure 6: Carte géologique du Bassin du Gharb

Carte numérisée à partir de 5 cartes géologiques (Rabat, SidiYahi Al Gharb, Sidi Allal Tazi, Sidi Kassem, Ouezzane) d'échelle 1/100.000 [6].

- Profondeur de la nappe

La région comprend deux systèmes aquifères:

- L'aquifère supérieur:
 - Il contient une nappe phréatique à faible potentialité hydraulique et de mauvaise qualité (salinité très élevée), il est contenu dans la formation argilo-limoneuses superficielle du Quaternaire récent à perméabilité très faible.
 - Le mur de cet aquifère est difficile à définir, ce substratum est situé entre 8 et 15 m de profondeur et correspond au complexe argilo- limoneux (Amirien et Soltanien). La partie superficielle de l'aquifère est constituée par les formations argileuses et limoneuses du Gharb [9].

La nappe est alimentée par infiltration des eaux de pluies et les inondations.

- L'aquifère profond
 - Une nappe profonde importante formée à partir de sédiments argileux et sablo argileux d'une épaisseur de 50 à 150 mètres.

Au niveau de la ville, les puits ont une profondeur minimale de 12m [2].

- Recharge de la nappe :

La recharge définie la quantité d'eau de précipitation qui atteint l'aquifère.

Selon cette définition il est nécessaire de retenir les caractéristiques et les données climatiques de la zone.

- Climat

Le climat de la zone est de type continental caractérisé par une période sèche qui va du mois d'Avril au mois d' Octobre et une période relativement humide de Novembre à Mars dû à l'influence maritime, cette situation est l'origine d'une pluviométrie annuelle moyenne qui est de l'ordre de 460mm et varie d'une année à l'autre, de 201mm à 92/93 à 823 en 2003/04 (fig. 7, 8).

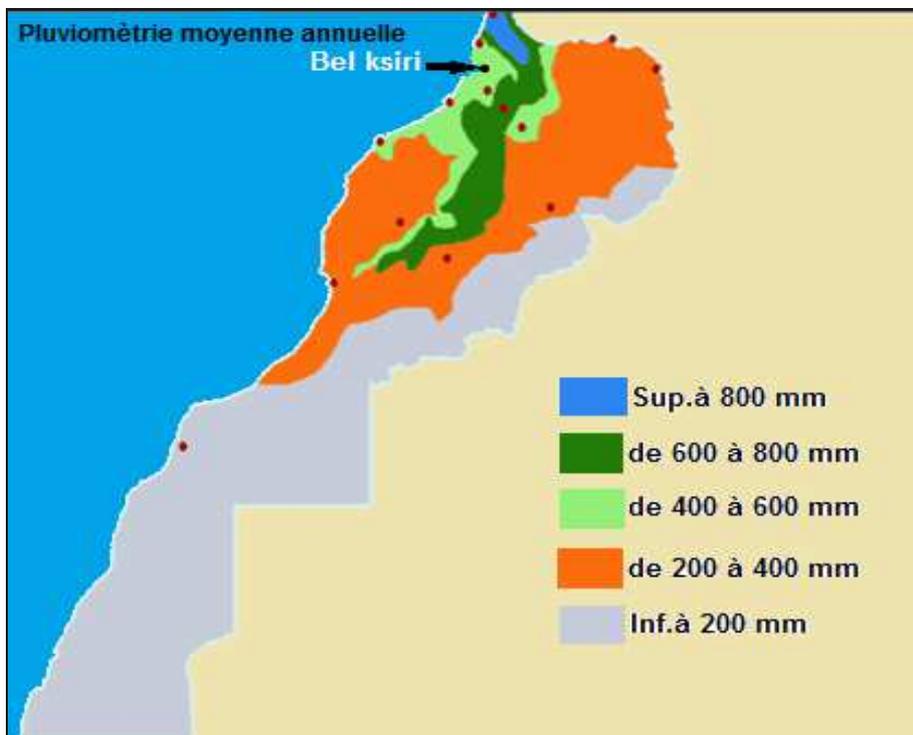


Figure 7: Pluviométrie moyenne annuelle du Maroc [7].

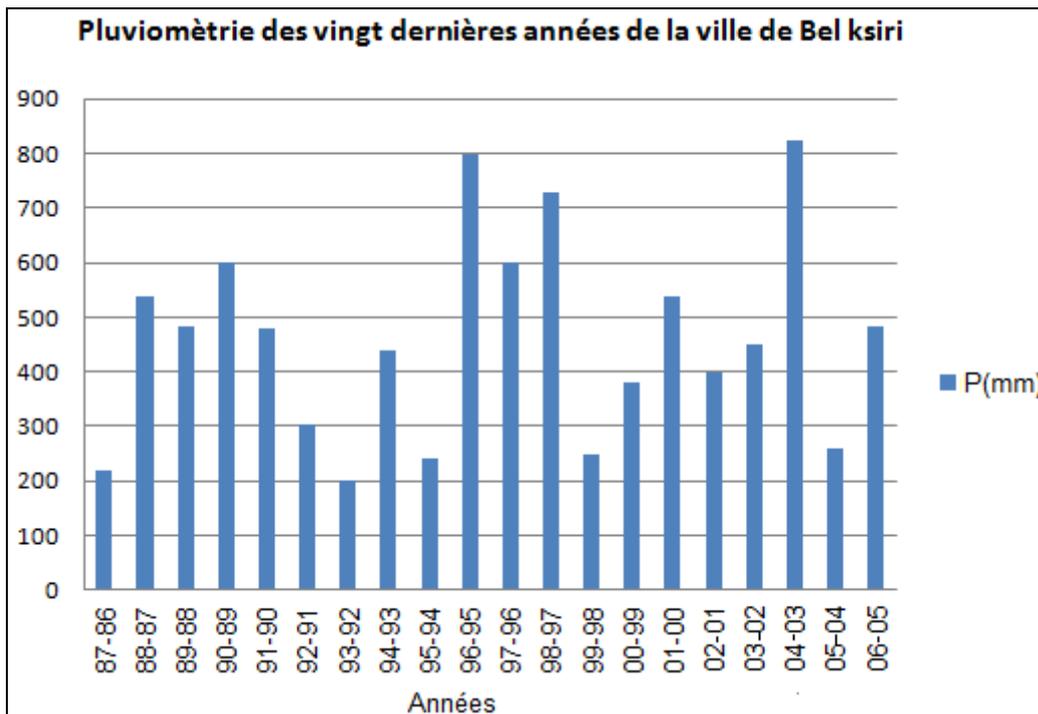


Figure 8: Pluviométrie des vingt dernières années de la ville de Bel ksiri [2].

Les températures moyennes variant de 20° à 40° en été, et de 15° et 26° en hiver. Les vents dominants sont ceux d'Ouest-Est avec certaines périodes de Chergui, particulièrement aux mois Juillet et Août.

-L'alimentation principale de la nappe et celle qui se produit grâce aux précipitations efficaces et aux retours des eaux d'irrigations.

- La recharge concentrée, prédominée par les retours d'irrigation, est estimée à 25 % [8] et les échanges avec l'oued Sebou qui sont très localisés, en particulier dans la partie centre-Ouest de la plaine. La recharge diffuse se fait par infiltration de 15 % des précipitations (donnée par le bilan hydrique).

- Les études réalisées ont montré que la nappe répond plus au moins aux variations saisonnières de la pluviométrie [9]. Le niveau piézométrique de la nappe baisse pendant la période de faibles précipitations entre les mois de Mai et Septembre. L'irrigation des terres agricoles constitue l'un des autres facteurs influençant le niveau piézométrique.

- Ecoulements locaux et régionaux

La région du Gharb comporte des ressources en eau superficielles et souterraines (fig.9)

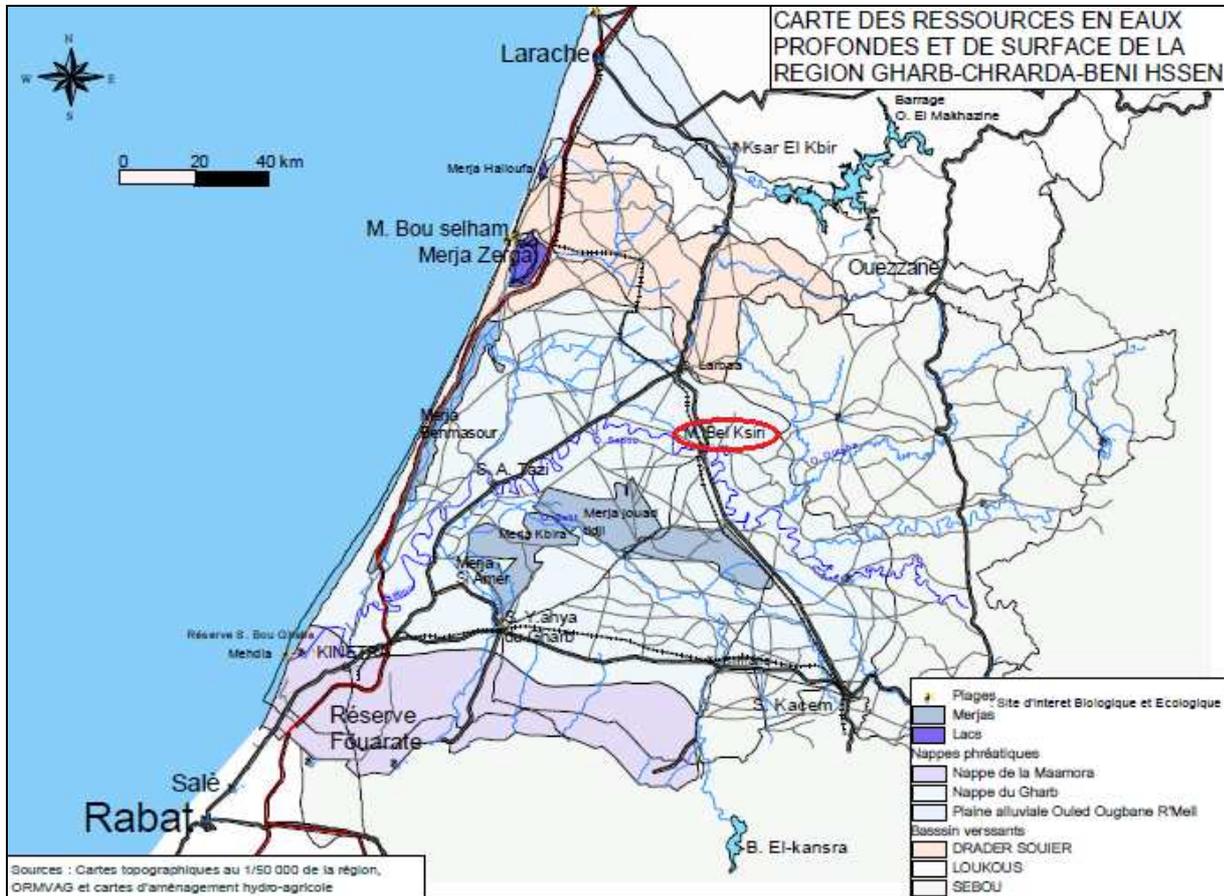


Figure 9 : Carte des ressources en eaux profondes et de surface de la région Gharb-Chrarda-Beni Hssen [7].

- Ecoulement superficiel

La rivière Sebou est le principal cours d'eau régional de la zone. Elle a une longueur de 600 km et ses eaux sont beaucoup sollicitées par l'industrie, l'agriculture et par l'approvisionnement en eau potable.

L'aquifère de la région de Bel ksiri est alimentée par les sous-écoulements de Sebou, et l'infiltration des pluies dans une région de superficie d'environ 300km² qui se trouve à l'amont de la plaine.

- Ecoulement souterrain

- Toutes les cartes piézométriques de la nappe profonde représentées dans la figure (10) montrent un écoulement général orienté d'abord vers le centre de la plaine et qui prend ensuite la direction de l'océan atlantique.
- Les états piézométriques des cartes aux cours des années, sont plus ou moins semblables, sauf pour certains secteurs comme la zone côtière et les bordures NE du bassin, ceci est en général dû au manque de données.

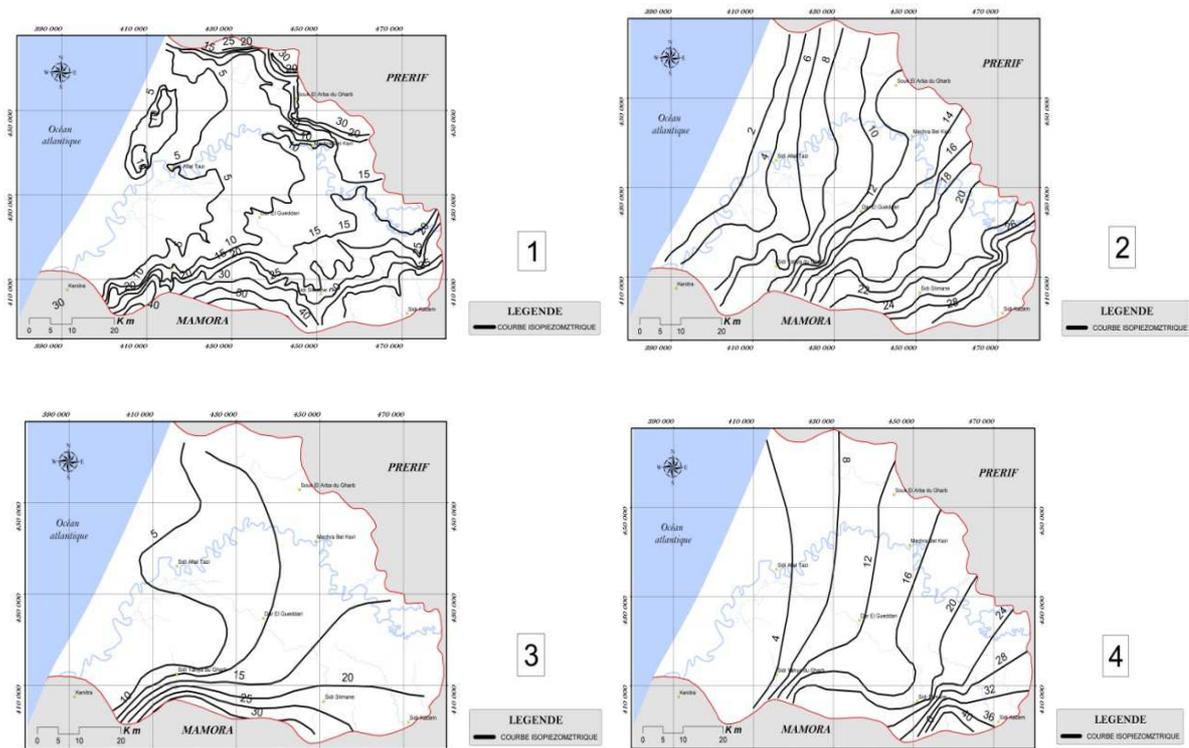


Figure10 : Différents états piézométriques de la nappe [10], [11], [12], [13].



IV.3. Choix de méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines

IV.3.1. Concept de vulnérabilité des eaux souterraines

La vulnérabilité est un terme introduit en hydrogéologie [14]. Il est défini et utilisé de manière très diverse [15], [16], [17].

Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères; d'autres estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la qualité agro-pédologique des terrains de surface.

La vulnérabilité est représentée par la capacité donnée à l'eau, située en surface, de rejoindre le milieu souterrain saturé en eau.

La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation avec la nappe d'eau souterraine procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions suivant les caractéristiques de ce milieu.

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique [18].

- **La vulnérabilité intrinsèque** est le terme utilisé pour présenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaine ;
- **La vulnérabilité spécifique** est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

La distinction des deux types de vulnérabilité est nécessaire car, d'une façon générale, elles ne se placent pas sur la même échelle d'investigation, la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants éventuels) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis.

- Critères de vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenant soit sur la nature et/ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert. Elle est évaluée en prenant en compte les caractéristiques des sols, de la zone non saturée et de la zone saturée qui contrôlent le comportement des polluants (fig.11).

