



Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

**Cartographie de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution
de la région d'Ouled Mimoun (W. Tlemcen) par application de la
méthode des complexes hydrogéologiques (HCS)**

Mémoire

pour l'obtention du diplôme de Master

en Hydrogéologie

Par

Abderrezak BOUZID

Soutenu et présenté le 07 octobre 2021

Composition du Jury :

Mme MEBROUK Naïma	Professeur	Univ. Oran 2	Présidente
Mr HASSANI Moulay Idriss	Professeur	Univ. Oran 2	Encadreur
Mr BOURSALI Tewfik	M.A.A	Univ. Oran 2	Examineur

Résumé

L'étude de la vulnérabilité des aquifères, relativement à la préservation de la qualité de leur eau, est indispensable pour la prévention et leur protection contre les pollutions de surface. À cet effet, l'approche cartographique est la plus appropriée. Elle se décline en l'application des méthodes des complexes hydrogéologiques, des méthodes à cotation numérique (ex Drastic ou God) ou des méthodes analogiques (simulation). Dans ce mémoire, nous avons opté pour l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la région d'Oued Mimoun, située dans la wilaya de Tlemcen, à la méthode de cartographie des complexes hydrogéologiques proposée par J. Margat, 1968 et, Albinet & Margat, 1975. L'avantage de cette méthode est sa relative simplicité d'usage aboutissant à des résultats appréciables tout en contournant l'obligation de disposer des nombreuses données physiques, souvent non disponibles ou mal estimées. Après la présentation en premier chapitre des principales méthodes de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines, le deuxième chapitre a été consacré à la synthèse hydrogéologique de la région d'étude. Le troisième chapitre a été consacré aux différentes étapes de mise en œuvre de la méthode suscitée en prenant en compte les caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques des principaux systèmes d'aquifères de la région, sur base d'un support cartographique à l'échelle 1/50 000, ainsi que par recensement des principales activités polluantes de la région ciblée.

***Mots clés :** eau souterraine, cartographie, complexes hydrogéologiques, vulnérabilité des aquifères, pollution, Ouled Mimoun.*

Abstract

The study of the vulnerability of aquifers, in relation to the preservation of the quality of their water, is indispensable for the prevention and their protection against surface pollution. To this end, the cartographic approach is the most appropriate. It is available in the application of methods of hydrogeological complexes, methods with numerical quotation e.g. Drastic or God or analog methods (simulation). In this dissertation, we opted for the study of the vulnerability of groundwater in the Oued Mimoun region located in Tlemcen Wilaya, to the method of mapping hydrogeological complexes proposed by J. Margat, 1968 and Albinet & Margat, 1975. The advantage of this method is its relative simplicity of use, leading to appreciable results while circumventing the obligation to have access to numerous physical data, often unavailable or poorly estimated. Following the first chapter, presentation of the main methods for mapping groundwater vulnerability, the second chapter was devoted to the hydrogeological synthesis of the study area. The third chapter was devoted to the different stages of implementation of the method initiated taking into account the geological, hydrological and hydrogeological characteristics of the main aquifer systems in the region, on the basis of a 1/50 000 scale map support, as well as a census of the main polluting activities in the target region.

***Key Words :** groundwater, mapping, hydrogeological complexes, aquifer vulnerability pollution, Ouled Mimoun.*

REMERCIEMENTS

Ces lignes témoignent de ma profonde gratitude pour toutes les personnes impliquées de près ou de loin dans cette étude.

Mes plus sincères remerciements vont au Professeur **HASSANI Moulay Idriss** pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail, pour ses orientations, m'empêchant ainsi de me perdre dans les vastes domaines de la cartographie de la vulnérabilité.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement professeur **MEBROUK Naïma**, pour son aide et pour sa présidence de jury.

Je tiens aussi à remercier Monsieur **BOURSALI Tewfik**, Maître Assistant A à l'université d'Oran 2, qui a bien voulu examiner ce travail.

Mes remerciements s'adressent également au Professeur **MANSOUR Hamidi**. Il m'a toujours soutenue. J'ai particulièrement apprécié sa fraîcheur d'esprit.

Je remercie vivement tous les autres enseignants de la faculté des sciences de la terre et de l'univers.

Je tiens particulièrement à remercier mes parents, ainsi mes frères. Ces quelques lignes ne suffisent évidemment pas pour leur témoigner mon immense gratitude pour leur soutien permanent et inconditionnel durant mes d'études.

Je tiens également à remercier mes collègues et amis pour leur amitié.

Tables des matières

Résumé	
Abstract	
Remerciements	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale	1

Chapitre 1 :

Notions relatives à la cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines

1.1.Pollution des eaux souterraines	3
1.1.1. Origines de pollutions	3
1.1.2. Types de pollution	3
1.1.3. Principaux types de polluants chimiques	4
1.1.3.1.Les micropolluants métalliques	4
1.1.3.2.Les polluants microbiologiques	5
1.2.Notion de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines	5
1.3.Les critères de vulnérabilité	7
1.3.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque	7
1.3.1.1.Critères relatifs au sol	8
1.3.1.2.Critères relatifs à la zone non saturée	8
1.3.1.3.Critères relatifs à la zone saturée	9
1.3.1.4.Critères communs au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée	10
1.3.2. Critères de vulnérabilité spécifique	10
1.4.Les méthodes de cartographie de vulnérabilité des aquifères	11
1.4.1. Généralités	11
1.4.1.1.Les Méthodes de cartographie des complexes hydrogéologiques (Hydrogeological Complex and setting Model – HCS)	12
1.4.1.2.Les méthodes de cartographie à index (MS, RS, PCSM)	13
1.4.1.3.Les méthodes analogiques (AR) : statistiques ou de simulation	14
1.5.Conclusion	14

Chapitre 2 :

Cadre physique de la région d'Ouled Mimoun

2.1. Situation géographique	15
2.2. Sol et végétation	16
2.3. Réseau hydrographique	17
2.3.1. Oued Lakhdar (Ex : Chouly)	18
2.3.2. Oued Isser	18
2.4. Climatologie	19
2.4.1. Les précipitations	19
2.4.1.1. Précipitations annuelles	19
2.4.1.2. Précipitations mensuelles	20
2.4.2. Température	21
2.5. Contexte géologique	22
2.5.1. Description litho-stratigraphique	22
2.5.1.1. Le Secondaire	23
A- Jurassique	23
A.1- calcaires et dolomies du Kimméridgien inférieur	23
A.2- Marnes et calcaires du Kimméridgien moyen	23
A.3- Dolomies et calcaires du Kimméridgien supérieur	23
B- Crétacé	23
B.1- Berriasien	24
2.5.1.2. Le Tertiaire	24
A- Miocène moyen	24
B- Pliocène continental	24
2.5.1.3. Le Quaternaire	24
A.1- alluvions anciennes	24
A.2- Alluvions récentes	24
2.5.2. TECTONIQUE	26
2.6. Hydrogéologie	26
2.6.1. Introduction	26
2.6.2. Aquifères	27
2.6.2.1. Les aquifères du Jurassique	27
2.6.2.2. L'aquifère alluvial du Plio-Quaternaire	27

2.7. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines de la région	29
2.7.1. Introduction	29
2.7.2. Caractéristiques des eaux souterraines de l'aquifère du Jurassique supérieur	30
2.7.2.1. Physico-chimie des eaux	30
2.7.2.1.1. Paramètres physiques	30
2.7.2.1.1.1. Le pH (potentiel Hydrogène)	30
2.7.2.1.1.2. Le résidu sec	30
2.7.2.1.1.3. Dureté totale	30
2.7.2.1.2. Faciès hydrochimique	31
2.7.3. Qualité des eaux souterraines de l'aquifère Plio-Quaternaire	31

Chapitre 3 :

Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines appliquée à la zone d'étude

3.1. Introduction	33
3.2. Choix de la méthode	33
3.3. Facteurs de vulnérabilité	34
3.3.1. Nature géologique et types de nappes	34
3.3.2. Perméabilité verticale de la zone non saturée	34
3.3.3. Transmissivité T de la couche aquifère	34
3.3.4. Proximité d'un cours d'eau de surface en liaison hydraulique avec la nappe et degré de pollution actuelle de l'eau de ce cours d'eau	35
3.4. Utilisation des SIG et réalisation de la carte de vulnérabilité	35
3.5. Mise en application de la méthode	36
Conclusion générale	39
Références bibliographiques	40
Annexes	42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : critères de vulnérabilité couramment pris en compte (BRGM, 2002)	8
Tableau 2 : Répertoire non exhaustif des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique et paramètres pris en compte (modifié de Vrba et Zaporozec)	12
Tableau 3 : Valeurs moyennes mensuelles des précipitations (R. Gherissi, 2012).	20
Tableau 4 : Moyennes mensuelles et annuelles des températures de la station Chouly, (Bouanani, 2004)	21
Tableau 5 : Esquisse hydrogéologique	29
Tableau 6 : résultats de l'analyse physico-chimique des eaux forage d'Ouled Mimoun (éléments en mg/l)	30
Tableau 7 : qualité de l'eau en fonction du titre hydrotimétrique	31
Tableau 8 : quantité en réaction et classification de l'eau du forage d'Ouled Mimoun	31