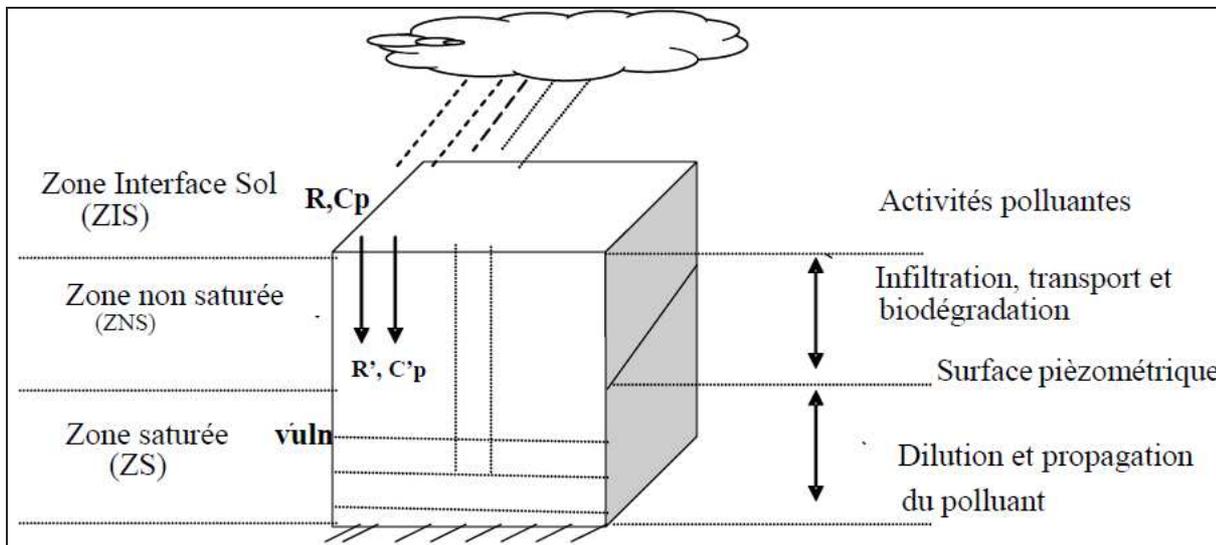


Figure 11: Schéma de la contamination des eaux

L'ensemble des critères de vulnérabilité dans la littérature sont:

- Critères relatifs au sol

- **Ruissellement-infiltration:** le ruissellement et l'infiltration efficace (quantité d'eau s'infiltrant jusqu'à la nappe) sont représentatifs de la recharge de la nappe. Ils sont étroitement liés à la topographie et à la nature des formations superficielles et peuvent être représentés dans l'espace grâce à la méthode dite des « indices de persistance des réseaux ». Cette méthode permet la représentation de la zone de recharge.
- **Préférentielle de la nappe:** elle se base sur la comparaison de la topographie traduite en zone potentiellement favorables au ruissellement ou à l'infiltration (à partir du traitement du MNT) avec le réseau hydrographique pris comme représentatif de la réalité de la répartition du ruissellement et de l'infiltration.
- **Couverture pédologique:** la nature, la texture, la teneur en argiles et en matière organique, ainsi que la puissance (ou épaisseur) et la perméabilité verticale des sols régulent la nature et la quantité d'échange entre surface et la zone non saturée.



- Critères relatifs à la zone non saturée:

- **Profondeur de la nappe libre** (ou épaisseur de la zone Non Saturée) :

L'épaisseur de la ZNS conditionne de temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interaction physico-chimiques avec l'encaissant) et donc sa possible de dégradation en cours de transfert.

- **Amplitude de battement de nappe** : l'amplitude de battement de la nappe, dans la mesure où elle est significative, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe (sol+ZNS). De ce fait elle peut devenir un critère de vulnérabilité.

- **Perméabilité verticale de la ZNS** : elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe.

- **Structure de la ZNS** : les variations de faciès, l'épaisseur des discontinuités de faciès et leurs positions dans le profil vertical, la texture, la teneur en matière organique et en argile des formations, sont autant des facteurs qui conditionnent la migration de fluides vers la nappe.

- Critère relatifs à la zone saturée

- **Type de nappe (libre ou captive)** : l'absence d'horizon imperméable entre la surface et le toit d'une nappe lui confère un caractère plus vulnérable qu'une nappe captive protégée par des formations imperméables.

- Paramètres hydrodynamique des formations aquifères (transmissivité (T), perméabilité (K), coefficient d'emmagasinement (S), gradient hydraulique (i)) : ils déterminent la vitesse de migration des polluants dans la nappe et les temps de résidence de ceux-ci dans la zone saturée.

- **Piézométrie**: elle prend en compte la géométrie de la nappe et son fonctionnement hydrodynamique qui peuvent évoluer au cours d'un cycle hydrologique complet. Entre les périodes de hautes eaux et de basses eaux par exemple, les directions d'écoulement et/ou les relations eaux superficielles/eaux souterraines peuvent s'inverser.

- **Direction et sens d'écoulement**: ils déterminent les espaces susceptibles d'être atteint par un polluant une fois que celui-ci a atteint la nappe.

- **Type de système hydrogéologique** : la vulnérabilité d'un système hydrogéologique peut être appréhendée à partir de la connaissance de sa réactivité aux impulsions pluviométrique.



Un système au caractère transmissif fort se caractérise par des temps de transfert rapides des eaux depuis la surface vers la zone saturée et par de faibles temps de séjour. Il s'agit par exemple des systèmes carbonatés fortement karstifiés. Un système au caractère inertiel et/ou capacitif fort se caractérise par des temps de transfert et des temps de séjours longs.

- **Relation nappe/cours d'eau** : les relations entre les eaux superficielles et les eaux souterraines peuvent être de deux types, drainage ou alimentation, et conditionnent la possibilité de contamination des eaux souterraines à partir des eaux superficielles.

- **Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)** : la quantité d'eau stockée dans l'aquifère détermine les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci. Cet horizon va déterminer le caractère libre ou captif de la nappe.

- Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone Saturée

- **Fracturation (direction et densité)**. Des discontinuités verticales telles que les failles peuvent dans certaine conditions, jouer le rôle de drain et augmenter très sensiblement les vitesses d'infiltration depuis la surface vers la nappe.

- **Recharge** : il s'agit de la quantité d'eau atteignant la Zone Saturé sur une période donnée (recharge annuelle nette). Elle dépend de l'infiltration efficace et de sa répartition dans l'espace et dans le temps, donc du climat (ETP, précipitation), mais également de la topographie et de la nature des formations. Elle peut être appréhendée à partir de représentation de ces différents éléments constitutifs. Elle constitue un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

Critères de vulnérabilité spécifique

- **Comportement du polluant potentiel (milieu fixe)** : selon leur nature, les polluants se comportent dans le milieu de manière spécifique. Ce comportement dépend des caractéristique du milieu, mais également des propriétés physico-chimiques du composé lui-même. Les principaux phénomènes susceptibles d'intervenir sont géochimiques (réaction acides-bases, d'oxydoréduction,...), physique (diffusion, évaporation, filtration,...), ou biophysiques (transport de germes,...).

- **Capacités dispersives et épuratoires des sols** : face à un polluant donné, les sols ont des propriétés épuratoires plus ou moins développées et spécifiques de ce polluant.



-
- **Intrusions marines (présence ou non de biseau salé)** : dans le cas de la présence d'un biseau salé en équilibre avec une nappe d'eau souterraine, la salinisation de la nappe liée à une surexploitation constitue une pollution potentielle.
 - **Qualité du réseau hydrographique** : dans le cas où il alimente les eaux souterraines, et selon son extension, sa vulnérabilité et la qualité de ses eaux, le réseau hydrographique peut être vecteur de contaminations vers les eaux souterraines.
 - **Typologie de l'occupation du sol** : l'occupation du sol conditionne les volumes et la nature des polluants potentiels. Elle peut être de type naturel (forêt/nature) ou agricole (culture, élevage) ou urbain (habitat, tissu industriel, etc....).
 - **Points sensibles** : sur certains sites, de par l'activité à risque qui y est pratiquée, la vulnérabilité de la nappe est augmentée significativement. Ce sont les surfaces agricoles, les décharges (aux normes ou non), les rejets des établissements classés, les voies de circulation, les prélèvements dans la nappe (modifiant ou non localement les écoulements et favorisant localement les transferts surfaces/nappes).

Les critères de vulnérabilité cités ci-dessous associés aux ensembles souterrains dans lesquels ils interviennent sont récapitulés dans le tableau 5.



Tableau 5: Critères de

vulnérabilité couramment prise en compte

Vulnérabilité intrinsèque			Vulnérabilité spécifique
Sol	Zone Non Saturée	Zone Saturée	
Ruissellement-infiltration	Profondeur de la nappe libre ou ZNS	Type de nappe ; libre ou captive	Occupation du sol : forêt/espace naturels, agriculture/culture (l'irrigation augmente la percolation, le drainage la diminue), urbanisation tissu industriel
Pédologie, perméabilité, verticale des sols, nature et texture des sols	Temps de transfert ; perméabilité verticale	Temps de résidence des paramètres hydrodynamique des formations aquifères présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	
	Structure de la ZNS ; variation de faciès, épaisseur des discontinuités des faciès position dans le profil vertical, texture, teneur en M.O et argile,	Relation eau souterraines/eaux superficiel	Présence ou non de biseau salé
		Piézométrie : évolution des sens et direction d'écoulement selon la période du cycle hydrologique	Points sensibles ; surfaces agricoles, décharges, rejets des établissements classés, densité des voies de circulation, prélèvement dans la nappe
		Épaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)	Capacités dispersives et épuratoires des sols face à un polluant spécifique
		type de système hydrogéologique : caractère plus ou moins capacitif et transmissif	Comportement du polluant potentiel (milieu fixe) soluble, insoluble, miscible, non miscible, plus dense, plus léger que l'eau réactivité avec le milieu traverser
		Direction et sens d'écoulement	Réseau hydrographique ; extension et vulnérabilité (qualité des cours d'eau)

IV.3.2. Relation degré de vulnérabilité- type de la nappe

La vulnérabilité varie selon le mode de circulation de l'eau dans l'aquifère et le type de la nappe.

IV.3.2.1. Nappe libre

Grace à sa configuration, la nappe libre est la plus vulnérable. En effet, les polluants d'origine superficielle peuvent se diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au plan d'eau. L'infiltration pluviale et la fluctuation verticale et saisonnière du niveau d'eau peuvent lessiver la zone non saturée et entraîner les substances qui y sont adsorbées. Selon la lithologie de l'aquifère, les modes d'infiltration des polluants sont différents et entraînant ainsi une variation du degré de la vulnérabilité (Fig.12).

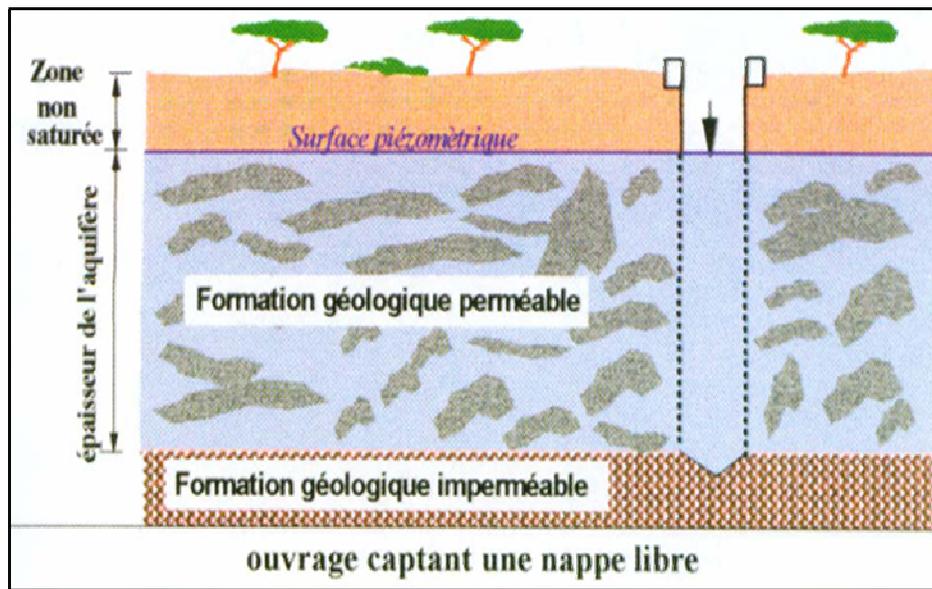


Figure 12 : Schéma de la vulnérabilité des nappes phréatiques à la pollution.

IV.3.2.2. Nappe captive

Les nappes captives sont mieux protégées par les couches imperméables qui les surmontent. Leur alimentation en eau superficielle est plus circonscrite, ce qui facilite leur protection (Fig.13).

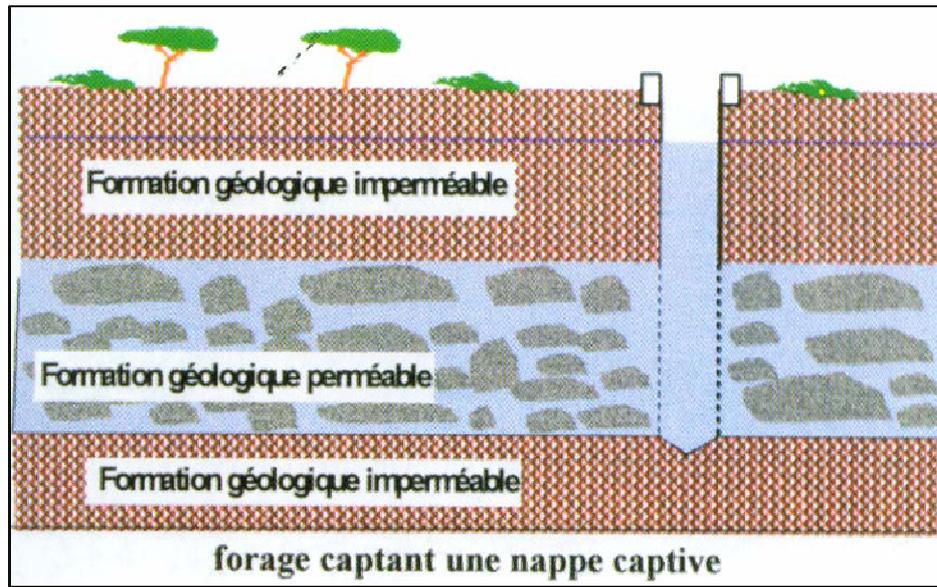


Figure 13 : Schéma de la vulnérabilité des nappes captives à la pollution.

IV.3.3. les techniques d'évaluation de vulnérabilité des eaux souterraines

Plusieurs méthodes (plus d'une vingtaine) de caractérisation de la vulnérabilité des nappes à la pollution sont citées dans la littérature internationale.

Ces méthodes sont plus ou moins complexes et plus ou moins précises.

EPIK : C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques sensu stricto [19], [20], Elle est basée sur quatre critères :

Epikarst ; Protective Cover (couverture protectrice : sol) ; Infiltration Conditions (conditions d'infiltration) ; Karst network development (développement du réseau karstique).

RISKE : Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique.

RISKE est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte :

Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst [21].

DISCO : La méthode "DISCO" (discontinuités - couverture protectrice) a pour but de définir les zones de protection en tenant compte de l'hétérogénéité du milieu. Trois paramètres sont nécessaires et suffisants pour évaluer le transport d'un polluant d'un point quelconque du bassin d'alimentation jusqu'à son arrivée au captage : le paramètre "discontinuités" ; le paramètre "couverture protectrice" ; le paramètre "ruissellement" englobe les phénomènes d'écoulement de



l'eau en surface avant son infiltration (ruissellement de pente, cours d'eau permanents ou temporaires) [22].

GOD : la méthode GOD utilise une approche empirique où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de la pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation que présente-la couche sus-jacente à la zone saturée [23].

SINTACS : La méthode SINTACS représente une adaptation de la méthode DRASTIC aux conditions méditerranéennes. Elle prend en considération les mêmes paramètres et propose cinq scénarios différents de vulnérabilité :

- Un scénario « impact normal » pour les régions faiblement cultivées et peu urbanisées.
- Un scénario « impact sévère » pour les régions où l'occupation des sols est intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, la présence de zones industrielles et urbaines denses.
- Trois scénarios qui sont fonction de l'intensité de l'infiltration des eaux superficiels vers les aquifères [24].

SI: la méthode SI (Susceptibility Index ou méthode d'Indice de Susceptibilité), qui estime la vulnérabilité verticale spécifique à la pollution agricole (essentiellement par les nitrates et également par les pesticides) [25].

DRASTIC : La méthode DRASTIC développée par l'Agence américaine de protection de l'environnement USEPA est une méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque verticale à la pollution des aquifères par systèmes paramétriques [26].

- Evaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC

C'est une des méthodes les plus utilisées dans le monde. Elle est basée sur les paramètres hydrogéologiques suivants:

- D : Profondeur de la nappe (Depth);
- R : Recharge de la nappe;
- A : Nature lithologique de l'Aquifère;
- S : Nature du Sol;
- T : Topographie;
- I : Impact de la zone non saturée;
- C : Conductivité hydraulique

Les paramètres intervenant dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines sont présentés dans la figure 14.

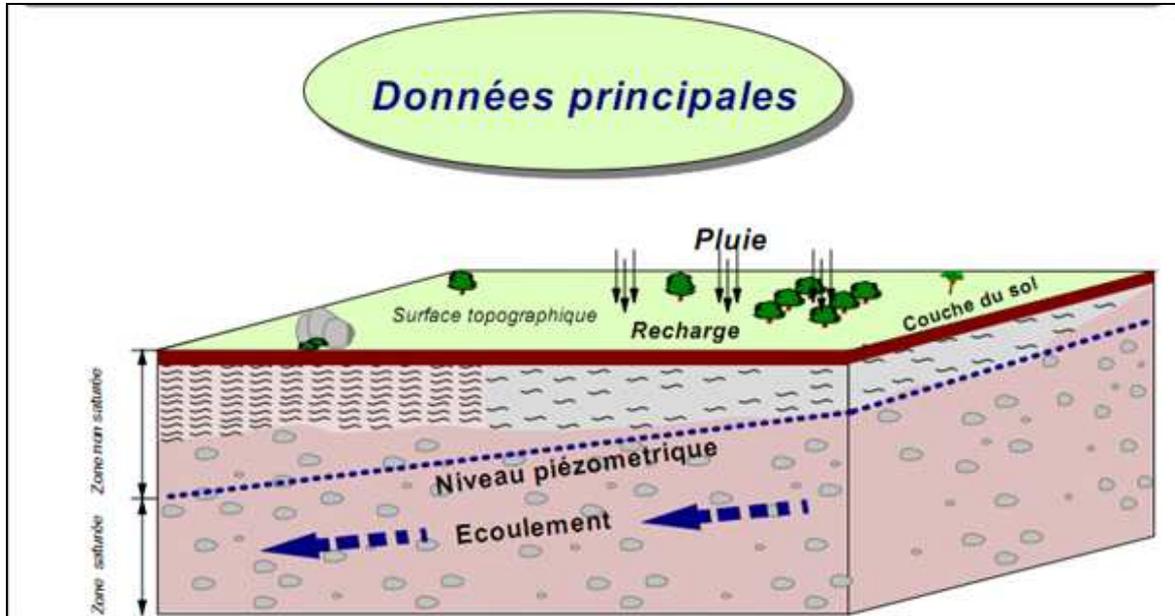


Figure 14 : Les paramètres intervenant dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines

La méthode affecte également des poids différents (variant entre 1 et 5) pour les paramètres utilisés (Tab.6).

Tableau 6: Poids attribués

aux paramètres DRASTIC

Paramètre	Poids
[D] Profondeur de la nappe	5
[R] Recharge de la nappe	4
[A] Nature lithologique de l'aquifère	3
[S] Nature du sol	2
[T] Topographie	1
[I] Impact de la zone non saturée	5
[C] Conductivité hydraulique	3



Chaque paramètre est classé en classes associées à des cotes variant de 1 à 10 qui décrit le degré de vulnérabilité de chaque unité hydrogéologique. La plus petite note représente les conditions de la plus faible vulnérabilité en contamination.

L'indice de vulnérabilité DRASTIC est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants:

$$ID = Dp * Dc + Rp * Rc + Ap * Ac + Sp * Sc + Tp * Tc + Ip * Ic + Cp * Cc$$

(Où D, R, A, S, T, I, et C les sept paramètres de la méthode DRASTIC, p étant le poids du paramètre et c, la cote associée).

La vulnérabilité qui en résulte est une mesure relative du potentiel de pollution de la zone, allant de 23 (vulnérabilité faible) à 230 (forte vulnérabilité) (Tab.7).

Tableau 7: Critère

d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
faible	<101
moyen	101-140
élevé	141-200
très élevé	>200

- Evaluation de la vulnérabilité par la méthode GOD

Le mot GOD est un acronyme des paramètres suivants:

G : Groundwater occurrence (type d'aquifère) ;

O : Overall aquifer class (caractéristiques de l'aquifère en terme de lithologie et de porosité)

D : Depth of water table (profondeur à la nappe).

Calcul de l'indice de vulnérabilité GOD:

$$god = CA \times CL \times CD$$

Avec:

CA= cote du type d'Aquifère;

CL= cote de la Lithologie de la ZNS de l'aquifère;

CD= cote de la Profondeur (Depth) à la surface de la nappe.



Les Cotes utilisées pour chaque paramètre utilisé, varient entre 0 et 1 (Tab.8, 9, 10).

Tableau 8 : Cotes du type d'aquifère utilisées pour les paramètres de la méthode GOD

Type d'aquifère	Cote
Aucun aquifère	0
Aquifère confiné et artésien	0.1
Aquifère confiné et non artésien	0.2
Aquifère semi-confiné	0.3
Aquifère avec couverture de surface assez perméable	0.4-0.6
Aquifère non confiné	0.7-1

Tableau 9 : Cotes de la lithologie de la ZNS utilisées pour les paramètres de la méthode GOD

Nature lithologique	Cote
Sol résiduel	0.4
Limon alluvial, argile, marne, calcaires fin	0.5
Sable éolien, siltite, tuf, roche ignée et métamorphique fracturée	0.6
Sable et gravier, grès, tuf	0.7
Gravier (colluvion)	0.8
Calcaire	0.9
Calcaire fracturé ou karstique	1

Tableau 10 : Cotes de la profondeur de la nappe/sol utilisées pour les paramètres de la méthode GOD

Profondeur(m)	0-2	2-5	5-10	10-20	20-50	50-100	>100
Cote	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4

-Evaluation de la vulnérabilité par la méthode SINTACS.



La méthode affecte également des poids différents pour les paramètres utilisés (Tab.11).

Tableau11 : Poids attribués
aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode.

Scénario Paramètre	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

La méthode SINTACS présente quatre degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices obtenues (Tab.12)

Tableau12 : Critère
d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SINTACS

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
faible	<106
moyen	106-186
élevé	187-210
très élevé	>210

- Evaluation de la vulnérabilité par la méthode SI (Susceptibility Index) :

Cette méthode prend en considération cinq paramètres. Les quatre premiers paramètres sont identiques à quatre paramètres dans la méthode DRASTIC (D : la profondeur de la nappe, R : la recharge efficace de l'aquifère, A : la lithologie de l'aquifère, et T : la pente topographique du terrain). Les cotes correspondantes aux différentes classes de ces paramètres, dans la méthode DRASTIC, ont été également conservées. Un cinquième nouveau paramètre a été introduit : le paramètre occupation des sols (OS). La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Land Cover [27] (Tableau13). Une valeur appelée facteur d'occupation des sols et notée



LU, variant de 0 à 100, est attribuée à chaque classe d'occupation des sols. Il est à signaler que les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres ont été multipliées par 10 pour faciliter la lecture des résultats obtenus. Ces valeurs varient par conséquent de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable. Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité (tableau14).

Tableau 13 : Principales classes d'occupation des sols et valeurs correspondantes de la méthode SI

Occupation des sols selon la classification CORINE Land Cover	Valeur du facteur d'occupation des sols LU (Land use factor)
Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines	100
Périmètres irrigués, rizières	90
Carrière, chantier naval	80
Zones artificielles couvertes, zones vertes	75
Cultures permanentes (vignes, vergers, oliviers, etc.)	70
Zones urbaines discontinues	70
Pâturages et zones agro-forestières.	50
Milieux aquatiques (marais, salines, etc.)	50
Forêts et zones semi-naturelles	0

Tableau 14: Poids attribué au paramètres SI

Paramètre	D	R	A	T	Os
Poids	0.186	0.212	0.259	0.121	0.222

La méthode SI présente quatre degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices obtenues (Tab.15)



Tableau15 : Critères

d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	<45
Moyen	45-64
Elevé	65-84
Très élevé	85-100

IV.3.4. Les outils utilisés pour la planification de l'urbanisation

Les documents d'Urbanisme Réglementaire déterminent les conditions permettant, d'une part de limiter l'utilisation de l'espace, de maîtriser les besoins de déplacements, de préserver les activités agricoles, de protéger les espaces forestiers, le patrimoine culturel, les sites et paysages naturels et urbains, de prévenir les risques naturels et les risques technologiques, ainsi que les pollutions et nuisances de toute nature et, d'autre part de prévoir suffisamment d'espaces constructibles pour les activités économiques et d'intérêt général, ainsi que pour la satisfaction des besoins présents et futurs en matière d'habitat et d'équipements publics.

- **Le Schéma Directeur d'Aménagement Urbain (SDAU)** est un outil de planification urbaine qui dresse pour un horizon temporel défini, ne dépassant pas 25 ans, les grandes lignes de développement intégré des agglomérations urbaines et leurs zones d'influence directe.
- **Le Plan de Zonage (PZ)** est un document d'urbanisme réglementaire qui répartit un territoire en zones affectées chacune à un type déterminé d'occupation du sol à l'intérieur des territoires auxquels il s'applique. Il a pour objet de prendre les mesures conservatoires pour sauvegarder les orientations du SDAU dans l'attente de l'élaboration des Plans d'Aménagement.
- **Le Plan d'Aménagement (PA)** est le document d'urbanisme réglementaire qui définit le droit d'utilisation du sol à l'intérieur des territoires auxquels il s'applique.
- **Le Plan d'Aménagement Communal (PAC)** se veut, à la fois, un document d'orientation et de développement à l'échelle de la communale qui prendrait en charge la planification territoriale et spatiale de l'ensemble de l'étendue communale, qui établira pour un centre prioritaire un plan d'aménagement et qui identifiera les centres ou parties de la commune à



couvrir par un document d'urbanisme qui, selon le cas, sera un plan d'aménagement, un plan de développement ou éventuellement un document spécifique.

- **Le Schéma Directeur d'Aménagement urbain du Littoral (SDAUL)** est élaboré pour couvrir le littoral et sa zone d'influence.

- **Le Plan de Développement des Agglomérations Rurales (PDAR)** est à la fois un document graphique et juridique. Son objectif est double :

Créer et organiser des noyaux attractifs ruraux tout en orientant leur extension.

Etre un moyen de contrôle pour toute demande d'autorisation de construire et de lotir dans les agglomérations rurales.

- **Les Plans d'Aménagement Spécifiques (PAS)** sont des documents d'urbanisme établis pour les centres ou sites présentant des particularités ou des spécificités et qui gagneraient à être approchées et gérées de la manière la plus appropriée.

- **Le Plan d'Aménagement Sectoriel de Restructuration (PASR)** est un document d'urbanisme destiné à encadrer et organiser les tissus d'habitat non réglementaires.

IV.3.5. Choix de la méthode utilisée

Les problèmes liés à la pollution des eaux souterraines constituent actuellement une source d'inquiétude qui requiert un intérêt universel.

L'urbanisation croissante et le développement économique contribuent à la dégradation quantitative et qualitative des eaux souterraines.

La protection des eaux souterraines nécessite au préalable l'étude de la vulnérabilité qui consiste à évaluer la sensibilité de la ressource à toute forme de polluant introduit à partir de la surface du sol en se basant sur les méthodes de caractérisation de la vulnérabilité (DRASTIC, GOD, SINTACS, SI...).

Cette évaluation permet en fin de compte d'élaborer une carte de vulnérabilité à la pollution.

Ce type de carte permet d'identifier très facilement les zones à risques de pollutions potentielles et elle servira donc comme un outil d'aide à la décision aux gestionnaires des ressources en eau et permettra également d'orienter l'aménagement du territoire.

Dans ce travail, nous avons considéré le cas de la ville de Bel ksiri en tenant compte essentiellement l'étude des activités agro-industrielles, agricoles et municipales d'une part et l'étude des comportements du sol (topographie, lithostratigraphie) et perméabilité des eaux souterraines (Profondeur de la nappe, recharge, et écoulements locaux et régionaux).d'une autre



part. Ces études nous ont menés au choix de la méthode à appliquée à la zone d'étude afin d'évaluer la vulnérabilité de ses ressources souterraines et de dresser une carte de vulnérabilité à la pollution.

IV.3.6. Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines de la ville de Bel Ksiri par la méthode DRASTIC

Le but des différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution est de permettre une confrontation directe, plus ou moins quantitative, entre différentes situations hydrogéologique et l'impact anthropique. Pour la sélection de la meilleure méthode qui s'adapte à la réalisation de la carte de vulnérabilité de la nappe de Bel ksiri nous avons consulté les principales méthodologies précitées. Les méthodologies adoptées dépendent, en premier lieu, de la disponibilité et la fiabilité des facteurs de vulnérabilité et en second lieu, des objectifs visés par les techniques appliquées. En effet, certaines méthodes telles que les modèles numériques ont comme objectif l'évaluation de l'impact de certaines infrastructures dont les aménagements vont porter sur l'emplacement des sites de stockage de tels déchets. D'une autre part, le calage des modèles dépend de la disponibilité et de la fiabilité des données de terrain (paramètres hydrodynamique et ceux de transport massique) qui ne sont pas toujours disponibles ou de qualité fiable. En contre partie, les techniques descriptives telles que les méthodes paramétriques sont développées pour aider à la prise de décision dans les études d'avant projet ou de gestion à l'échelle régionale concernant les occupations des sols, le choix des aires de recharge des nappes et l'implantation des ouvrages de stockage [29]. En outre, ce type de méthode se base sur la répartition spatiale des paramètres naturels et des propriétés physique du milieu. Ainsi, en tenant compte du non disponibilité des valeurs de certains paramètres, et surtout de l'objectif visé, nous avons opté pour la méthode DRASTIC pour l'étude de l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe phréatique de la ville de Bel ksiri.

V. Matériels et méthodes

Avant de passer à l'application de la méthode DRASTIC, il est nécessaire de délimiter la zone d'étude.

Pour cette délimitation nous avons pris en considération la zone qui est très peuplée dont les activités industrielles et urbaines y sont très concentrées, et qui peuvent s'étirer au long des routes avec le temps (fig.15).

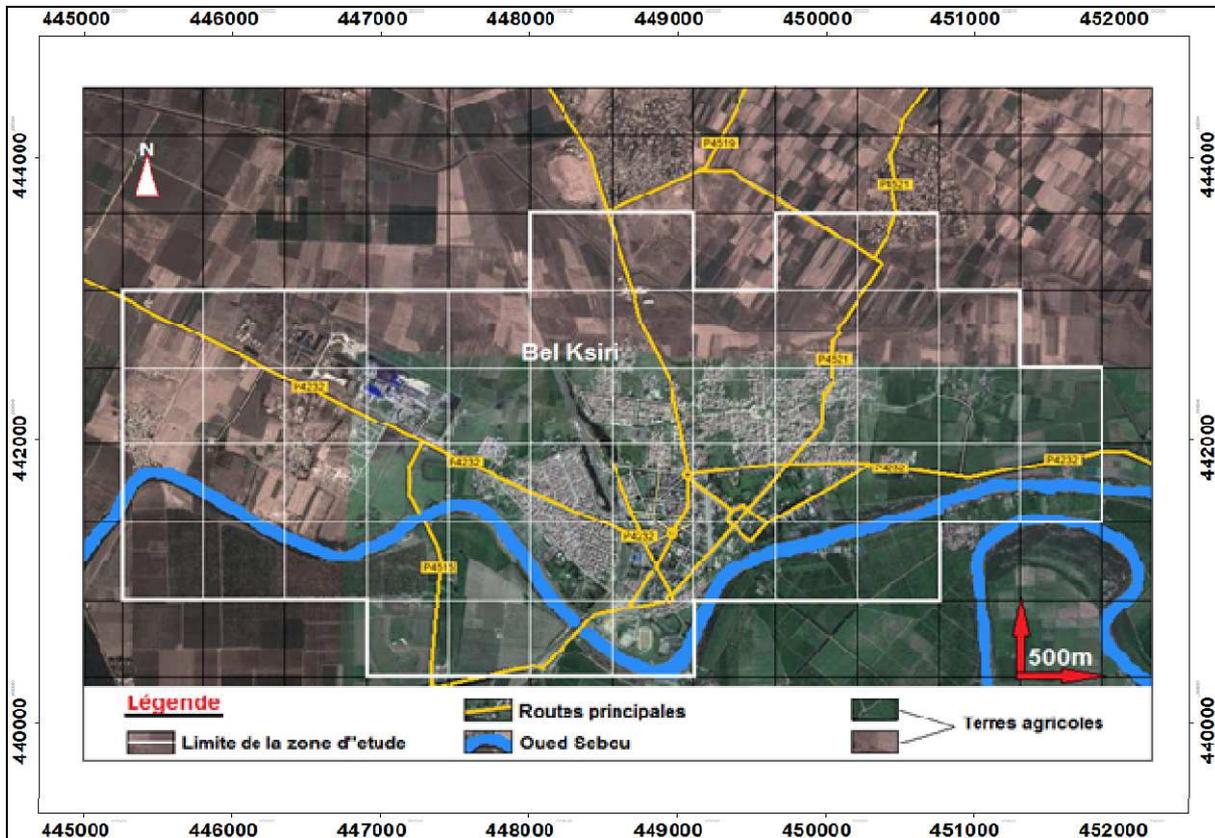


Figure 15: Carte de la limite de la zone d'étude en maillage

V.1. Etapes de réalisation de la carte pour la méthode retenue

Le matériel utilisé pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité à la pollution est constitué de:
Données cartographiques (MNT de la région, la topographie, la pédologie).
Données piézométriques (carte piézométrie).

Paramètres hydrodynamiques de la zone saturées et non saturées (perméabilité).

Le traitement de toutes ces données s'est effectué avec les logiciels Arc Map.