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique des Monts de Tlemcen et du secteur d'étude	15
Figure 2 : cartes d'occupation du sol du bassin de l'Oued Isser (Bouanani. A, 2004)	17
Figure 3 : Carte hydrographique du bassin versant de la Tafna	18
Figure 4 : Variations interannuelles des précipitations à la station de Chouly (1956 – 2010) (Gherissi. R, 2012)	19
Figure 5 : Variation des précipitations moyennes mensuelles (1956-2010), (R. Gherissi, 2012)	21

Figure 6 : Coupe synthétique des principales formations affleurant dans les Monts de Tlemcen (jusqu'au callovo-oxfordien) (Collignon B., 1986)	22
Figure 7 : Carte géologique du secteur d'étude ; carte de "Lamoricière" (Ouled Mimoun) au 1/50.000 (SCGA, 1948)	23
Figure 8 : Carte géologique synthétique du secteur d'étude à l'échelle 1/200.000 (d'après Energoprojekt/Anrh, 2008)	25
Figure 9 : Schéma tectonique du bassin de la Tafna (Auclair et Biehler, 1967)	26
Figure 10 : Carte piézométrique du plateau de Sidi Senouci (Ammour.S et Tekfi.R, avril 2012)	28
Figure 11 : Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région d'Ouled Mimoun par application de la méthode de Margat/Albinet (1968/1975)	37

Introduction générale

Dans nombre de pays du globe, notamment dans les régions semi-arides, l'eau souterraine joue un rôle crucial dans les moyens d'existence. Très souvent, elle fournit la quasi-totalité des ressources en eau à usages domestique et agricole. Parallèlement au problème de manque d'eau, et du fait des fortes concentrations urbaines, de développement des industries ainsi que le développement intensif de l'irrigation dans la majorité des pays du globe, la question de la vulnérabilité des ressources en eau a évolué vers la nécessaire préservation de leur qualité et des aspects environnementaux qui y sont liés.

Concernant les eaux souterraines, l'étude de la vulnérabilité des aquifères, relativement à la préservation de la qualité de leurs eaux, est incontournable pour la prévention et leur protection contre les pollutions de surface. Dans cet objectif, l'approche cartographique est incontournable. De nombreuses méthodes de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées à travers le monde depuis les années 1970. Globalement, leurs techniques d'évaluation se basent sur les méthodes de cartographie des complexes hydrogéologiques, les méthodes à cotation numérique (systèmes matriciels, de classement, etc.), à l'exemple des méthodes Drastic ou God ainsi que les méthodes analogiques (simulation).

En Algérie, ces dernières années, l'application de ces méthodes s'est répandue, essentiellement par utilisation des méthodes à cotation numérique, essentiellement la méthode drastic, car paraissant faciles à appliquer. Néanmoins, leur mise en oeuvre reste délicate à cause des contraintes liées à la qualité des données physiques introduites, souvent mal estimées (perméabilité, recharge nette, etc.). A cet effet, l'une des méthodes de cartographie des complexes hydrogéologiques, la première à avoir été proposée (J. Margat, 1968, Albinet & Margat, 1975), ne semble pas avoir été souvent mise en oeuvre bien que sa simplicité d'usage contourne la nécessité de disposer des nombreuses données physiques, souvent mal estimées, tout en aboutissant à des résultats

appréciables. C'est cette méthode que nous avons appliquée à la région d'Ouled Mimoun située dans la wilaya de Tlemcen.

Ce travail est organisé en trois chapitres :

Chapitre 1 : notion de la pollution des eaux souterraines et état des connaissances sur l'estimation et la cartographie de la vulnérabilité. Sur la base de la littérature.

Chapitre 2 : ce chapitre a été consacré surtout pour l'étude géologique et hydrogéologique aussi, nous avons abordé la pédologie, l'hydrochimie et la climatologie.

Chapitre 3 : Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la zone d'étude.

Chapitre 1 : Notions relatives à la cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines

Ce chapitre a pour but de présenter quelques aspects relatifs à la problématique de la pollution des eaux souterraines suivi de la présentation des concepts de base d'estimation de la vulnérabilité des aquifères par l'approche cartographique.

1.1. Pollution des eaux souterraines

Les eaux souterraines, dans la plupart des conditions, sont plus sûres et plus fiables que l'eau de surface. Une des raisons est que l'eau de surface est plus facilement exposée aux polluants survenant en surface que les eaux souterraines. Ceci ne veut pas dire que les eaux souterraines sont invulnérables à la contamination.

1.1.1. Origines de pollutions

1.1.2. Types de pollution

Les principales catégories des pollutions induites par l'activité humaine sont :

-La pollution industrielle : avec les rejets de produits chimiques comme les hydrocarbures ou les polychlorobiphényles (PCB), rejetés par les industries ainsi que les eaux évacuées par les usines.

-La pollution agricole : avec les déjections animales ainsi que les produits phytosanitaires/pesticides (herbicides, insecticides, fongicides) contenus dans les engrais et utilisés dans l'agriculture. Ils pénètrent alors dans les sols jusqu'à atteindre les eaux souterraines.

-La pollution domestique : avec les eaux usées provenant des toilettes, les produits d'entretien ou cosmétiques (savons de lessives, détergents), les peintures, solvants, huiles de vidanges, hydrocarbures, etc.

-La pollution organique : elle concerne les microorganismes pathogènes présents dans l'eau comme les bactéries et les virus. Cette pollution bactériologique se caractérise par un taux élevé de coliformes fécaux. La pollution organique provient principalement des excréments, des ordures ménagères et des déchets végétaux.

-La pollution chimique : elle concerne les nitrates et les phosphates contenus dans les pesticides, les médicaments humains et vétérinaires, les produits ménagers, la peinture, les métaux lourds (mercure, cadmium, plomb, arsenic, etc.), les acides, ainsi que les hydrocarbures utilisés dans l'industrie.

1.1.3. Principaux types de polluants chimiques

1.1.3.1. Les micropolluants métalliques

Les pollutions engendrées par la présence de métaux dans les eaux souterraines sont dues généralement aux activités industrielles par rejets d'effluents et par lessivage de produits stockés sur un sol. Certains de ces métaux peuvent être toxiques (cadmium, chrome, mercure, plomb etc.), d'autres éléments sont considérés comme indésirables et peuvent présenter des inconvénients au consommateur d'ordre organoleptique : goût, saveur, coloration. C'est le cas pour le cuivre, le zinc, le fer, le manganèse et l'aluminium.

-Le cadmium : lorsque des teneurs élevées de cadmium sont rencontrées dans les eaux des nappes phréatiques, son origine doit être recherchée dans des effluents industriels. Le cadmium peut être entraîné par les pluies à partir des fumées industrielles. De plus, la présence de cadmium comme contaminant dans les engrais et les boues de station d'épuration utilisées en agriculture peut contribuer à la pollution de l'aquifère.

-Le mercure : il est présent dans les rejets de certaines activités industrielles : raffinerie, cimenterie, sidérurgie, traitement des phosphates, raffinage du mercure, combustion des hydrocarbures fossiles et du charbon, industries de la pâte à papier, etc.

-Le nickel : il entre dans la composition de nombreux alliages et dans la fabrication d'éléments de batteries.

-Le cuivre : en métallurgie, il entre dans de nombreux alliages. Les sels de cuivre (sulfate, acétate, dérivés organiques) sont utilisés comme fongicides ou algicides en agriculture, pour les traitements chimiques de surface, la fabrication de peintures et de céramiques.

-Le zinc : le zinc est employé dans de nombreux alliages, pour la galvanisation des pièces métalliques, dans la fabrication de pigments de teinture, de vernis, comme raticide et dans la fabrication de produits phytosanitaires.

-Le plomb : le métal est très répandu et très utilisé dans l'industrie, les possibilités de pollution sont extrêmement nombreuses et variées.

-L'arsenic : la présence de cet élément non métallique dans l'environnement est due aux rejets d'eaux résiduaires industrielles, traitement de minerais arsenicaux (cuivre), combustion de charbon ou de déchets, utilisation d'engrais phosphatés, d'herbicides, d'insecticides et de détergents. De plus, les nitrates et autres composés azotés, les détergents (tensioactifs), les pesticides et les hydrocarbures sont des polluants chimiques.

1.1.3.2. Les polluants microbiologiques

De nombreux microorganismes, virus, bactéries et protozoaires, voire des champignons et des algues sont présents dans l'eau. Les conditions anaérobies généralement rencontrées dans les eaux souterraines en limitent cependant la diversité. Les bactéries, virus et autres agents pathogènes rencontrés dans les eaux souterraines proviennent de fosses septiques, des décharges, des épandages d'eaux usées, de l'élevage, du rejet d'eaux superficielles.

1.2. Notion de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines

Le concept de "vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution" a été introduit à la fin des années soixante (Margat J., 1968). Il peut être défini comme une propriété relative, non mesurable et adimensionnelle, basée sur la supposition que l'environnement physique

(complexe sol-roche-eau souterraine) peut assurer un certain degré de protection aux eaux souterraines à l'égard de contaminants pénétrant dans le sous-sol. La capacité d'atténuation des matériaux de sub-surface est constituée par l'interaction des nombreuses propriétés physiques, chimiques, et biologiques dans le système "sol-roche-eau souterraine" et est fortement affectée par les mécanismes de transport de soluté ainsi que des conditions hydrogéologiques.