V.1.1. Profondeur du plan d'eau (D)

Selon la méthode DRASTIC, la profondeur de la nappe est cotée comme l'un des paramètres les plus importants avec une pondération de **5** ; les valeurs des cotes sont de 0 à 31 mètres (Tab. 16)

Cette profondeur conditionne le temps de transfert du polluant et sa possibilité de dégradation, plus elle est grande, plus le contaminant met beaucoup de temps pour atteindre le niveau d'eau (Fig.16).

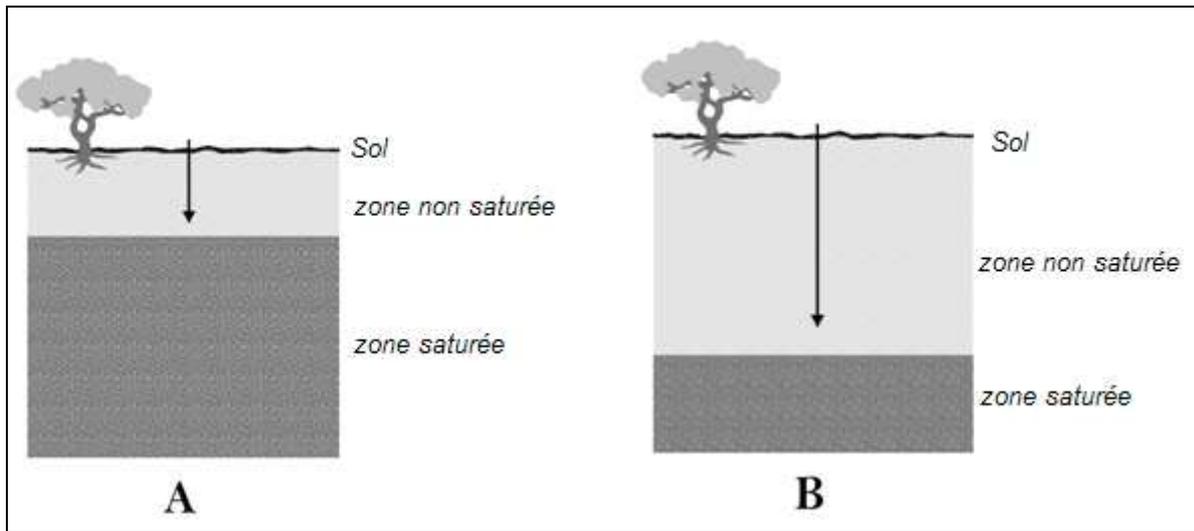


Figure 16: Schéma du trajet d'un polluant selon la profondeur de la nappe.

Il est défini comme étant la différence de niveau entre la surface topographique et la surface piézométrique.

Selon cette définition nous avons fait les étapes suivantes :

Nous avons déjà un MNT de la région sa résolution qui est de 30m, nous coupons le MNT régional (dimension (90km x200km) par le fichier de forme représentant la zone d'étude et nous obtenons le MNT de la zone d'étude.

Pour la piézométrie de la nappe superficielle nous avons des lignes isopiézométriques que nous transformons en polygone qui est transformé de son tour (par arc toolbox) en raster.

Pour obtenir la couche de la profondeur (paramètre D) nous avons utilisé « Raster Mathématique » et nous avons fait la soustraction des deux fichiers MNT de la zone et piézométrie de la nappe (MNT(ZE)-Raster (piez)), ensuite nous avons classifié le résultat obtenu dans le tableau 16.

Tableau 16: Ponctuation attribuée à chaque profondeur du plan d'eau [26] [24].

Profondeur du plan d'eau	Cote
0-1,5	10
1,5-4,5	9
4,5-9	7
sept-15	5
15-23	3
23-31	2
>31	1

Le résultat obtenu pour la Profondeur est présenté par la figure 17.

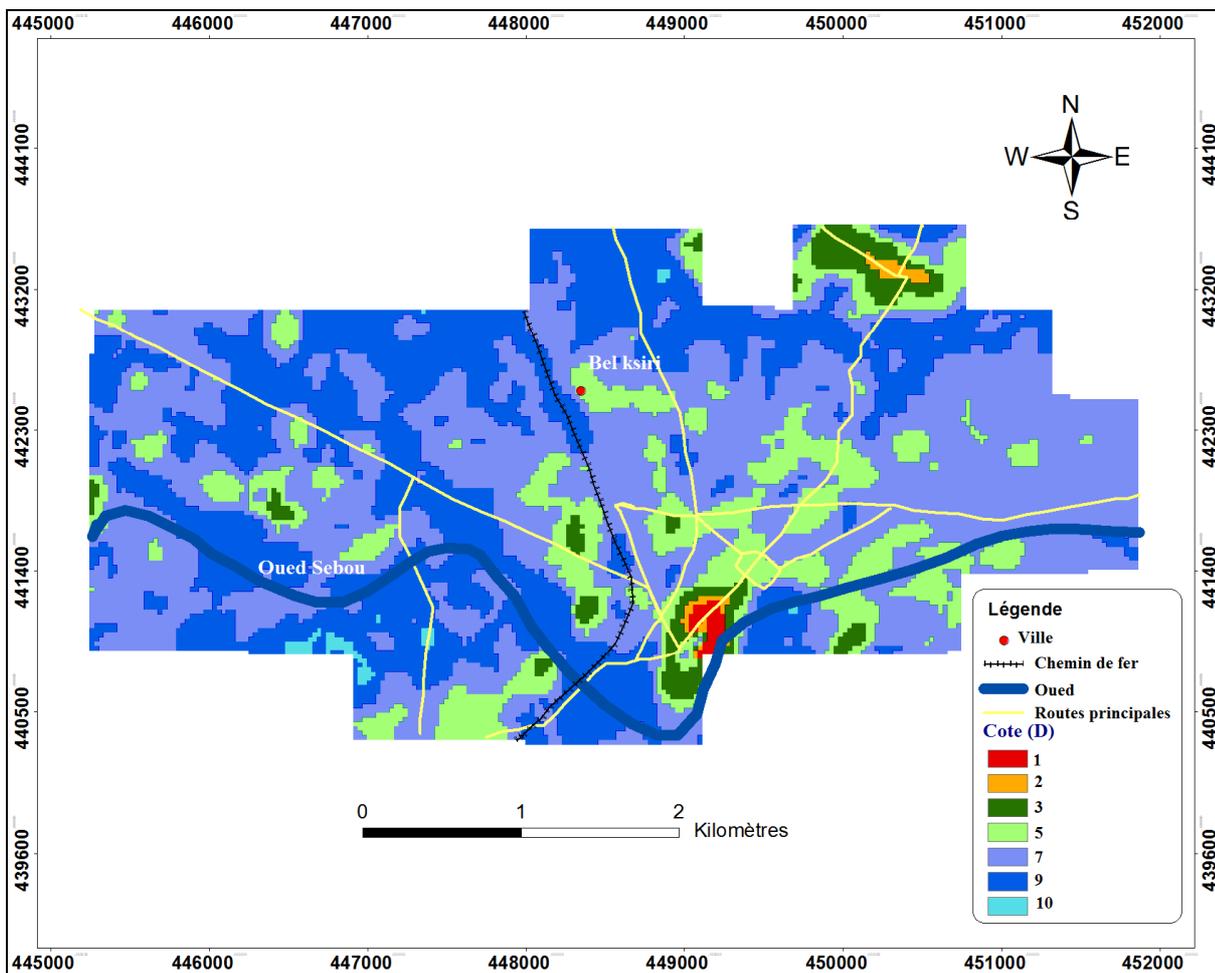


Figure 17 : Carte des cotes correspondent à la profondeur du plan d'eau de la nappe phréatique de Bel ksiri

V.1.2. Recharge efficace (R)



Définit la quantité de l'eau par unité de surface qui s'infiltré et rejoint l'aquifère. Cette eau permet de transporter le polluant de la surface de la terre vers la zone saturée en traversant la zone vadose. Généralement plus la quantité d'eau est importante, plus la possibilité de contaminer la nappe est élevée.

Le paramètre recharge naturel peut être représenté par la carte des isohyètes qui est une carte d'égale valeur pluviométrique.

Ce facteur est coté par un facteur de pondération **4**, ce qui reflète son importance.

La zone d'étude est caractérisée par une pluviométrie moyenne dont la moyenne annuelle dépasse le 470 mm/an et suivant la ponctuation du tableau ci-dessous nous avons attribué à la zone la cote 9.

Tableau 17 : Intervalles de

recharge nette et leurs notes [26] [24].

Classe (mm/an)	Cote
450-455	1
455-460	3
460-465	6
465-470	8
>470	9

D'après la table attributaire de la couche « recharge », nous transformons la couche qui est sous forme polygone en mode raster et nous obtenons le résultat suivant:

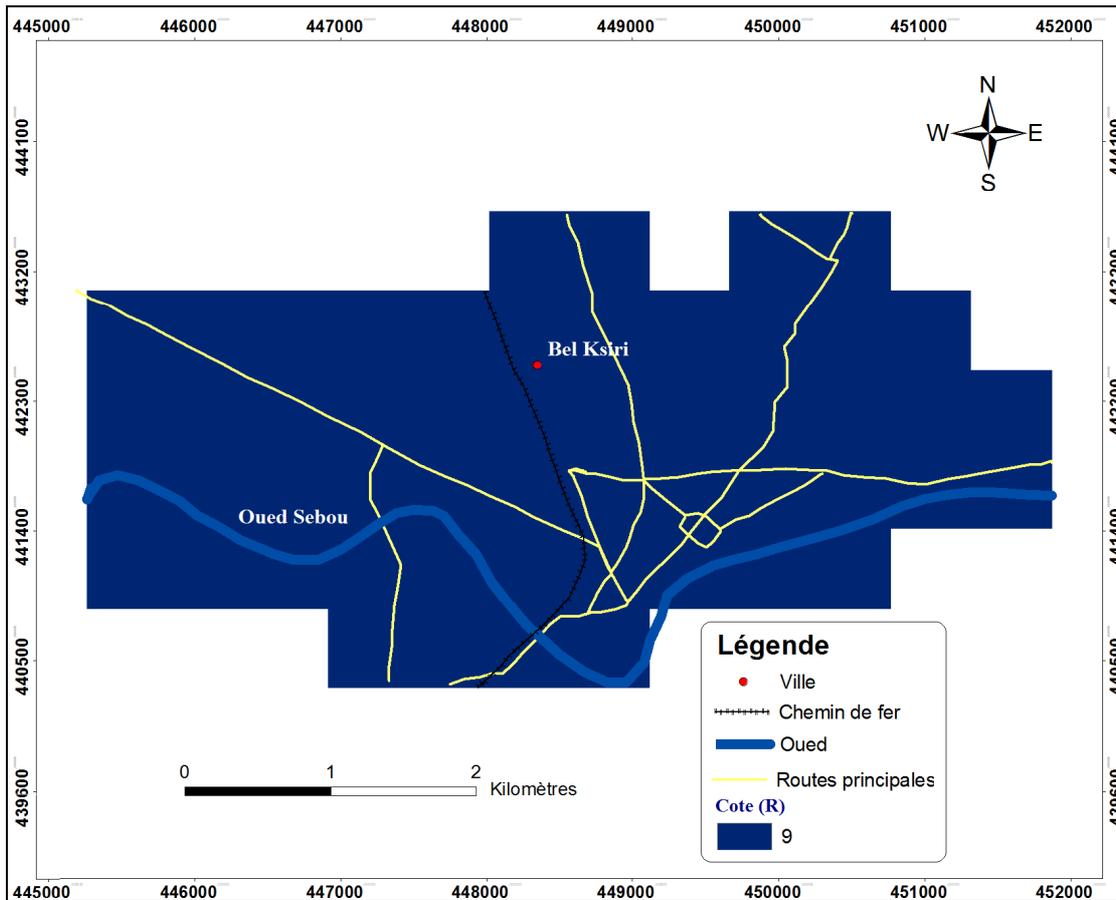


Figure 18 : Carte des cotes correspondant à la recharge de la nappe phréatique de Bel ksiri.

V.1.3. Nature lithologique de l'aquifère (A)

La nature lithologique ou précisément la Zone Saturée (ZS) est le lieu de la propagation et de la dilution de la pollution.

Suivant la lithologie de l'aquifère nous attribuons une ponctuation bien déterminée, le tableau qui suit résume la ponctuation attribuée pour chaque type de sol.

Tableau 18 : Ponctuation

pour le paramètre lithologique d'aquifère [26], [24].

Nature lithologique de l'aquifère	Cote
Argileux	1
Limono-argileux	3
Sableux	9

La lithologie de l'aquifère qui domine dans notre zone d'étude est de type limono-argileux, donc nous lui avons attribué la cote 3 et nous avons le résultat suivant.

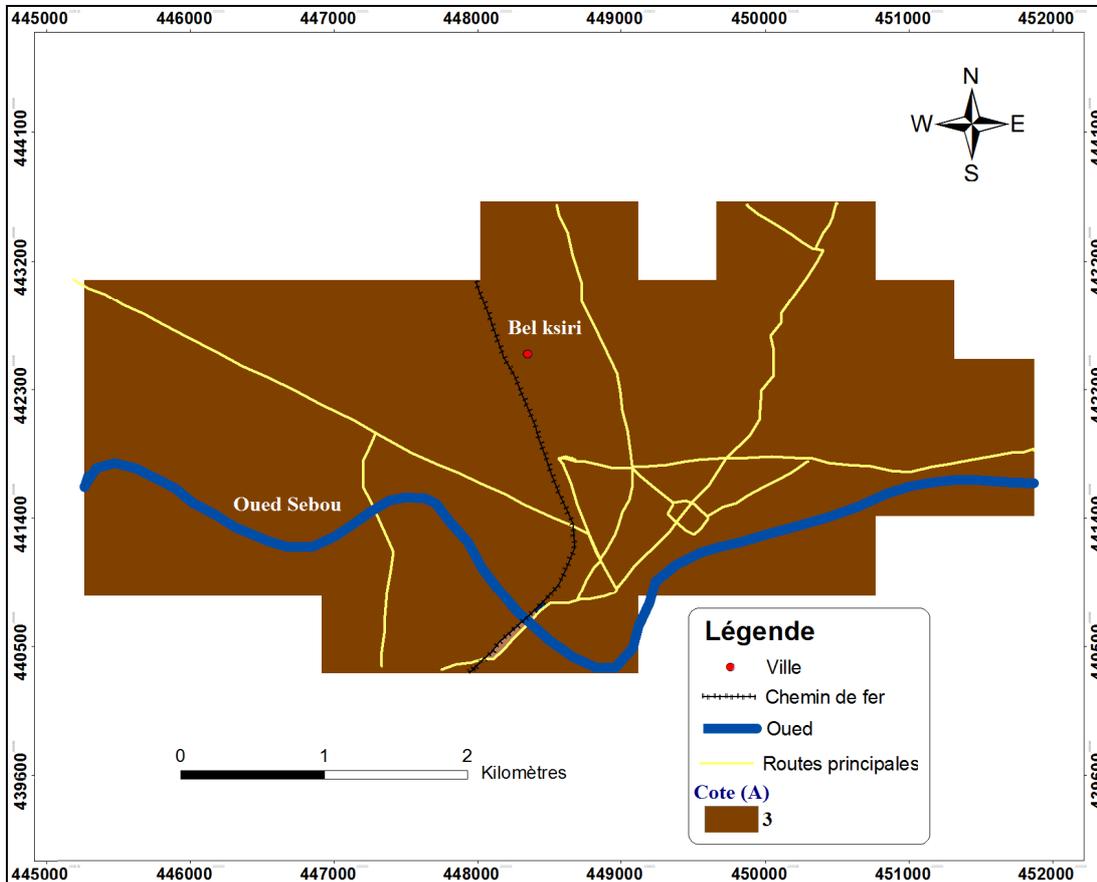


Figure 19 : Carte des cotes correspondant à lithologie de la zone saturée de la nappe phréatique de Bel ksiri

V.1.4. Nature de sol (S)

Les caractéristiques du sol guident le mouvement descendant des contaminants. La présence de matériaux fins (argiles, silts et limons) et de la matière organique dans le sol diminue la perméabilité intrinsèque, et retarde la migration des contaminants, par les processus physico-chimiques (adsorption, échange ionique, oxydation, biodégradation).

Pour déterminer le quatrième paramètre de la méthode utilisé nous avons converti la couche « pédologie » en mode raster après avoir déterminé les classes et les cotes retenues pour le paramètre S par la méthode DRASTIC selon le tableau 19.



Tableau 19 : Ponctuation

attribuée à chaque nature du sol [26] [24].

<i>Nature du sol</i>	<i>Cote</i>
<i>Sol mince ou roc</i>	<i>10</i>
<i>Gravier</i>	<i>10</i>
<i>Sable</i>	<i>9</i>
<i>Tourbe</i>	<i>8</i>
<i>Argile fissurée</i>	<i>7</i>
<i>Limon sableux</i>	<i>6</i>
<i>Limon</i>	<i>5</i>
<i>Limon silteux</i>	<i>4</i>
<i>Limon argileux</i>	<i>3</i>
<i>Terre noire</i>	<i>2</i>
<i>Argile</i>	<i>1</i>

Dans la zone d'étude nous avons des limono-argileux, donc nous l'attribue la cote 3 et nous avons a le résultat suivant:

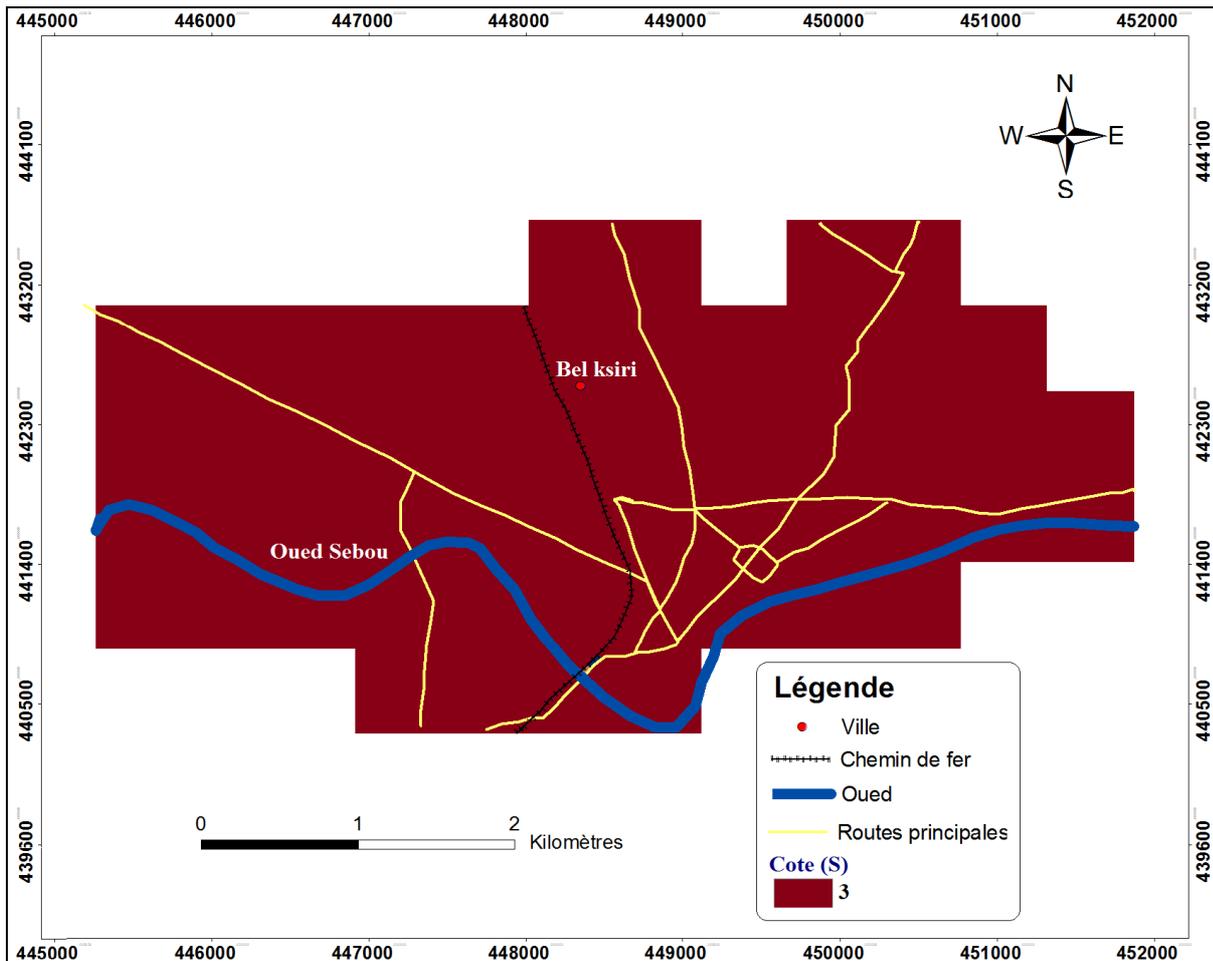


Figure 20 : Carte des cotes correspondant à la nature du sol de la nappe phréatique de Bel ksiri

V.1.5. Topographie (T)

Le paramètre topographie est représenté dans la méthode DRASTIC par les valeurs de la pente. Ces valeurs sont calculées en pourcentage. La pente influence d'une part le taux d'infiltration et de ruissellement de l'eau dans les bassins versants et d'autre part l'érosion et le développement du sol. La topographie conditionne l'aptitude du ruissellement ou l'infiltration des eaux de pluie et d'irrigation chargées en polluants dans les formations aquifères.

En effet l'opposé d'une pente faible est une pente raide indiquant une forte tendance des eaux à rejoindre les cours d'eaux, en échappant à l'infiltration dans les terrains sous jacents. Ces zones sont par ailleurs considérées moins vulnérables à la pollution. (Fig. 21)

Le paramètre de pente est pondéré de 1 et les cotes varient entre 0 et 18 % (Tab.20)

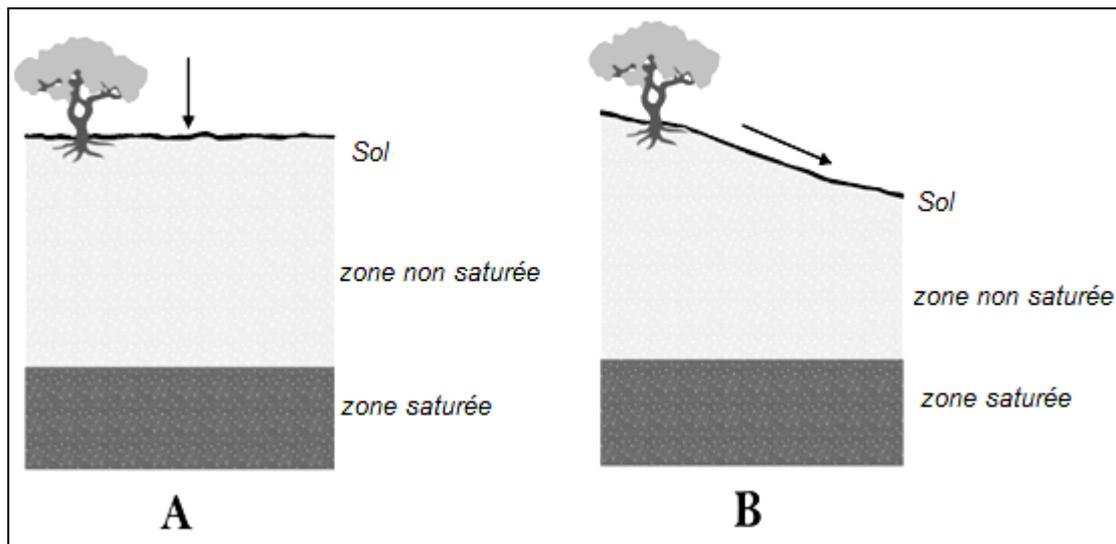


Figure 21 : Schéma de l'infiltration du contaminant selon la pente.

Le modèle numérique de terrain a été utilisé pour calculer la pente en tous points dans la zone d'étude. Ce modèle a été généré à l'aide de l'extension 3D analyste.

Les différentes classes de la ponctuation attribuées au paramètre topographie sont présentées dans le tableau 20.

Tableau 20 : La ponctuation

attribuée au paramètre topographie [26] [24].

Topographie (pente) (%)	Cote
0 à 2	10
2 à 6	9
6 à 12	5
12 à 18	3
>18	1

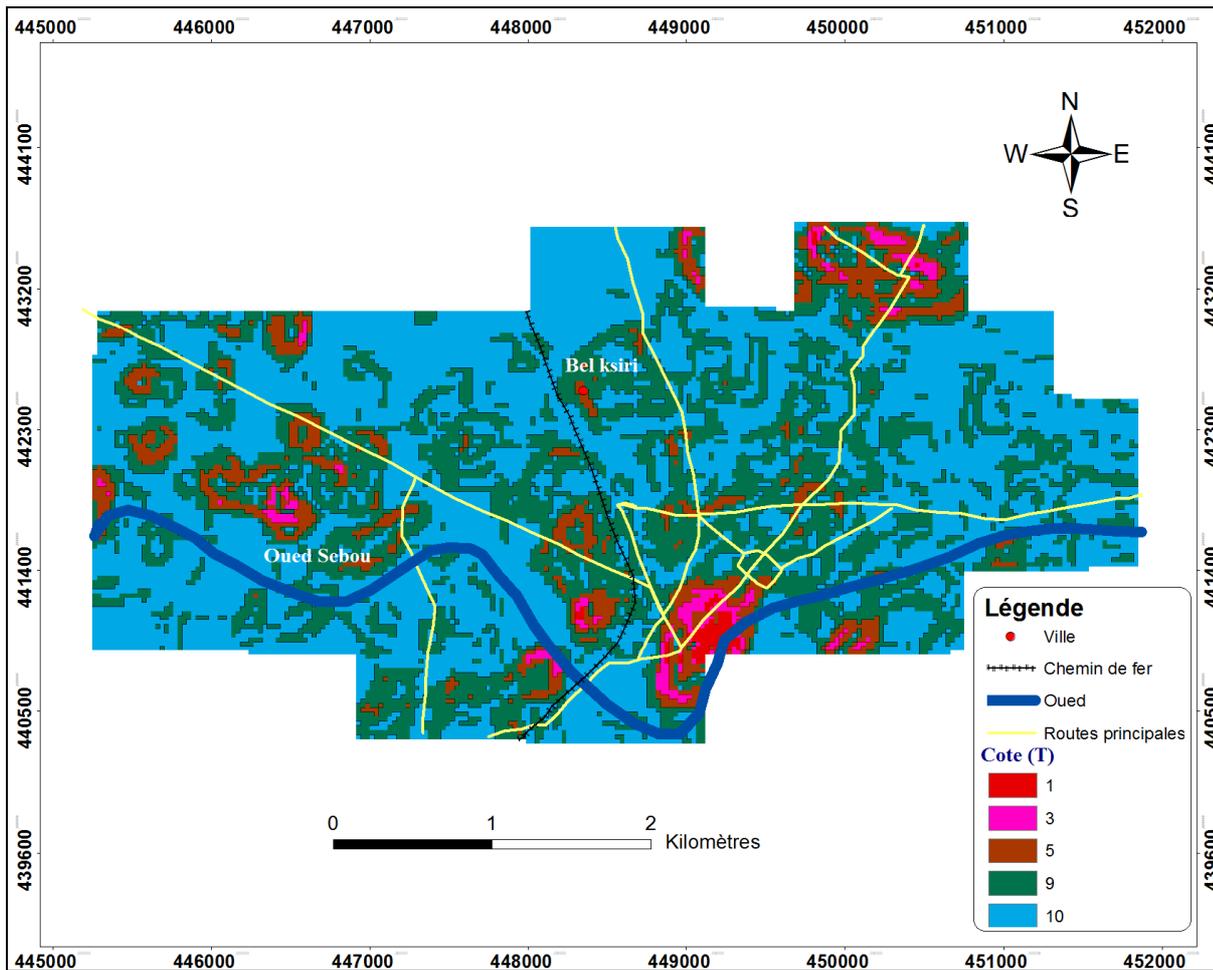


Figure 22: Carte des cotes correspondant à la topographie de la nappe phréatique de Bel ksiri.

V.1.6 Impact de la zone non saturée (I)

La zone non saturée est définie comme la fraction entre la nappe et la surface du sol où les pores sont partiellement saturés en eau.

La perméabilité de cette zone non saturée contrôle la circulation des polluants et leur arrivée à la nappe.

La plupart des processus physico-chimiques qui ont lieu dans cette zone sont influencés par l'épaisseur de cette partie.

Ce paramètre à une pondération de **5** due à son importance, les cotes attribuées sont les mêmes que la nature lithologique de la zone saturée (Tab.18) et nous avons le résultat dans la figure 23.

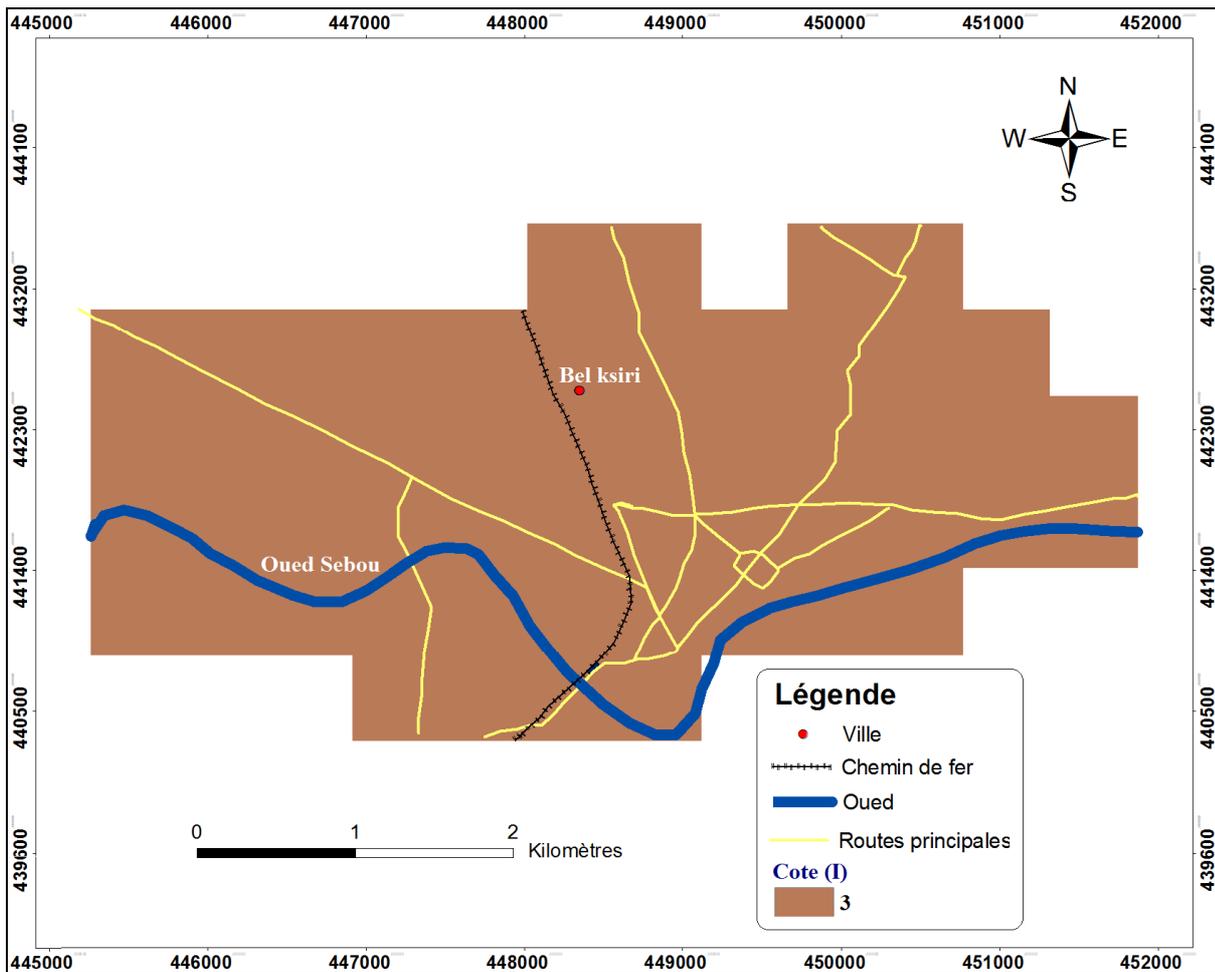


Figure 23 : Carte des cotes correspondent à lithologique de la zone non saturée de la nappe phréatique de Bel ksiri.

V.1.7 Conductivité hydraulique (perméabilité de la zone saturée) (C)

La conductivité hydraulique conditionne la rapidité de propagation du polluant, plus elle est grande, plus le transfert de contaminant est rapide.

Ce facteur à un poids paramétrique de **3** et une cote varie selon le (Tab. 21).

Tableau 21 : La ponctuation

attribuée au paramètre topographie [26] [24].