Ainsi, le concept de vulnérabilité peut se définir à trois niveaux :

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

Deux types de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont à distinguer, la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique :

-La vulnérabilité intrinsèque : est la représentation des caractéristiques géologiques hydrogéologiques et climatologiques qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les activités humaines. La définition de cette vulnérabilité est nuancée selon les auteurs :

- *Civita, (1990)* : C'est l'aptitude d'un aquifère à absorber ou à diffuser un polluant transporté par l'eau.
- *Aubre, (1992)* : C'est la facilité qu'offre un terrain à la pénétration jusqu'à la nappe d'eau souterraine, d'une contamination provenant de la surface du sol. Cette notion ne fait intervenir que des conditions hydrogéologiques du site sans tenir compte des propriétés d'un éventuel contaminant.
- *Agence de Protection de l'Environnement, (1993)* : c'est une fonction des caractéristiques intrinsèques de l'unité hydrogéologique sans considération du comportement et des propriétés des contaminants en particulier.

➤ *Vrba et Zaporozec, (1994)* : C'est une propriété intrinsèque des systèmes aquifères qui dépend de la sensibilité qu'ont ces systèmes, aux impacts humains et naturels.

- **La vulnérabilité spécifique** : est l'étude de la sensibilité des eaux souterraines à un ou plusieurs contaminants dont les propriétés sont intégrées à la vulnérabilité intrinsèque. Elle sera dans la majorité des cas, moins grande que la vulnérabilité intrinsèque.

1.3. Les critères de vulnérabilité

1.3.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenants soit sur la nature ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert. Elle est évaluée en prenant en compte les caractéristiques du sol, de la zone non saturée et de la zone saturée qui contrôlent le comportement des polluants (Vrba J. & Zaporozec A., 1994 ; BRGM, 2002).

Tableau 1 : critères de vulnérabilité couramment pris en compte (BRGM, 2002)

vulnérabilité intrinsèque			vulnérabilité spécifique
Sol	Zone non saturée (ZNS)	Zone saturée	
Ruissellement-Infiltration	profondeur de la nappe libre au épaisseur de la ZNS	Type de nappe : libre ou captive	Occupation du sol : forêt/espaces 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 dépend des paramètres hydrodynamiques des formations aquifères Présence ou non d'un Horizon moins perméable et position de celui-ci	Présence ou non de bisous salé
	Structure de ZNS ; variation de faciès , épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en m.o et argile	relation eaux souterraines/eaux superficielles	Points sensibles ; surfaces agricoles, décharges, rejets des établissements classés densité des voies de circulation, prélèvements dans la nappe
		Piézométrie : évolution des sens et direction d'écoulement selon la période du cycle hydrologique	capacité dispersives et épuratoires des sols face à un polluant spécifique
		Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)	Comportement du polluant potentiel (milieu fixe) ; soluble, insoluble, miscible, non miscible, plus dense, plus léger que l'eau, réactivité avec le milieu traversé
		Type de système hydrogéologique : caractères plus ou moins capacitif et transmissif	Réseau hydrographique ; extension et vulnérabilité (qualité des cours d'eau)
		Direction et sens d'écoulement	
	Battement de nappe		
	Recharge : quantité d'eau atteignant la ZS sur une période donnée (recharge annuelle nette)		
	Fracturation, directions et densité		

1.3.1.1. Critères relatifs au sol

-**Ruissellement-infiltration** : le ruissellement et l'infiltration efficace sont représentatifs de la recharge de la nappe. Ils sont étroitement liés à la topographie et à la nature des formations superficielles.

- **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'échanges entre la surface et la zone non saturée.

1.3.1.2. 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, interactions physico-chimiques avec l'encaissant) et donc sa possible 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 leur position dans le profil vertical, la texture, la teneur en matières organiques et en argile des formations, sont autant de facteurs qui conditionnent la migration de fluides vers la nappe.

1.3.1.3. Critères relatifs à la zone saturée

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

- **Paramètres hydrodynamiques** des formations aquifères : transmissivité (T), perméabilité (k), coefficient d'emmagasinement (s), gradient hydraulique (i), ces paramètres déterminent la vitesse de migration des polluants dans la nappe et les temps de résidence dans la zone saturée.

- **Piézométrie** : mesure de la profondeur de la surface des nappes, elle rend compte de la géométrie de 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 pluviométriques. 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 ou capacitif fort se caractérise par des vitesses de transfert lentes et des temps de séjours longs.

- **Relations 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) : les quantités d'eau stockée dans l'aquifère déterminent les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe.

- **Présence ou non d'un horizon moins perméable** : cet horizon détermine le caractère libre ou captif de la nappe.

1.3.1.4. Critères communs au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée

- **Fracturation** (directions et densité) : des discontinuités verticales telles que les failles peuvent, dans certaines 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 saturée 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 (précipitations), mais également de la topographie et de la nature des formations. Elle peut être appréhendée à partir de la représentation de ces différents éléments constitutifs. Elle constitue un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

1.3.2. 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 caractéristiques du milieu, mais également des propriétés physico-chimiques du composé lui-même. Les principaux phénomènes susceptibles d'intervenir sont : géochimiques (réactions acides-bases, d'oxydo-réduction, de désorption, etc.), biochimiques (biodégradation, synthèse cellulaire,

etc.), physiques (diffusion, évaporation, filtration, etc.), ou biophysiques (transport de germes, etc.).

- **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) ou agricole (cultures, 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, les rejets des établissements classés, les voies de circulation, etc.

1.4. Les méthodes de cartographie de vulnérabilité des aquifères

1.4.1. Généralités

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines par approche cartographique ont été développées dans le monde depuis le début des années soixante-dix.

Les techniques d'évaluation peuvent être regroupées en trois groupes de base (Hassani M.I., 2015) :

- 1 - Les méthodes de cartographie des complexes hydrogéologiques (HCS)
- 2 - Les méthodes de cartographie à index (MS, RS, PCSM)
- 3 – Les méthodes analogiques : statistiques ou de simulation (AR)

Les principaux paramètres d'évaluation de la vulnérabilité utilisés dans chaque méthode proposée ont répertoriés dans le tableau n° 2.

Tableau 2 : Répertoire non exhaustif des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique et paramètres pris en compte (modifié de Vrba et Zaporozec)

Type de méthode	Méthodes des systèmes paramétriques	Méthodes cartographiques	Méthodes analytiques	PARAMETRES																																							
				Precipitation/Composition chimique	Végétation / occupation des sols	Irrigation	Température	Topographie	Caractéristiques du sol							PARAMETRES										Polluant																	
						Densité du réseau d'écoulement	Epaisseur/Texture	Matière organique	Porosité	temps de passage	Saturation	Perméabilité	capacité de rétention	Propriétés Physiques&chimiques	Densité	Connexion aquifère/eau de surface	Différenciation par couche	Fluctuation du niveau de la nappe (niv.) comportement des eaux souterraines (com.)	Recharge	continuité des unités	Caractéristique zone non saturée	Prof. à la nappe	Caractéristique, prof. du roc	Caractéristiques hydrogéologiques (zone saturée)	Conductivité hydraulique	Différenciation aquifères confinés	Puits de captage	écoulement vertical	nature du contaminant	interaction	contaminants/formation	Distance horizontale au contaminant	persistance	Solubilité dans l'eau	Coefficient de partition	Taux de dégradation	Coefficient de dispersion	Degré de confiance					
							X	X				X																															
																	X			X					X																		
							X	X											X		X	X		X	X																		
							X	X					X	X pH							X	X	X		X	X																	
							X	X											X	X	X		X																				
					X	X						X						X			X	X																					
							X	X				X							X		X	X		X																			
							X	X				X	X pH			X				X	X	X		X																			
							X	X				X	X pH		X				X	X	X		X																				
							X	X				X			X			X	X	X		X	X	X	X																		
							X	X				X						X (niv.)		X	X		X																				
							X	X				X	X		X						X	X		X																			
							X	X				X		X								X																					
							X	X				X	X		X																												
												X									X	X		X																			
							X	X				X									X	X		X																			
							X					X									X	X		X																			
							X					X	X		X						X	X		X																			
							X					X									X	X		X																			
							X	X				X	X		X						X	X		X																			
							X	X				X	X		X						X	X		X																			
							X	X				X	X		X						X	X		X																			
							X	X				X	X		X						X	X		X																			
							X	X				X	X		X						X	X		X																			
							X	X				X	X		X						X	X		X																			
							X	X				X	X		X						X	X		X																			
							X	X				X	X		X						X	X		X																			
							X	X				X	X		X						X	X		X																			
							X	X				X	X		X						X	X		X																			

1.4.1.1. Les Méthodes de cartographie des complexes hydrogéologiques (Hydrogeological Complex and setting Model – HCS)

Ces méthodes couramment utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité des complexes hydrogéologiques, utilisent généralement une classification cartographique des terrains dotées de caractères communs, se basant principalement sur la nature géologique du sous-sol, sur la profondeur de la surface libre des nappes par rapport au sol et sur les modalités de drainage ou d'alimentation des nappes par les cours d'eau, etc. Ces méthodes conviennent pour les grandes surfaces avec des caractéristiques hydrogéologiques, hydrostructurales et morphologiques variables. Elles sont bien indiquées pour produire des cartes thématiques à une moyenne à grande échelle. L'évaluation de la vulnérabilité est donnée uniquement en termes qualitatifs. C'est parmi ces méthodes que figure la celle Margat, 1968 / Albinet M. & Margat J, 1970 qui sera mise en application dans ce mémoire.