Perméabilité équivalente (Keq) (m/s)	Cote
4.10^{-6} - 5.10^{-5}	1
5.10^{-5} - 2.10^{-4}	2
2.10^{-4} - 4.10^{-4}	4

$4 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$	6
$5 \cdot 10^{-5} - 10^{-3}$	8
$10^{-3} - 3,5 \cdot 10^{-3}$	10

Dans notre cas la conductivité est comprise entre 2 à $5 \cdot 10^{-5}$ m/s, donc nous lui avons attribué la cote 6, et nous obtenons le résultat suivant:

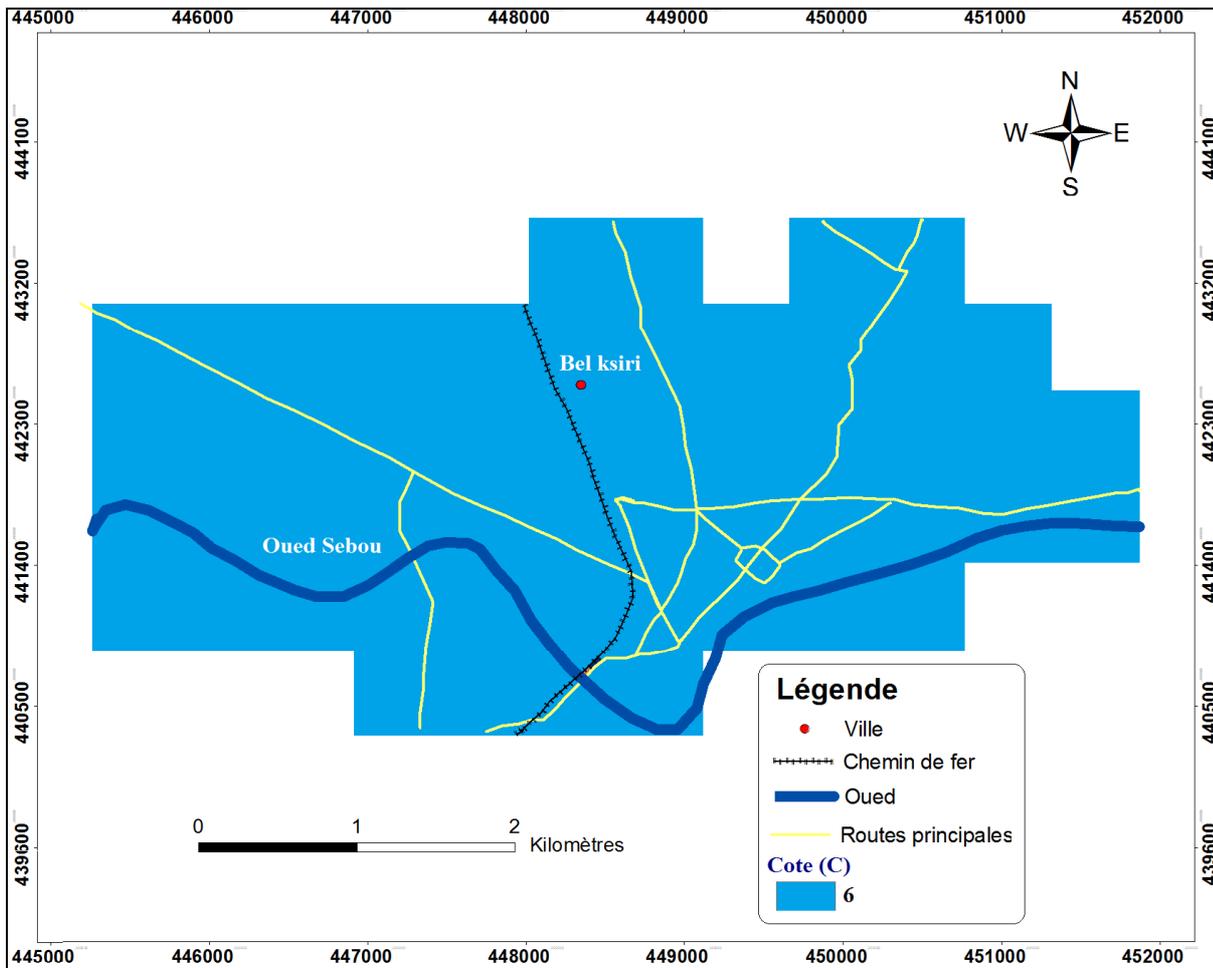


Figure 24: Carte des cotes correspondent à la perméabilité de la nappe phréatique de Bel ksiri.

V.2. Réalisation de la carte de vulnérabilité des eaux souterraines de la ville de Bel Ksiri

L'élaboration de la carte de vulnérabilité est effectuée par le calcul de l'indice de vulnérabilité (Di) qui intègre les sept paramètres, selon la formule suivante:

$$ID = Dp \cdot Dc + Rp \cdot Rc + Ap \cdot Ac + Sp \cdot Sc + Tp \cdot Tc + Ip \cdot Ic + Cp \cdot Cc$$

(Où D, R, A, S, T, I, et C les sept paramètres de la méthode DRASTIC, p étant le poids du paramètre et c, la note associée).

L'outil «RASTER Mathématique» du menu " 3D Analyst" qui offre plusieurs types d'opération mathématique entre Raster, permet la combinaison de toutes les cartes que nous avons déjà réalisées pour obtenir une carte (fig.25) qu'on peut la reclassé selon le tableau(22) avec l'outil "3D analyst" de l'Arcgis et finalement nous avons pu dresser la carte de la vulnérabilité classée de la nappe (fig.26)

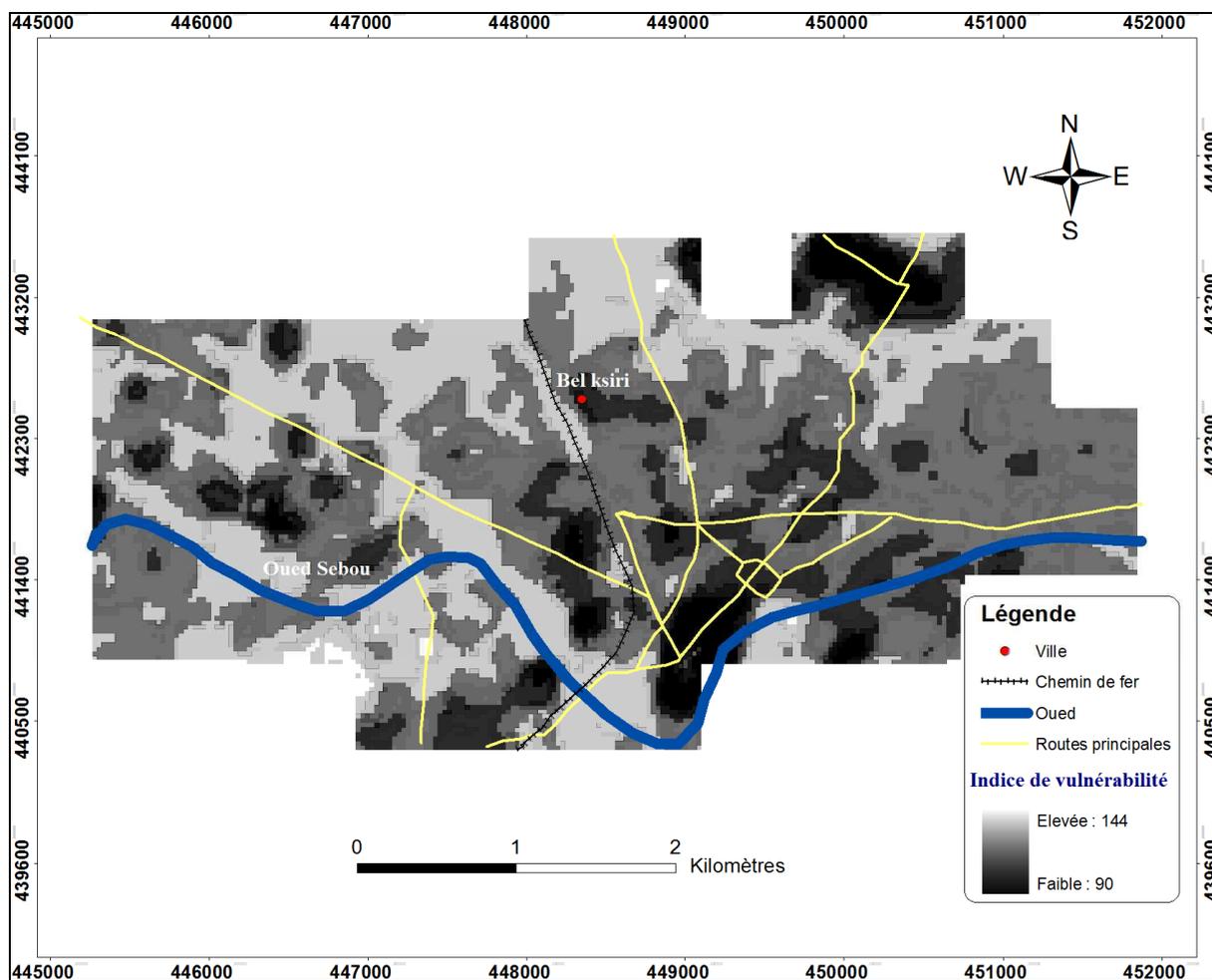


Figure 25: Carte intermédiaire de la vulnérabilité de la nappe phréatique de Bel ksiri.



Tableau 22 : Intervalles de

vulnérabilité [26] [24].

Intervalle	Classe drastique
23-79	8
80-99	7
100-119	6
120-139	5
140-159	4
160-179	3
180-199	2
200-226	1

Les classes 1 et 2 présentent une vulnérabilité extrême.

La classe 3 présente une vulnérabilité élevée.

Les classes 4 et 5 présentent une vulnérabilité modérée.

Les classes 6 et 7 présentent une vulnérabilité faible.

La classe 8 présente une vulnérabilité très faible.

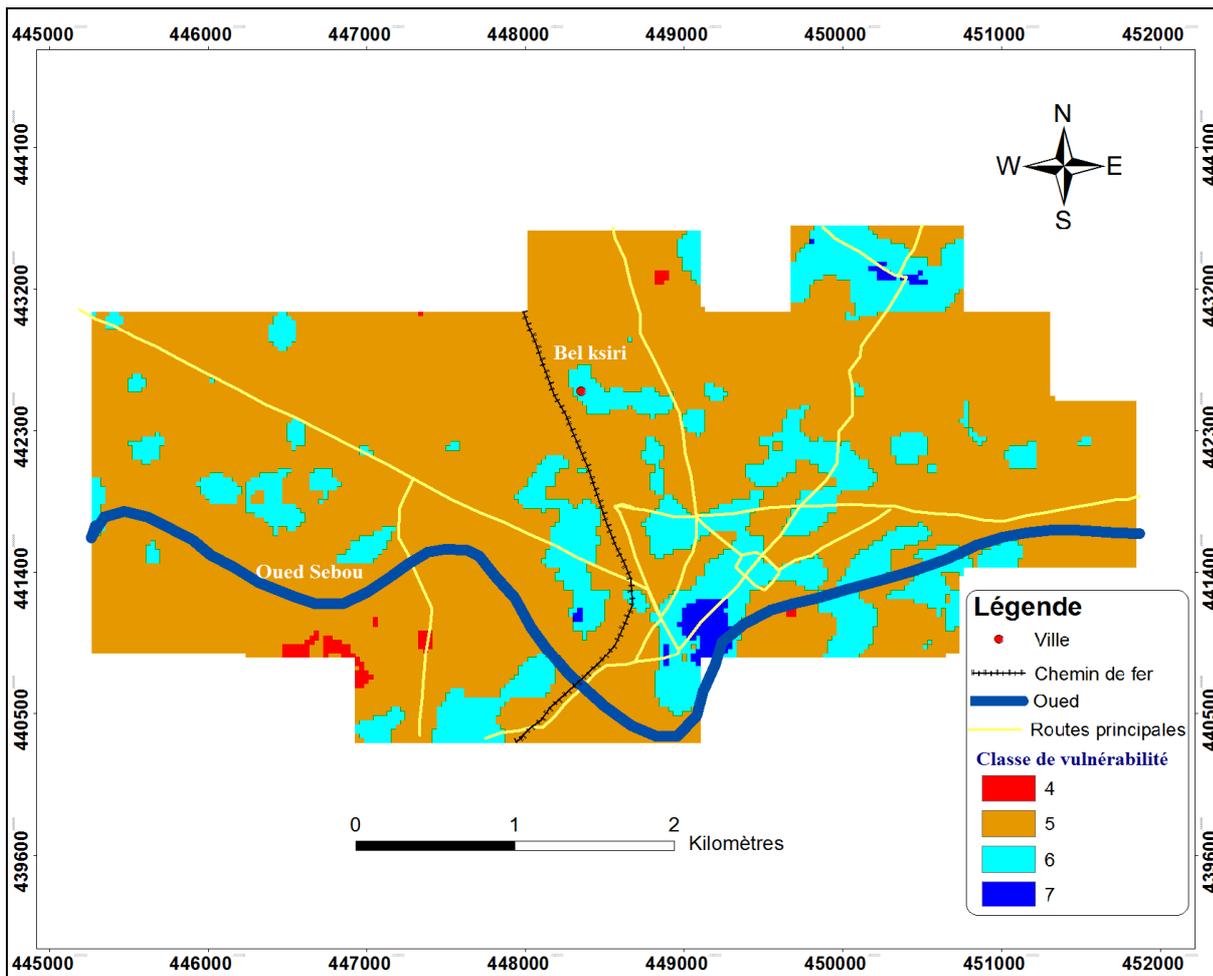


Figure 26: Carte de la vulnérabilité classée de la nappe phréatique de Bel ksiri.

L'Arcscene nous a permis de draper la carte de vulnérabilité sur le MNT de la zone d'étude, cette carte mis en évidence la relation étroite entre la vulnérabilité et l'altitude. (fig.27).

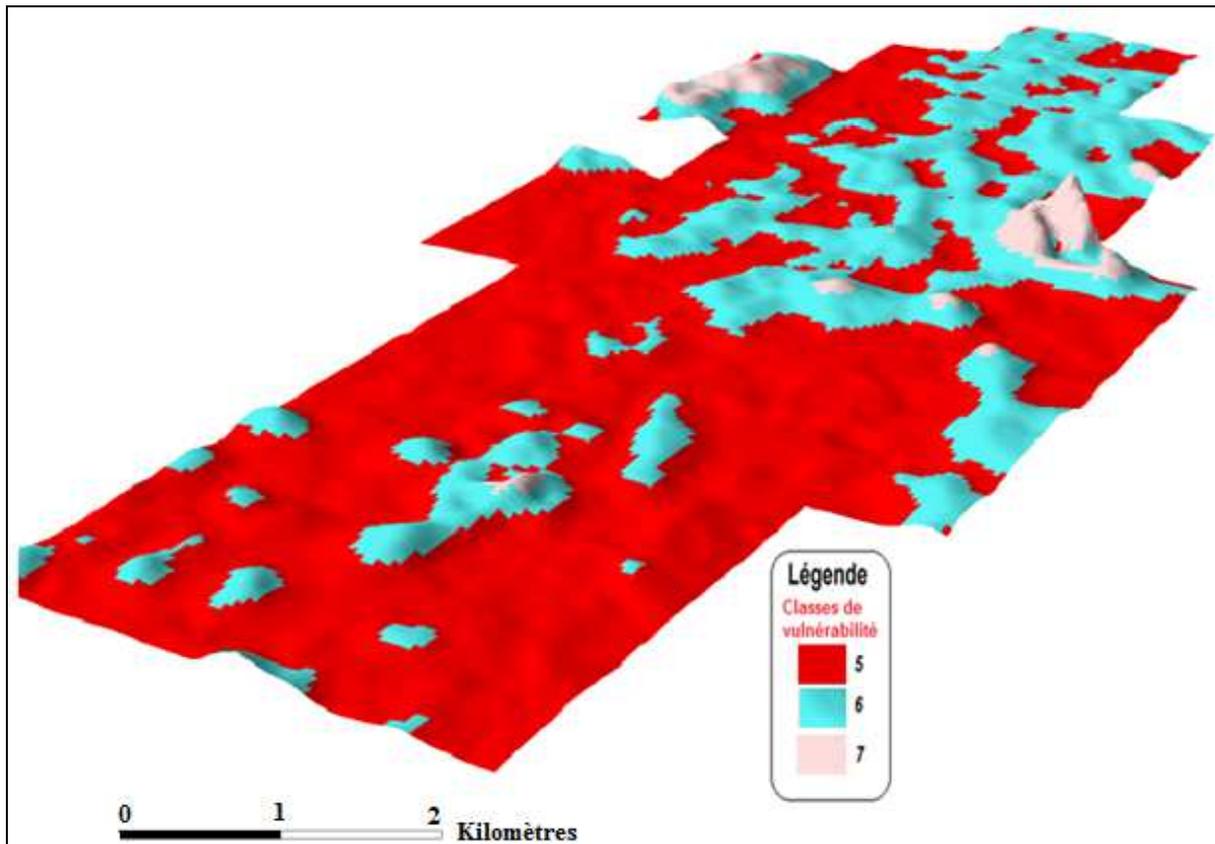


Figure 27: Carte de vulnérabilité en 3D

VI. Analyses et interprétations

La figure 26 montre la répartition spatiale des classes de la vulnérabilité de la nappe phréatique de Bel ksiri, l'analyse de cette carte montre:

- 1) Une vulnérabilité modérée occupant la majorité de la surface de la zone d'étude, identifiée à partir de la quatrième et cinquième classe.
- 2) Une vulnérabilité faible identifiée par la sixième et la septième classe, celle-ci se rencontre surtout sur la partie Nord Est et Sud Est de la zone d'étude.

Dans toute la portion de la nappe superficielle nous avons presque les mêmes paramètres de la perméabilité, la nature du sol, la nature de la zone saturé et la nature de la zone non saturée sauf pour les pentes et la profondeur de la nappe et en moindre la recharge. Ce qui fait, la vulnérabilité de cette nappe est de loin gouverné par la profondeur de la nappe et par



la pente topographique. Ainsi dans la majorité de la zone d'étude, la nappe présente une vulnérabilité modérée du fait qu'elle a presque la même profondeur dans toute notre étude, sauf au Sud Est et au Nord Est de la zone où nous constatons des pentes importantes et des profondeurs appréciables de la surface de la nappe et qui apparaissent bien dans la figure 26.

VII. Conclusions et recommandation

L'objectif de l'étude était d'élaborer la carte de la vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique de Bel ksiri à partir de la méthode DRASTIC en exploitant les fonctionnalités du SIG offertes par le logiciel Arc GIS.

DRASTIC est une méthode à cotation numérique d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines prenant uniquement en compte sept paramètres hydrogéologiques de l'aquifère (Profondeur de la nappe, recharge nette, lithologie de l'aquifère, type du sol, topographie (pente), lithologie de zone non saturée et conductivité hydraulique).

Cette méthode a permis la mise en évidence de quatre classes de vulnérabilité à la pollution. Ces classes évoluent du degré de vulnérabilité « modérée » au degré de vulnérabilité « faible ». La classe de « vulnérabilité modérée » est la plus dominante elle couvre une grande superficie de la zone. La classe de vulnérabilité « faible » est répartie presque dans toute la zone, mais on le rencontre surtout sur la partie Nord Est et Sud Est de la zone d'étude.

Les cartes de vulnérabilité des aquifères sont des outils standards pour contribuer à la protection des ressources hydriques souterraines contre une éventuelle pollution. Elles sont précieuses pour toute décision future. Les planificateurs et les gestionnaires d'eau peuvent décider l'allocation des terres et des activités, en prenant en compte la protection de ces ressources contre des pollutions potentielles telles que, les pesticides agricoles et les engrais chimiques.

Quelques solutions qui peuvent être adoptées pour éviter toute contamination du système aquifère par les sources de pollution potentielle, sont nécessaires. Il faut mettre en place un réseau de surveillance dans les zones à haut risque et après des sites de pollution potentielle;

- Procéder à des campagnes de sensibilisation pour l'utilisation modérée des engrais chimique, pesticides et insecticides;
- Prévoir pour les nouveaux forages à réaliser ou les ouvrages restant ou à restaurer, des abris. Le manque d'abris pour la totale de ces ouvrages, les rend très sensibles à toutes influence directe des eaux pluviales ou celle des ruissellements.



- Réaliser des campagnes hydro-chimiques mensuelles complètes, afin d'assuré l'impacte actuelle de l'ensemble des foyers de pollution.
- Améliorer les conditions de stockage des produits chimiques.
- Assuré un meilleur contrôle d'exploitation des eaux souterraines en fixant le débit d'exploitation à ne pas dépasser par les captages;
- Sensibilise les habitants et/ou fermier à mieux protéger leurs puits et forages contre toute source de pollution.

Sensibiliser et mieux former et/ou informer les agriculteurs pour:

- Mieux géré les ressources hydriques aussi bien souterraines, prélevé a partir des puits et/ou forages, que superficielle, en les instant à utilisé le système ou la technique d'irrigation la plus adéquat et la plus économique pour chaque culture.
- Mieux utiliser les engrais et les autres produits phytosanitaires. Le surdosage relatif à ces produits, favorise leurs transfère immédiats vers la nappe.

En se basant sur la carte de risque de la nappe, les fournisseurs doivent implanter leurs projets futurs dans les zones où le risque de pollution n'est pas élevé pour une meilleure préservation des ressources en eaux.

Réduire les différentes sources de rejets pouvant affecter la nappe (décharge des déchets solides).



BIBLIOGRAPHIE

- [1] CPRAC ([Centre d'Activités Régionales pour la Production Propre](http://www.cprac.org)), N° : 9 Exemples d'actions de minimisation de déchets et d'émissions Une production plus propre dans une sucrerie grâce à l'adaptation de bonnes pratiques et à des modifications des procédés, www.cprac.org/docs/med09fran.pdf.
- [2] ONEP et SAFED/ SUPEFT : rapport préparés par l'Office National de l'Eau Potable avec le groupement (société africaine d'étude des techniques et de développement/ société d'ingénierie en hydraulique et environnement. Etude d'impact sur l'environnement du projet d'assainissement de la ville de Bel ksiri.
- [3] CID : (Conseil, Ingénierie et Développement à Rabat). Rôle de l'ingénieur conseil dans l'élaboration des EIE. Thème 4: "*l'évaluation environnementale stratégique et l'étude d'impact*", www.gd-maroc.info/fileadmin/user_files/.../theme4-CHALABI.pdf
- [4] Département de l'environnement secrétariat général direction de la surveillance et de la prévention des risques: " Evaluations des impacts environnementaux et sanitaires liés à l'utilisation des pesticides au niveau de la région du Gharb-Chrada-Beni Hsen" présenté par Pr. Fekhaoui M, ins.Sci.Rabat, http://www.croplife.ma/Pdf/Presentation_Environnement-Evaluations_des_impacts_des_pesticides.pdf
- [5] Hydrogéologie : discipline qui a pour objet l'étude de l'eau souterraine, sfa.univ-poitiers.fr/geosciences/sites/sfa.../Hydrogeologie-partie2.pdf
- [6] Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement: "Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement integre des ressources en eau du bassin hydraulique de Sebou", septembre 2011.
- [7] Secrétariat Général du Conseil National de l'Habitat 2007, Rapport d'analyse et de synthèse "Etude pour la création d'une ville nouvelle sur le littoral de la région du Gharb-Chrada-Beni Hsen".
- [8] DRPE (Direction de la Recherche et de la Planification des Eaux), 1994. " Etude du système aquifère du Gharb". Rapport interne DRH, Rabat, Maroc, 65 p. + annexes.
- [9] Kacimi 2004, Rapport d'analyse et de synthèse du Conseil National de l'habitat - Secrétariat Général – "étude pour la création d'une ville nouvelle sur le littoral de la Région du Gharb-Chrada-Beni Hsen".



- [10] Combe M., 1969. Carte hydrologique de la plaine du Gharb au 1/100.000. Notice explicative. Notes et mémoires du service Géologique du Maroc, n°221 bis, 39p. +3 cartes h.t. Rabat.
- [11] El Kassimi 1989, "Use and Utility of Performance Indicators in Irrigation Management" case of Moulouya scheme" – 13ème Congrès International de CIGR. Rabat.
- [12] Ingema 1992, Etude du système aquifère du Gharb.
- [13] El Hachimi. 2002, Etude du schéma directeur pour l'alimentation en eaux potable des populations rurales dans la province de Kenitra.
- [14] Margat J., 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de la cartographie, *Doc. BRGM*, 68 SGL 198 HYD. Orléans, France.
- [15] Lallemand-Barres A. & Roux J-C., 1989. Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. *BRGM manuels et Méthode* n° 19.
- [16] Lallemand-Barres A., 1994. Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Etude documentaire préliminaire. *R37928. BRGM*.
- [17] Gogu R. & Dassargues A., 1998. A short review on groundwater vulnerability assessment, Basic statements for use in the framework of the cost 620 action. Workshop 18-20 mai. Université de Neuchâtel.
- [18] Schnebelen N., Platel J.P., LE Nindre Y., et Baudry et al., 2002-Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise- Rapport BRGM/RP-51178-FR
- [19] Doerfliger N. 1996- advances in karstgroundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping. Thèse 3ème cycle, Université de Neuchâtel, Suisse, 292pp.
- [20] Doerfliger N., and Zwahlen F, 1997- EPIK, méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères Karstiques pour la délimitation des zones de protection. *12th International Congress of Speleology. Suisse. 2, 209-212.*
- [21] Petelet-Giraud E. Doerfliger N. Crochet P. 2000- RISKE : Méthode d'évaluation multicritère de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères Karstiques. Application aux systèmes des fontaines et Cents-Fonts (Hérault, S. France) – Soumis à Hydrogéologie, 2000, 1 et 3 Antea Montpellier, 2 BRGM Montpellier.
- [22] Vincent Mardhel, Stéphanie Pinson, Annabel Gravier 2005. Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de- Calais BRGM/RP-54238-FR.



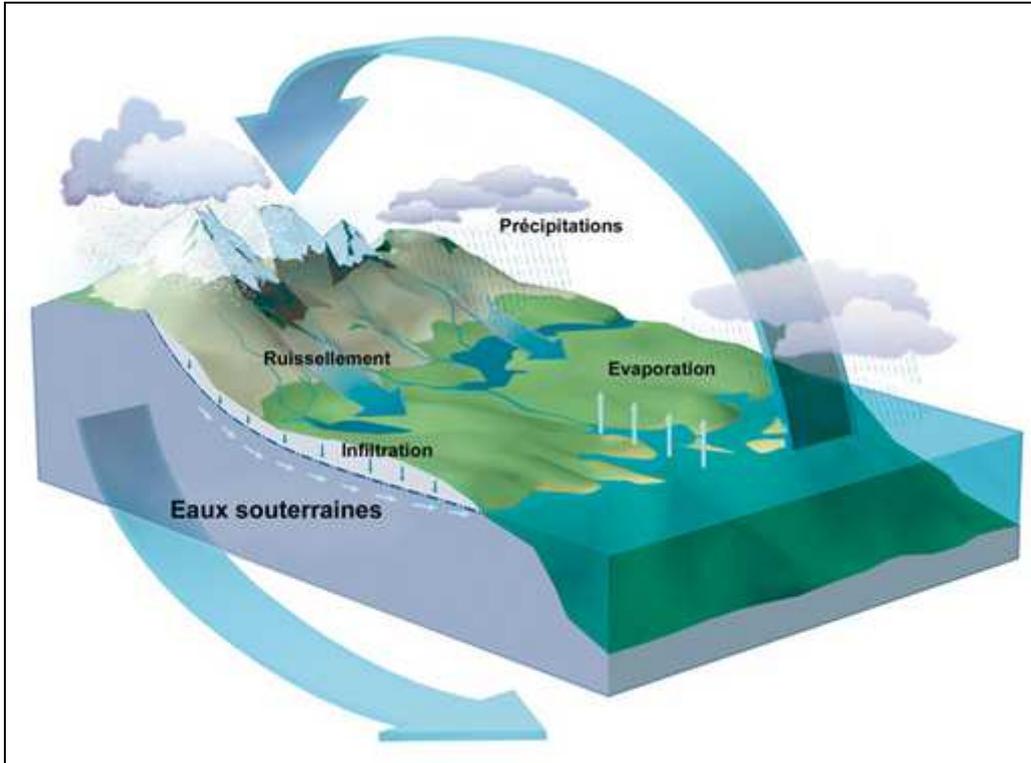
- [23] Murat V, Paradis D, Savard MM, Nastev M, Bourque E, Hamel A, et al., 2003. Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. Ressources naturelles, Canada. Québec : Commission géologique du Canada.
- [24] Civita m. 1994. La carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento : Teoria e pratica. Pitagora (Éditeurs), Bologna, Italie, 325 p.
- [25] Ribeiro L. 2000. *Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação*. Nota interna, (não publicada), ERSHA-CVRM, 8 p.
- [26] Aller l., t. Bennet, J.H. lehr, RJj. Petty, g. Hacket 1987. DRASTIC : 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.
- [27] European Community 1993. Corine land cover. Guide technique. Office des Publications Officielles des Communautés Européennes, Série environnement, sécurité nucléaire et protection civile, 144 p.
- [28] Zairi M. 2003. La modélisation des transports en milieux poreux et la cartographie de la vulnérabilité des nappes comme outils de protection des ressources en eaux souterraines. Comptes rendus du séminaire: Gouvernance de l'eau et de développement durable. Sousse 9-10 octobre 2003. 14p.
- [29] MENANI M. R., 2001. Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher (Nord Est algérien) selon la méthode DRASTIC. Science et changements planétaires/sécheresse, vol 12, pp 95-101.

WEBLIOGRAPHIE

<http://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/docs/00/47/69/28/PDF/mimoun.pdf>
http://www.smegreg.org/etudes-smegreg/docs/Rapport_termin%C3%A9.pdf
<http://www.unoosa.org/pdf/sap/2007/morocco/presentations/3-5.pdf>
<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-permeabilite-des-roches.xml>
<http://www.bafu.admin.ch/grundwasser/07496/index.html?lang=fr>
<http://www.provincetidicacem.gov.ma/index.php/tree-menu-5/tree-menu-9/tree-menu-14>
<http://www.geotech.sn/MoodleCours/PROPRIETES%20HYDRAULIQUES%20DES%20SOLS.htm>
ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f09.htm#137
http://www.gd-maroc.info/fileadmin/user_files/pdf/evenements/enviromaroc2011/theme4-CHALABI.pdf
<http://www.alcor-contrôles.fr/actualites/2-news/132-pollution-des-sols-cas-particulier-des-stations-service.html>

Annexes

Annexe 1: Cycle de l'eau

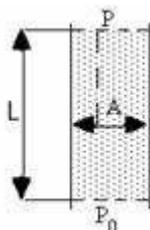


Cycle de l'eau

Annexe 2 : Perméabilité des sols

Lois de Darcy :

Les premières expériences sur la perméabilité ont été faites par Darcy en 1854 et il a remarqué que le débit par unité de surface est proportionnel à la perte de charge et inversement proportionnel à la hauteur : ce qui peut s'écrire :



$$\frac{Q}{A} = k \frac{P - P_0}{L}$$

P : pression de l'eau qui pénètre

Q : débit

A : aire ou section de sol

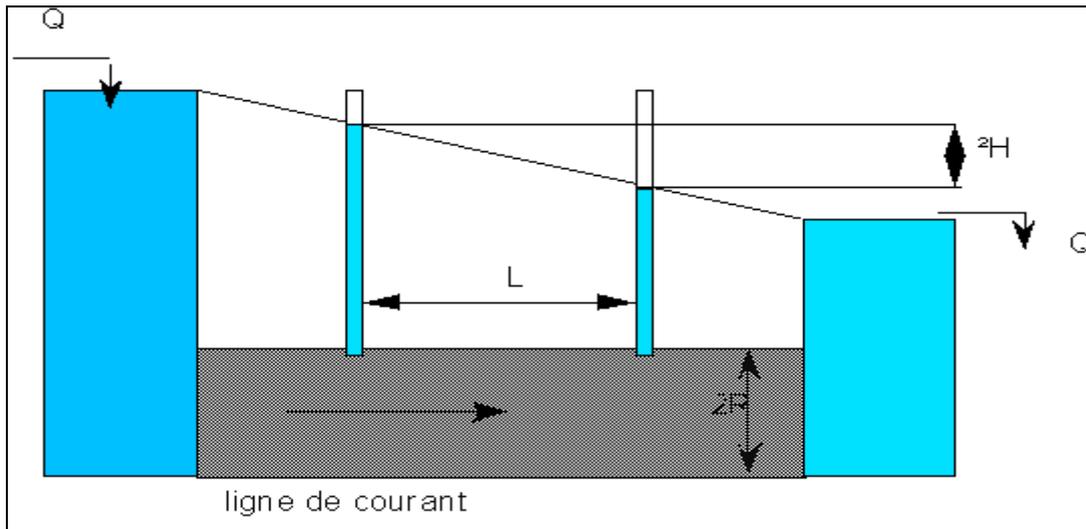
P_0 : pression de l'eau qui sort

l : longueur de filtration

Cette relation appelée loi de Darcy s'écrit : $V = ki$. Dans cette formule V est une vitesse fictive représentant la vitesse de décharge :

Mesure de la perméabilité au laboratoire :

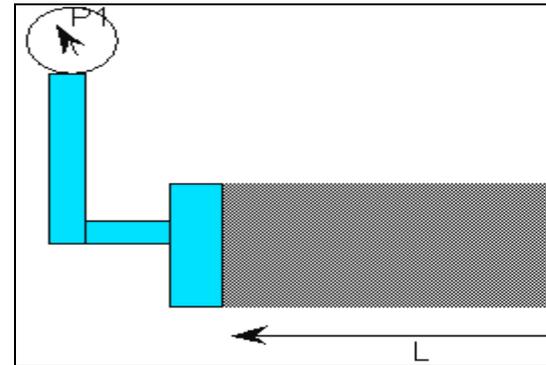
Dans le cas de matériaux peu cohérents



L'expérience de Darcy consiste à mesurer un débit et un gradient de charge qui permettent de calculer une perméabilité grâce à la formule précédente. Cette expérience a été développée au départ pour des sables ou des matériaux peu cohérents.

L'échantillon est dans un tube de rayon R , et soumis à un gradient de charge du à la différence de hauteur d'eau dans les deux réservoirs amont et aval, dont les niveaux sont maintenus constants. Le sens d'écoulement est inverse au gradient de charge. Ce gradient de charge peut également être déterminé grâce à la mesure de la différence de hauteur d'eau (DH) dans deux tubes piézométriques distants de L .