1.4.1.2. Les méthodes de cartographie à index (MS, RS, PCSM)

Basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant une valeur à chaque paramètre. Les méthodes de cartographie à index comportent deux types d'approche : les systèmes hiérarchisés et les systèmes paramétrés. (N. Schnebelen et al., 2002).

- La méthode des systèmes hiérarchisés est basée sur la comparaison d'une zone donnée avec les critères représentant les conditions de vulnérabilité d'autres zones (autres bassins, autres systèmes aquifères). Elle est généralement utilisée pour évaluer la vulnérabilité de contextes hydrogéologiques variés à moyenne ou grande échelle (régionale ou nationale). (BRGM, 2002).
- La méthode des systèmes paramétrés s'appuie sur la sélection de critères considérés comme représentatifs pour estimer la vulnérabilité d'une eau souterraine. Chaque critère a une gamme de variation naturelle définie qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Chaque intervalle est défini par un index reflétant le degré de sensibilité relatif à une contamination.

La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (par exemple : SIG).

1.4.1.3. Les méthodes analogiques (AR) : statistiques ou de simulation

Ces méthodes sont fondées sur une description mathématique normalisée des processus hydrologiques et hydrogéologiques, par exemple les équations de transport, qui sont utilisées par analogie (*méthodes analogiques*) pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines. Cette approche s'appuie sur des méthodes statistiques ou des modèles de simulation :

- **Les méthodes statistiques**

Elles sont fondées sur une variable qui dépend de la concentration de la matière polluante ou d'une probabilité de pollution. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des polluants sur la zone d'étude et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de pollution sur la zone d'étude.

- **Les modèles de simulation**

Ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants (Schnebelen, 2002). Ils donnent une image similaire de la vulnérabilité spécifique de la nappe.

Il reste à signaler que quel que soit la pertinence des méthodes de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque, elles restent difficiles à valider sur le terrain. Il n'en demeure pas moins qu'elles restent incontournables pour la production des documents cartographiques servant d'outils d'aide à la décision, pour les actions de planification, d'aménagement, de gestion et de protection qualitative des ressources en eau à l'échelle régionale (Hassani M.I., 2015).

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre sont regroupés tous les éléments qui vont servir à mieux comprendre la notion de vulnérabilité et les concepts qui sont associés à cette notion. Surtout que les objectifs à atteindre sont différents d'un type de méthode à l'autre, ainsi que les menaces de nature anthropogénique qui pèsent sur les ressources en eau.

Chapitre 2 : Cadre physique de la région d'Ouled Mimoun

2.1. Situation géographique

Le secteur géographique objet de cette étude est la région d'Ouled Mimoun qui correspond à la zone des piedmonts nord des Monts de Tlemcen. Le secteur s'étend entre les agglomérations de Sidi Abdelli, au Nord, Ouled Mimoun au Sud, Ain Tellout à l'Est et Chouly à l'Ouest.

La région se situe dans le bassin moyen de l'Oued Isser. Dans le secteur d'étude, ce dernier chemine du sud vers le nord en traversant l'agglomération d'Ouled Mimoun.

De façon plus circonscrite, le secteur qui fera l'objet d'une cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines correspondra à la moitié occidentale de la carte topographique au 1/50 000 - Feuille n° 271 "Lamoricrière" (Ouled Mimoun) (figure n°1).

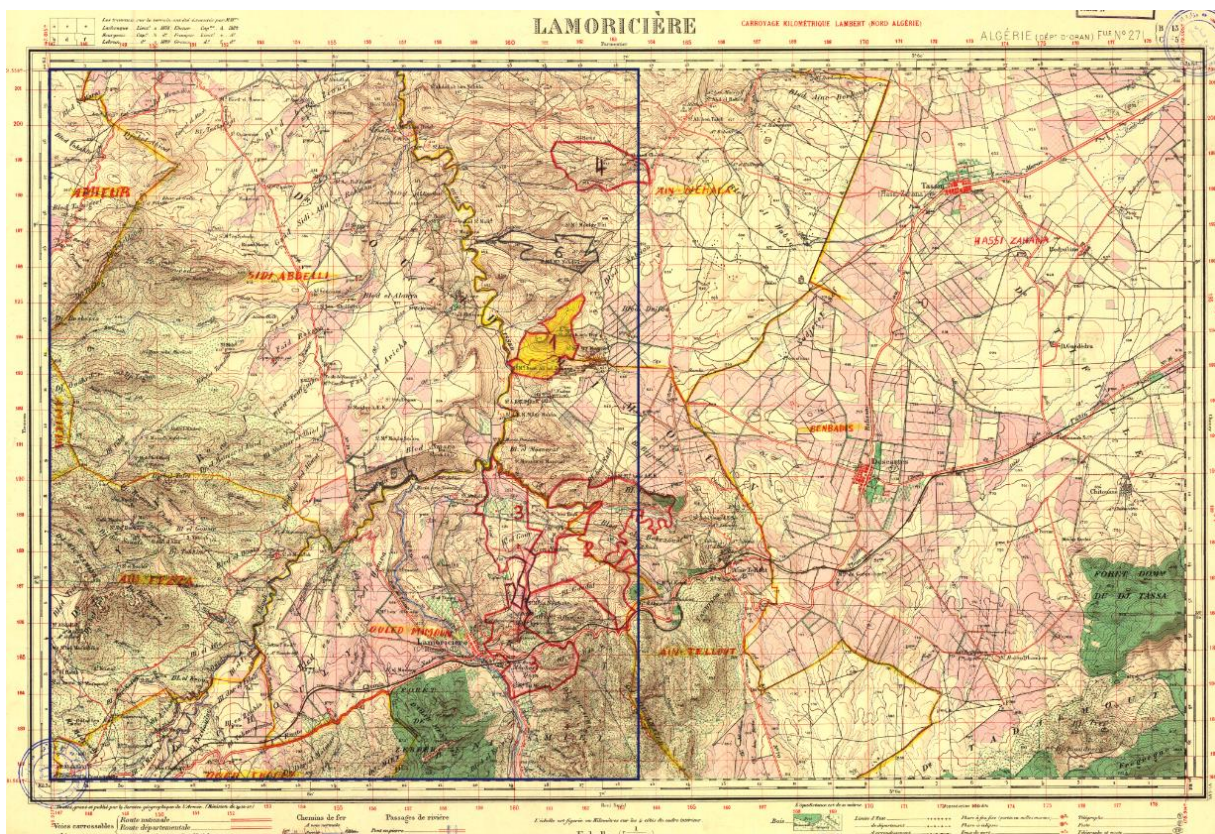


Figure 1 : carte topographique du secteur d'étude.

2.2. Sol et végétation

Les sols du bassin de l'Oued Isser couvrent presque la totalité de la région étudiée. Les sols du bassin ont une tendance généralement alcaline, qui peut être subdivisée en quatre groupes :

- Les terrains de nature alluvionnaire : ils se caractérisent par :
 - une pente faible sur lesquels se développent les cultures arboricoles.
 - une faible érodabilité.
- Les terrains calcaires brunifiés où se développent une couverture forestière, des cultures arboricoles et parfois des cultures extensives.
- Les terrains constitués par des roches calcaréo-gréseuses ou marno-gréseuses. Ces sols sont généralement de couleur rouge où l'on retrouve une forêt dégradée et des cultures extensives.
- Les terrains squelettiques (grés calcaires, dolomies ou des carapaces calcaires). Ces sols occupant une grande partie du bassin sont généralement nus, à forte pente où l'on retrouve un couvert mort ou un maquis dégradé (Bouanani. A, 2004).

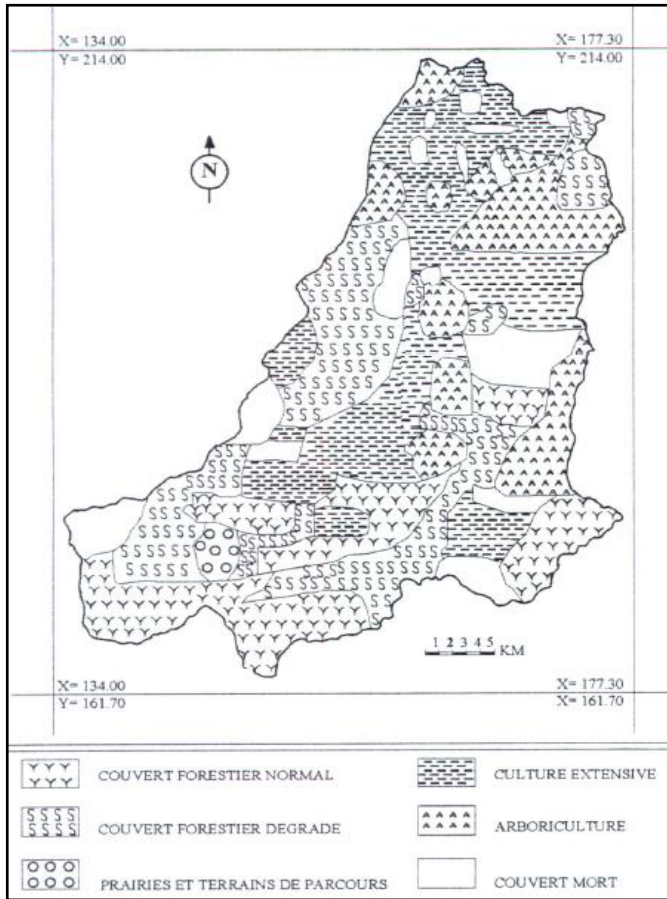


Figure 2 : cartes d'occupation du sol du bassin de l'Oued Isser (Bouanani. A, 2004).

2.3. Réseau hydrographique

La zone étudiée est traversée par deux principaux cours d'eau : l'Oued Isser et l'Oued Chouly (ou Oued Lakhdar) (figure n°3).

Ces deux oueds drainent la partie nord-est des Monts de Tlemcen.

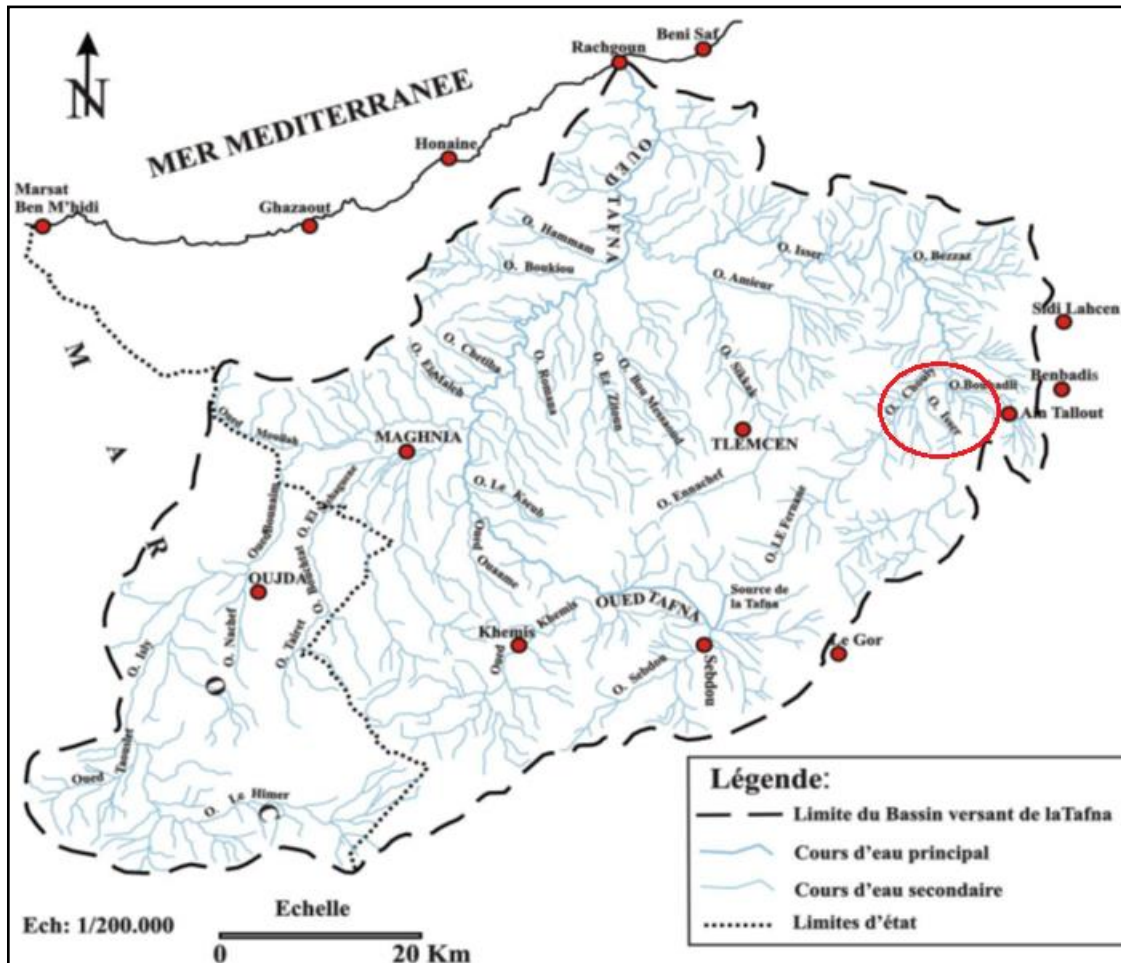


Figure 3 : Carte hydrographique du bassin versant de la Tafna

2.3.1. Oued Isser

Affluent en rive droite de l'oued Tafna. Cet oued prend sa source au niveau d'Aïn Isser situé à une dizaine de kilomètres au sud d'Ouled Mimoun. Il draine dans sa partie amont, les formations carbonatées du Jurassique. Après Ouled Mimoun, il s'écoule au nord dans les marnes d'âge miocène.

2.3.2. Oued Lakhdar (Ex : Chouly)

Il prend sa source dans les Monts de Tlemcen à environ 900 m d'altitude, il draine le versant nord-est de ces Monts, sa vallée est surplombée par une série de massifs.

C'est un cours d'eau à régime permanent et se jette plus en aval d'Ouled Mimoun en rive gauche de l'Oued Isser.

2.4. Climatologie

La région étudiée fait partie du bassin de la Tafna, qui se trouve entre deux domaines géographiques contrastés : les Monts de Tlemcen au Sud et la zone des plaines qui s'étendent vers le Nord.

L'évolution des précipitations et des températures relatives à la région d'étude peut s'évaluer grâce aux données de la station hydrométéorologique de Chouly.

2.4.1. Les précipitations

En Algérie, la pluviométrie a été étudiée par plusieurs auteurs, (P. Seltzer, 1913-1938, H. Gausсен, 1918-1947, G. Medinger, 1913-1953, M. Chaumont et C. Paquin, 1913-1963. Plus particulièrement dans la région par entre autres A. Bouanani, 2004 et R. Gherissi, 2012).

2.4.1.1. Précipitations annuelles

Le régime annuel est très irrégulier d'une année à une autre (Fig.4).

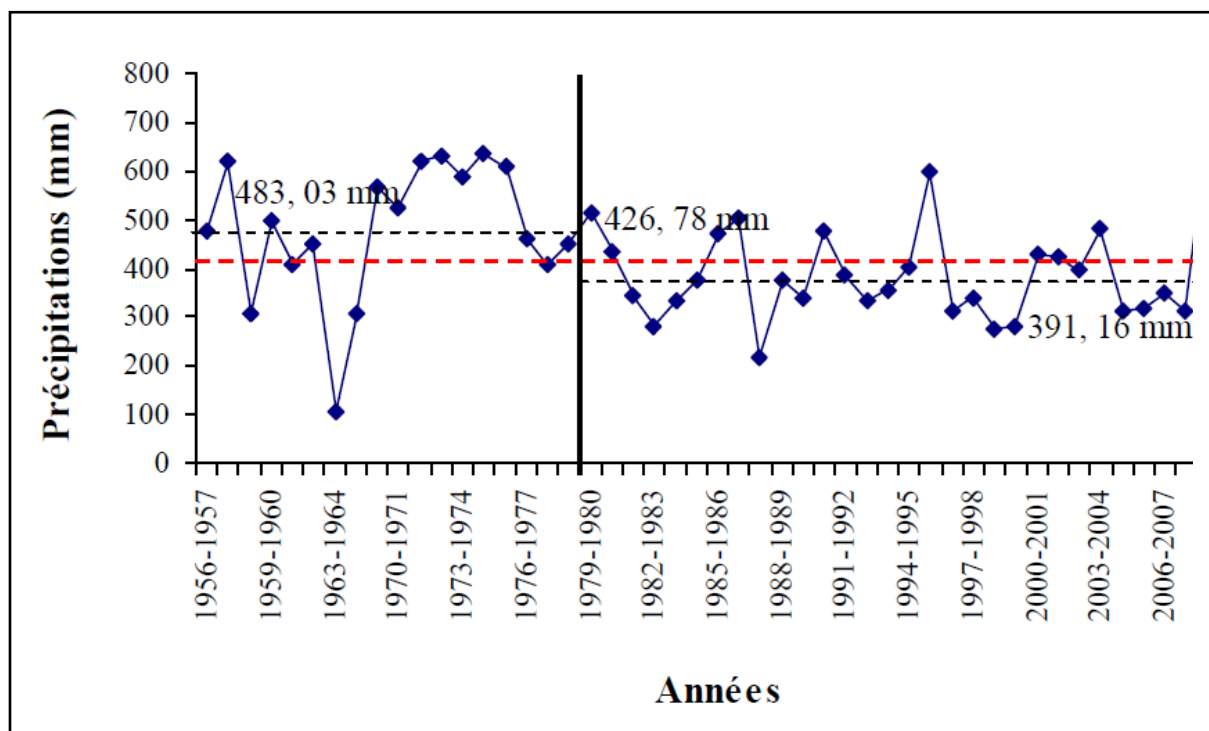


Figure 4 : Variations interannuelles des précipitations à la station de Chouly (1956 – 2010) (Gherissi. R, 2012).

Sur une période de 49 ans, 23 années ont enregistré des hauteurs de pluie supérieure à la moyenne qui est de 483 mm.

Entre 1970/1971 et 1979/1980, les précipitations sont supérieures à la moyenne avec un maximum en 1974/1975 de 636,7 mm, ceci caractérise une période relativement humide.

À partir de 1980/1981, et pour le reste de la série d'observations, règne une période relativement sèche avec un minimum de 218,4 mm en 1987/1988 à l'exception des années 1986/1987 – 1990/1991 – 1995/1996 – 2003/2004 – 2008/2009 – 2009/2010 où les précipitations ont été supérieures à la moyenne.

Sur une période de 49 ans les précipitations ont subi une diminution importante de 91 mm, (R. Gherissi, 2012).

2.4.1.2. Précipitations mensuelles

Tableau 3 : Valeurs moyennes mensuelles des précipitations (R. Gherissi, 2012).

mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
P (mm)	18,82	35,49	51,79	56,40	51,65	57,38	59,84	45,03	31,83	10,28	4,34	3,94

La répartition des précipitations moyennes mensuelles pour la période (1956-2010) (Fig. 5) montre que le minimum des précipitations s'observe au mois de Juillet et Août (3.94 mm) (mois les plus secs), et le maximum au mois de Mars avec (59.84 mm) (mois le plus pluvieux). La lame totale des précipitations annuelles équivaut 483 mm.

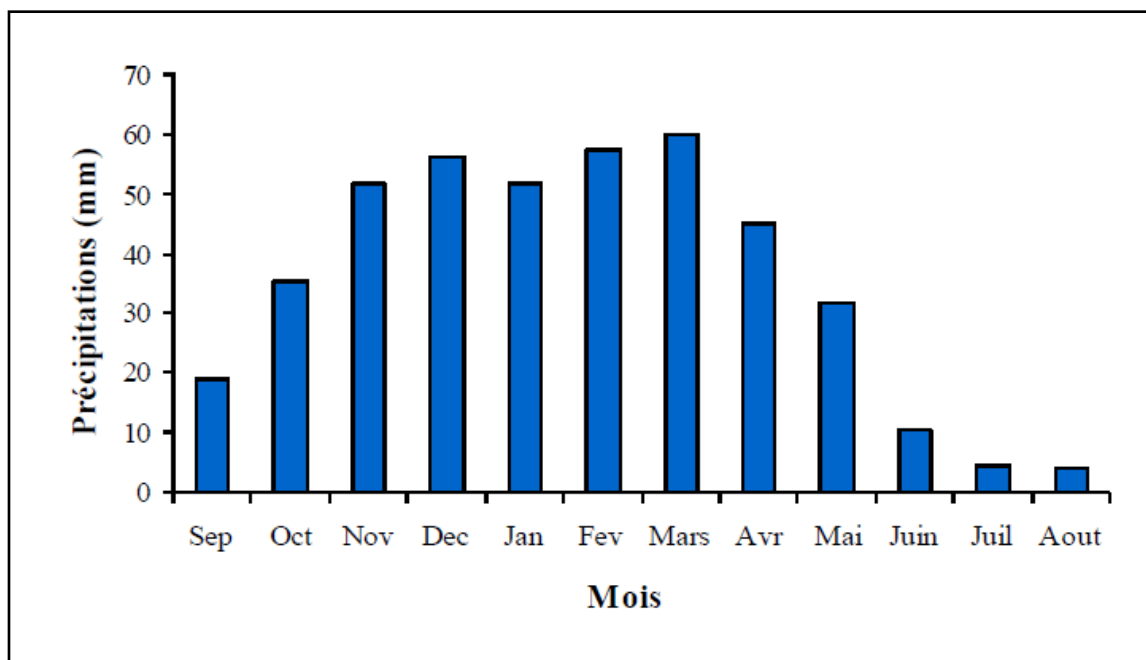


Figure 5 : Variation des précipitations moyennes mensuelles (1956-2010), (R. Gherissi, 2012).

2.4.2. Température

La température est un facteur important qui détermine le climat en interaction avec les autres facteurs météorologiques (insolation, vitesse et turbulence du vent, précipitation, etc.).

Les températures moyennes mensuelles et annuelles de la station Chouly sont portées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Moyennes mensuelles et annuelles des températures de la station Chouly, (Bouanani, 2004).

Station	T°C	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	An
Chouly	Min	13.6	9.6	6.5	3.7	2.3	3.2	4.7	6.5	8.8	12.3	15.1	16.2	8.5
	Max	29.6	24	18.5	14.7	13.7	14.6	17.3	19.7	23	28.1	32.7	32.2	22.3
	Moy	21.6	16.8	12.5	9.2	8	8.9	11	13.1	15.9	20.2	23.9	24.2	15.4

Les variations des températures moyennes mensuelles à la station Chouly montrent que le mois de Janvier, avec 08C, est le plus froid et le mois d'Août, avec 24.2°C est le plus chaud. La température moyenne annuelle est de 15.4°C.

Le climat de la région est de type semi-aride.

2.5. Contexte géologique

Les caractères généraux sur la géologie de la région d'étude sont présentés.

2.5.1. Description litho-stratigraphique

Géologiquement, la région d'Ouled Mimoun est constituée de trois unités stratigraphiques principales : le Secondaire, le Tertiaire et le Quaternaire, caractérisées par huit principales formations géologiques, (Figure 6).

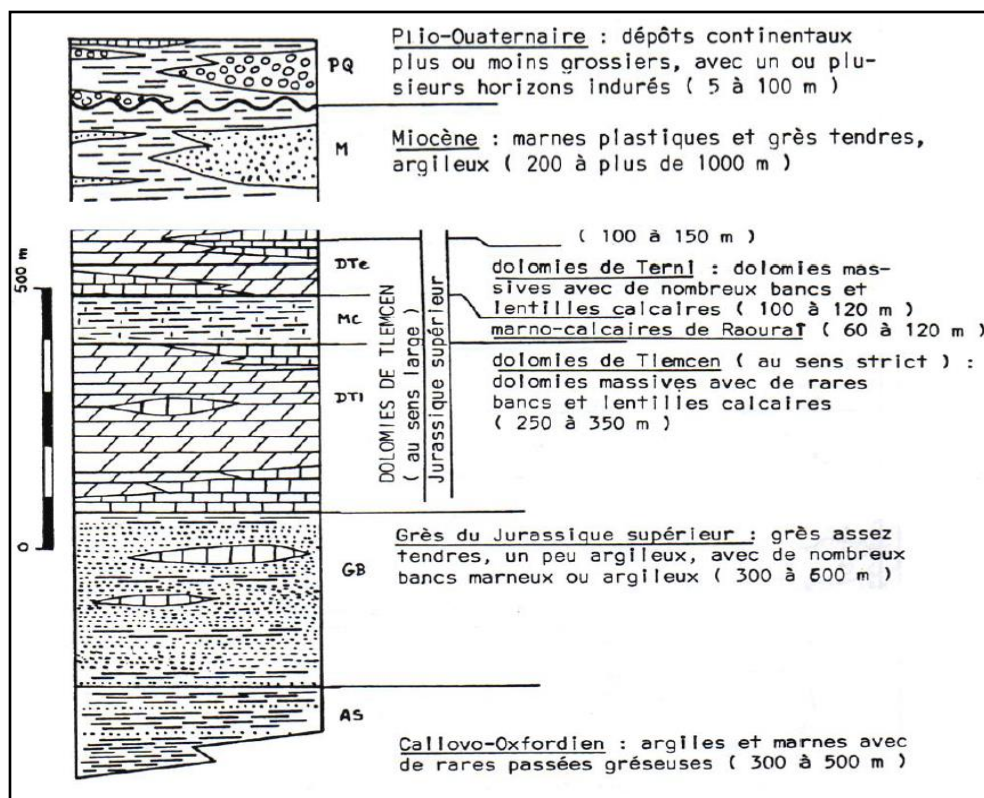


Figure 6 : Coupe synthétique des principales formations affleurant dans les Monts de Tlemcen (jusqu'au callovo-oxfordien) (Collignon B., 1986).

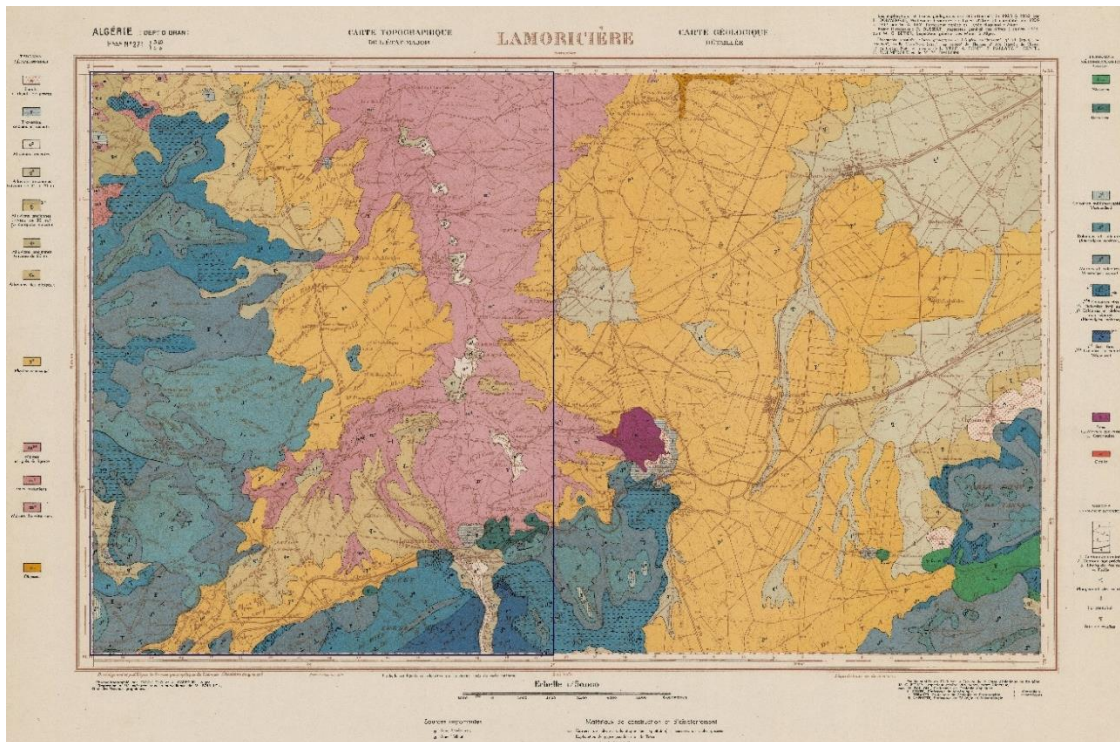


Figure 7 : Carte géologique du secteur d'étude ; carte de "Lamoricière" (Ouled Mimoun) au 1/50.000 (SCGA, 1948).

2.5.1.1. Le Secondaire

A- Jurassique

A.1-calcaires et dolomies du Kimméridgien inférieur

Constitués par des grès fins et des calcaires à Echinides dans la partie sud de l'agglomération d'Ouled Mimoun.

A.2-Marnes et calcaires du Kimméridgien moyen

Ce sont des marnes grises, blanchâtres, associés à des bancs de calcaire généralement marneux. Elles affleurent autour d'Ouled Mimoun, surtout à l'Ouest.

A.3- Dolomies et calcaires du Kimméridgien supérieur

Constituant la partie Ouest de la région d'Ouled Mimoun. Ce sont des calcaires gris en bancs cristallins à la base.

B- Crétacé

Représenté dans le secteur par la série du Crétacé inférieur.

B.1-Berriasien

Représenté à l'Est de l'agglomération d'Ouled Mimoun par des formations argilo-gréseuses (argiles de Lamoricière).

2.5.1.2. Le Tertiaire

A- Miocène moyen

Le "*Serravallien*", repose souvent en discordance sur le Miocène inférieur, déformé et partiellement érodé. Il est constitué essentiellement par une épaisse série d'argiles marneuses grises ou bleutées, qui par altération deviennent ocres. Au sein de cette série, pouvant atteindre 300 m d'épaisseur dans la vallée de l'Oued Isser, s'intercalent de nombreux bancs décimétriques de grès jaunes, plus fréquents au sommet de la série.

B- Pliocène continental

Le Pliocène affleure à l'Ouest et au Nord d'Ouled Mimoun dans le plateau de Sidi Senouci. Ce sont des dépôts alluvionnaires des plateaux caillouteux et limoneux parfois grés sableux.

2.5.1.3. Le Quaternaire

Représenté par un faciès continental d'origine alluviale et colluviale.

A.1- alluvions anciennes

Ce sont des dépôts anciens avec surface encroûtée.

A.2-Alluvions récentes

Constitués de dépôts caillouteux et limoneux occupant les fonds des oueds et s'élevant à un niveau grossier au niveau de l'Oued Lakhdar et l'Oued Isser.

Nous présentons également, en figure 8, la représentation synthétique de la couverture géologique de la région, établie à l'échelle de 1/ 200.000 (Energoprojekt/Anrh, 2008).

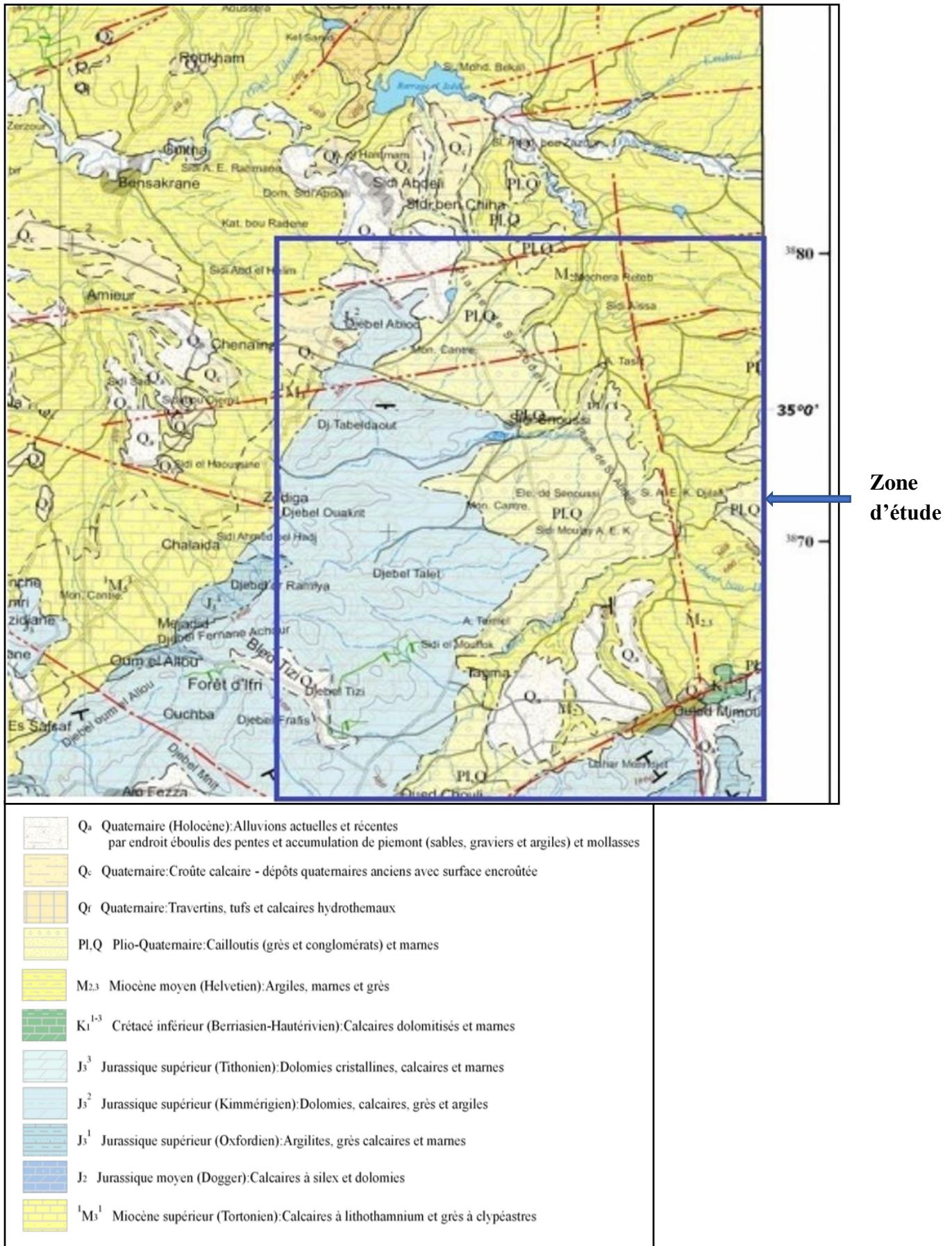


Figure 8 : Carte géologique synthétique du secteur d'étude à l'échelle 1/200.000 (d'après Energoprojekt/Anrh, 2008)

2.5.2. TECTONIQUE

Les formations qui affleurent dans les chaînes de montagnes de la région datent du Jurassique. Elles ont été affectées par divers mouvements tectoniques, c'est pourquoi de nombreuses failles s'observent dans la partie sud du terrain d'étude, ainsi l'anticlinal de Lamoricière. La faille majeure (F9) orientée Sud-Ouest est présente jusqu'à l'agglomération d'Ouled Mimoun.

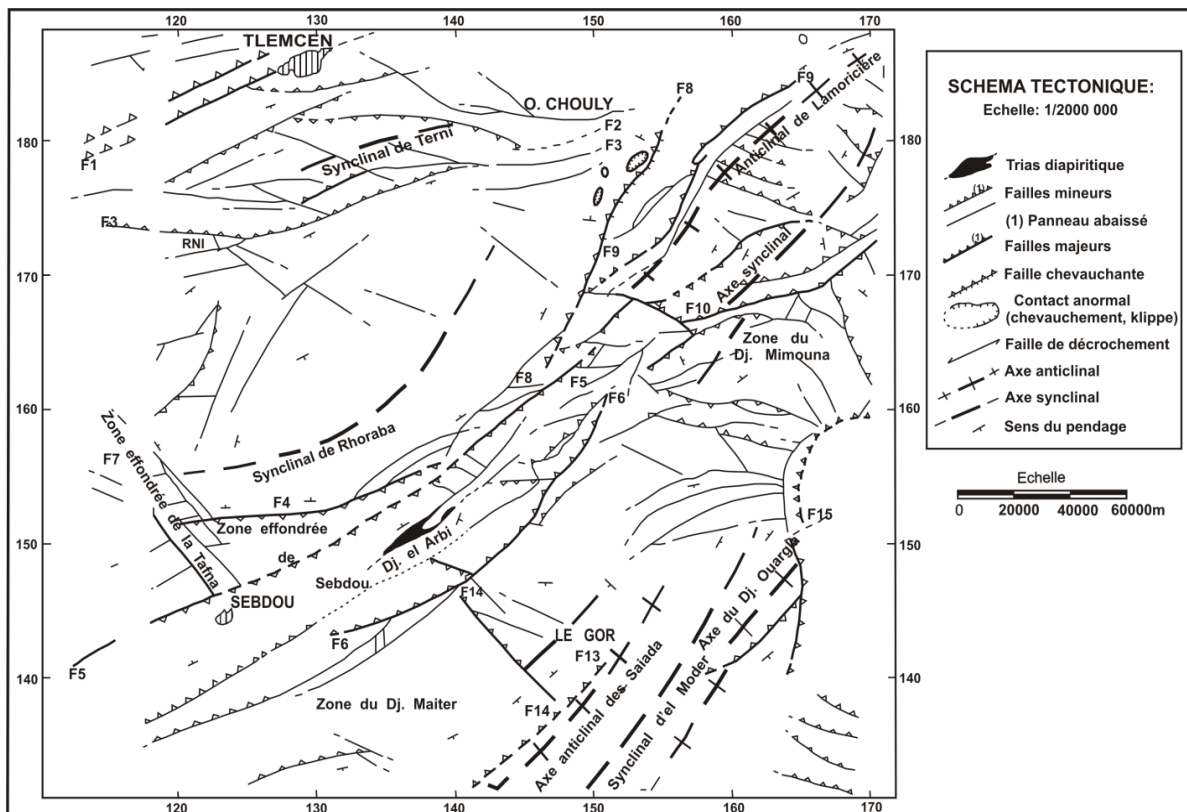


Figure 9 : Schéma tectonique des Monts de Tlemcen (Auclair et Biehler, 1967)

2.6. Hydrogéologie

2.6.1. Introduction

En raison de sa forme complexe, son étendue et sa grande variété lithologique, la région présente un comportement et des caractéristiques hydrogéologiques variables.

Les divers aquifères de la région se situent dans les formations jurassiques ainsi que dans celles du Miocène, qui peuvent se raccorder aux alluvions pliocènes du Quaternaire.

2.6.2. Aquifères

2.6.2.1. *Les aquifères du Jurassique*

Les formations du Jurassique constituent les plus vastes affleurements dans la région d'étude. Le kimméridgien supérieur est formé de calcaires et dolomies qui présentent les meilleures propriétés transmissives. Avec le Kimméridgien inférieur, il constitue le principal réservoir aquifère de la région d'étude. L'intensité de la karstification et de la fissuration, ainsi que les nombreuses sources qui se localisent aux points bas, confèrent à ces formations un rôle hydrogéologique majeur.

2.6.2.2. *L'aquifère alluvial du Plio-Quaternaire*

L'aquifère alluvial du Plio-Quaternaire exploité dans le plateau de Sidi Senouci et s'étend depuis la vallée de l'Oued Chouly, du côté sud, jusqu'à la limite d'Ouled Mimoun.

Plusieurs travaux ont ciblé l'aquifère alluvial du Plio-Quaternaire du plateau de Sidi Senouci (la partie centrale de la zone d'étude). Les plus importantes ont été ceux réalisés par Bensaoula. F en 1989 ; Ammour.S et Tekfi.R. en 2012.

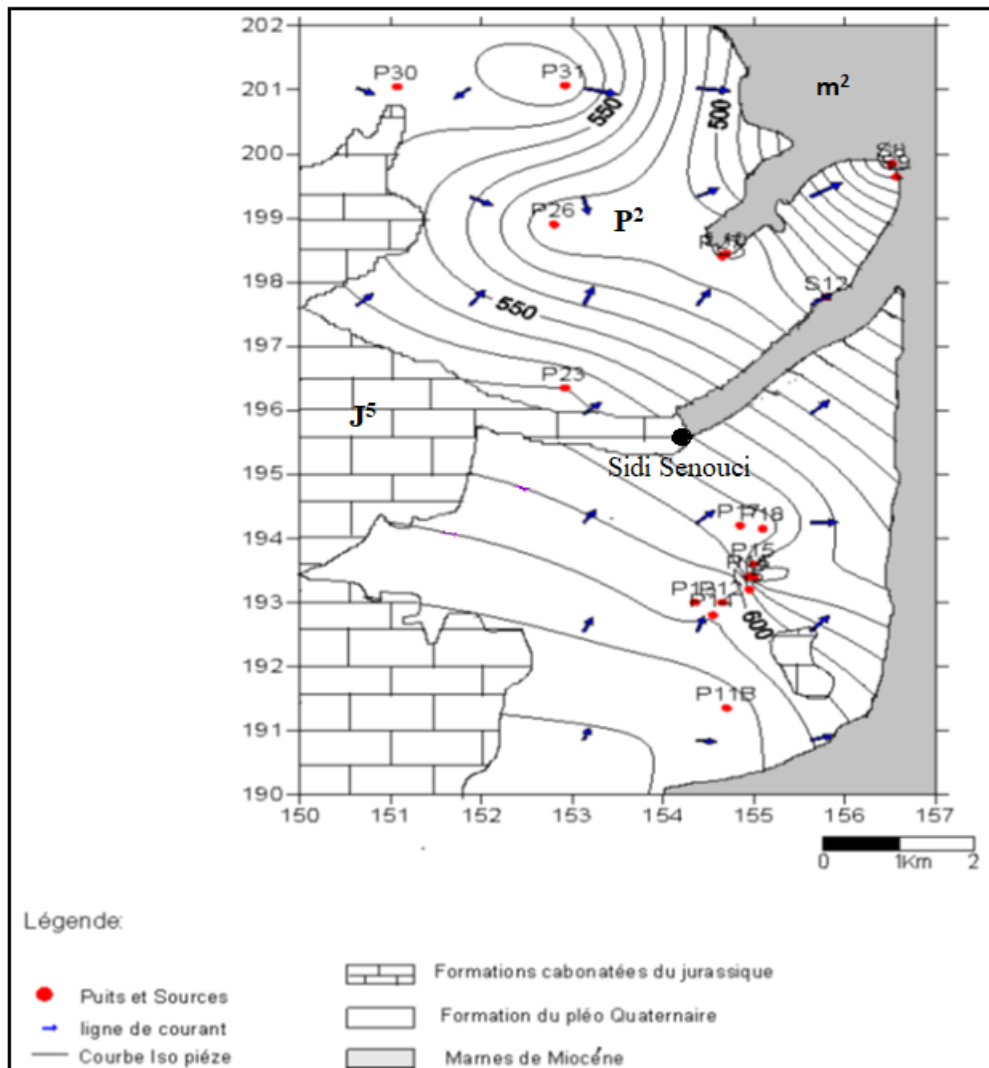


Figure 10 : Carte piézométrique du plateau de Sidi Senouci (Ammour.S et Tekfi.R, avril 2012).

La carte issue de la campagne piézométrique réalisée en 2012 montrer que :

- l'alimentation latérale est particulièrement identifiée au Sud de Sidi Senouci et au Nord du Djebel Semoured.
- l'écoulement se fait vers le nord-est. La nappe se déverse à hauteur de l'Oued Isser au niveau de sources de contact entre le Plio-Quaternaire et le Miocene sous-jacent : Ain El Atrouss, Ain-Hadjba, etc.
- le niveau piézométrique de l'aquifère se situe à une altitude comprise entre 500 et 600 m.

Une présentation synthétique des aquifères de la région peut être établie (Tableau n° 5).

Tableau 5 : log hydrogéologique de la zone d'étude

Stratigraphie	Lithologie	Hydrogéologie
Pliocène	Sable, Grés et Conglomérat	Peu développé exploité par puits
Miocène	Marnes	Imperméable
Jurassique	Calcaires, Dolomies	Perméabilité de fissure, aquifère important Emergences de plusieurs sources

2.7. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines de la région

2.7.1. Introduction

La chimie des eaux souterraines dépend principalement de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{--}), pour cela, nous avons utilisé à la fois les données de l'ANRH, issues du projet "Carte des ressources en eau souterraine du Nord de l'Algérie", afin de présenter la qualité des eaux souterraines des formations calcaro-dolomitiques d'âge jurassique et les données issues de la campagne réalisée en avril 2012 par Ammour.S et Tekfi.R, pour caractériser les eaux souterraines des formations Plio-Quaternaire.

2.7.2. Caractéristiques des eaux souterraines de l'aquifère