- Dans le cas des matériaux consolidés et moins perméable

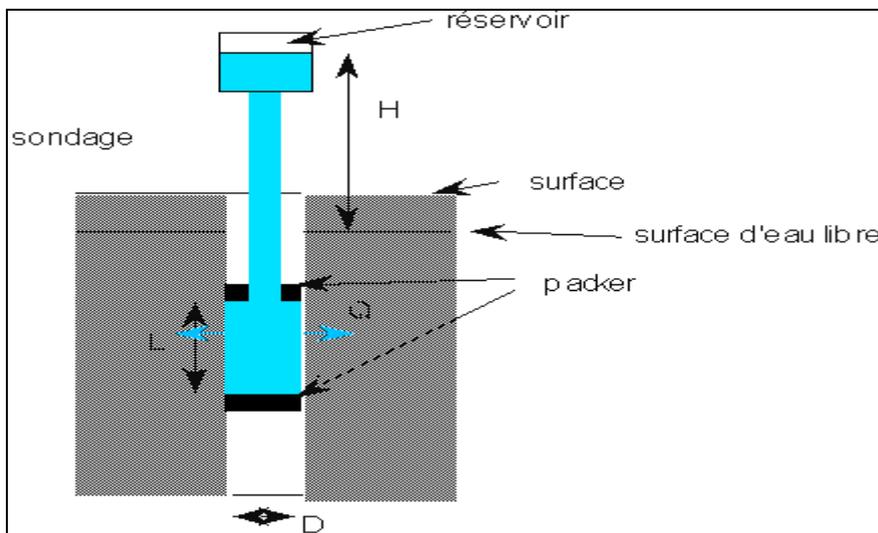


L'essai consiste à injecter un fluide sous pression (P_1) et à mesurer la pression (P_2) et le débit (Q) en sortie de l'éprouvette. Le gradient de pression est $(P_1 - P_2)/L$. Connaissant le rayon de l'éprouvette, il est facile de calculer la perméabilité.

- Dans le cas de matériau très peu perméable :

La mesure d'un débit devient très difficile. La technique du pulse est alors utilisée. Il s'agit de mesurer la décroissance en fonction du temps de la pression appliquée en tête de l'échantillon, au prix de certaines suppositions sur la morphologie du réseau poreux il est possible d'en déduire une valeur de perméabilité.

Sur le terrain, à l'échelle de l'aquifère à partir d'essai d'injections en puits.



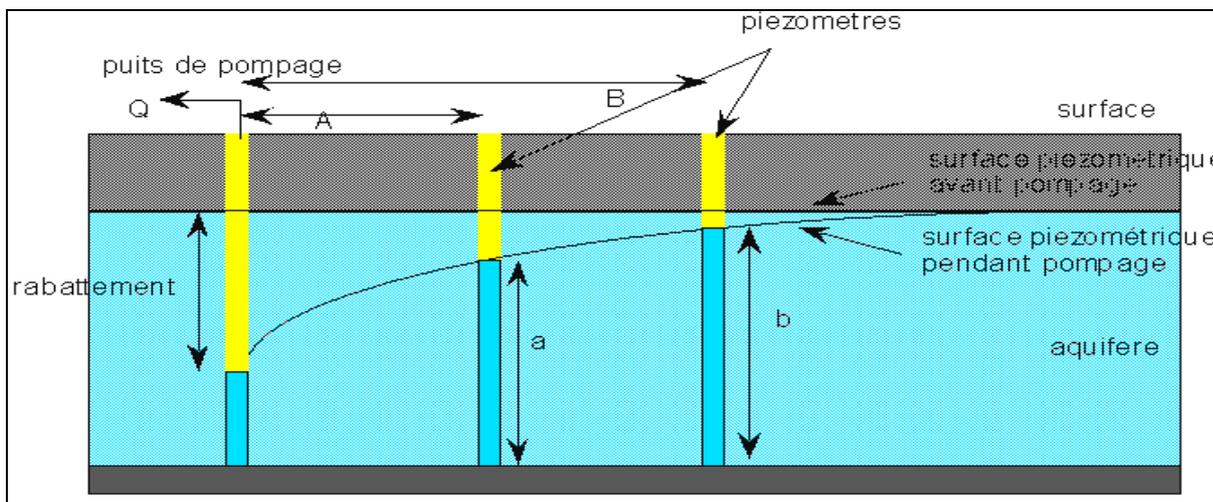
Une section du puits est rendue étanche grâce à la mise en place de « bouchons » gonflables, les packers, qui obturent le puits à deux profondeurs différentes définissant la zone d'injection de

longueur L et de rayon R . Un fluide est injecté sous pression entre les deux packers. Le centre du dispositif se situe à une distance H de la surface du réservoir d'injection.

Le débit mesuré correspond au fluide (Q) qui s'écoule dans le massif entre les deux packers. Au cours de ces essais la perméabilité est calculée :

$$K = \frac{Q \cdot \ln(2L/D)}{2\pi L H}$$

- À partir d'essais de pompage



Le dispositif utilise des piézomètres qui permettent de mesurer la profondeur de la surface libre de la nappe (dans le cas d'une nappe libre).

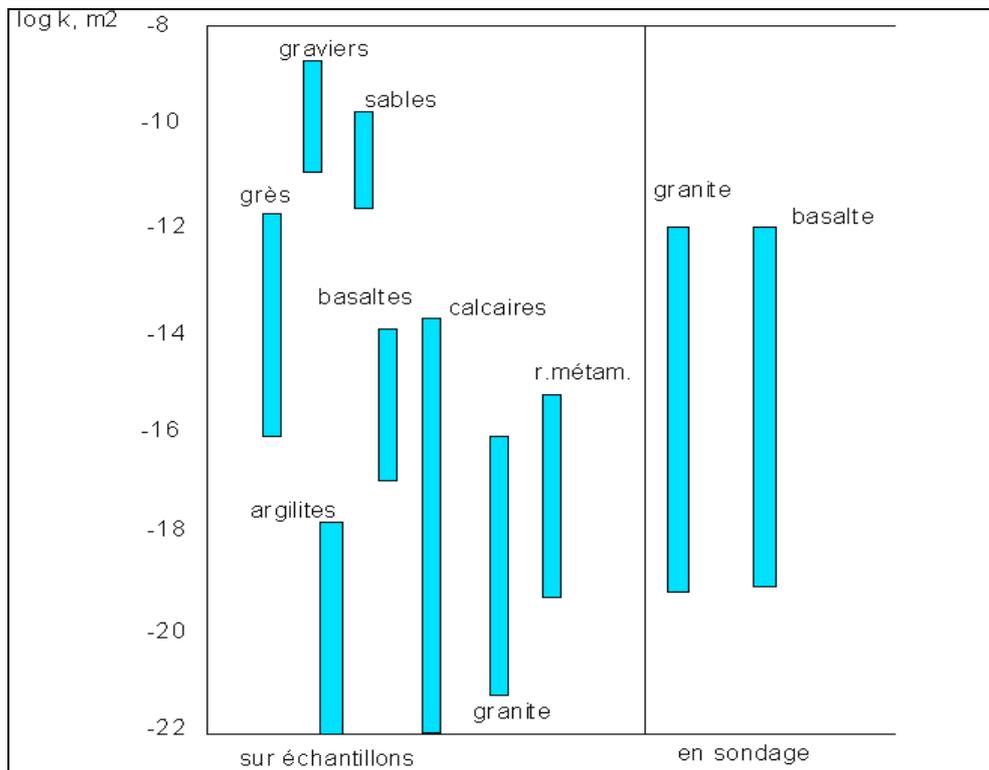
Au cours d'un essai de pompage, une déformation de la surface libre de la nappe est observée autour du puits de pompage : c'est le rabattement. L'importance du rabattement dépend, entre autres paramètres, de la perméabilité de l'aquifère. La perméabilité s'exprime par :



$$K = \frac{Q \cdot \ln(B/A)}{\Pi \cdot (b^2 - a^2)}$$

Résultats d'enregistrement de perméabilité

Dans le cas des aquifères formés par des matériaux non consolidés (graviers, sables), la perméabilité peut être très supérieure au Darcy et atteindre 103 D (soit 10-9 m²). Dans les matériaux consolidés, les roches les plus poreuses sont les grès. Certains grès peu ou pas cimentés ont des perméabilités de l'ordre du Darcy (10-12 m²). Les matériaux les moins perméables sont les argilites avec des perméabilités de 10-22-10-23 m².



Annexe 3 : Pollution des eaux souterraines: cas des stations de service.

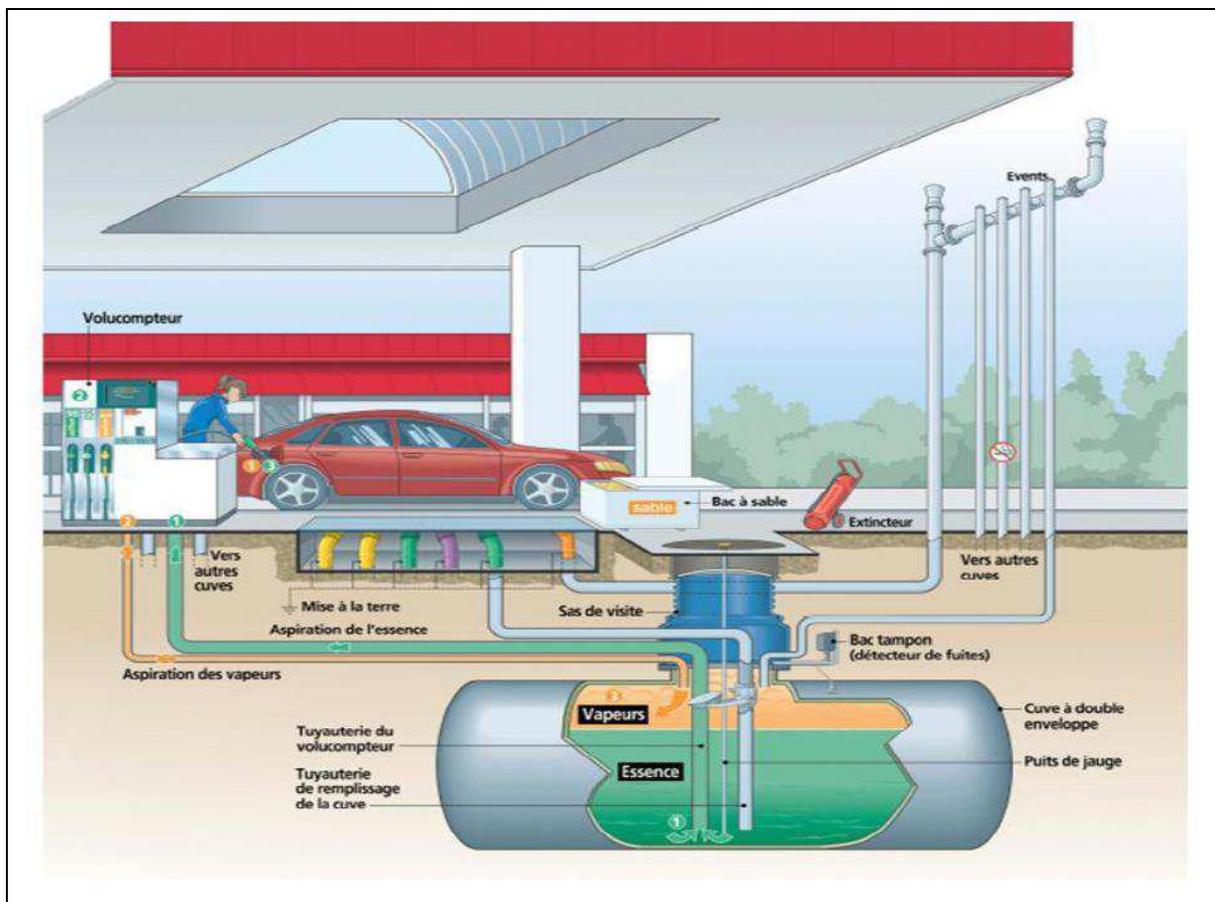
Les stations de service sont une source importante de pollution urbaine.

L'exploitation de ce type d'activité représente une source potentielle de nuisances (trafic, bruit, pollution atmosphérique, pollution du sol et des eaux) pour le voisinage direct, mais aussi pour l'environnement en général, mais la contamination des sols par les carburants constitue un des risques majeurs pour l'environnement

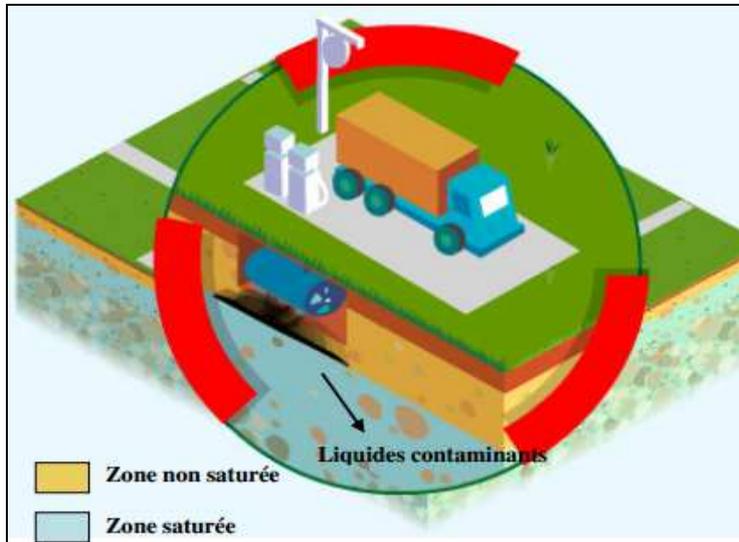
Le phénomène de pollution des sols et sous-sols provenant des stations de service se décline en deux catégories:

D'un côté, une pollution chronique se produisant sur une longue période et étant due le plus souvent à la corrosion des cuves et des canalisations enterrées. De l'autre côté la pollution accidentelle due au déversement d'hydrocarbure lors du remplissage des stockages de la station ou de la distribution de carburant.

Station de service



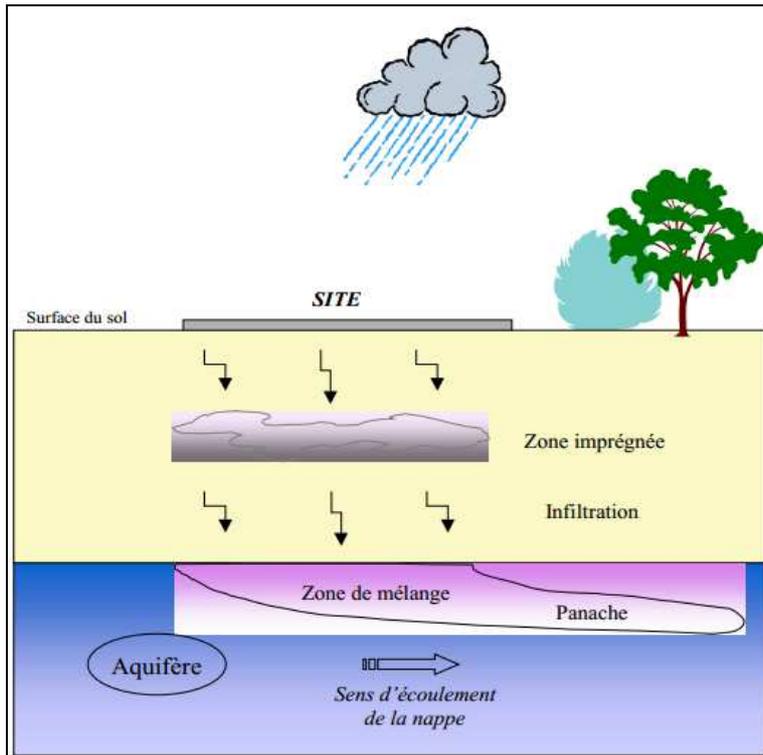
Les principaux liquides comme les carburants (essence, gazole) et les lubrifiants (huiles, graisses, liquides de freins) qui se trouvent dans une station de service sont susceptibles de provoquer une pollution du sol et/ou des eaux souterraines.



Vecteurs des polluants dans les stations de service

Si la pollution est causée par les hydrocarbures, elle peut flotter à la surface de la nappe. Sa propagation à travers les sols dépendra alors du niveau de la nappe.

Au fil des ans, la propagation de la pollution prend également l'allure d'un panache qui s'étend de plus en plus et peut malheureusement rejoindre, par exemple, des captages d'eau.



Aquifère sous une station-service

En particulier, les fuites provenant de citernes enterrées et les écoulements que provoque le remplissage excessif de citernes sont les causes principales de contamination de la nappe phréatique.

La dispersion par les eaux souterraines a eu lieu par lessivage de la pollution du sol et par transport via l'écoulement des eaux souterraines. La mobilité ou la possibilité de dispersion d'agents polluants par les eaux souterraines dépendent, dans le cas des hydrocarbures, de la solubilité du composant, du taux de matières organiques du sol et de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines.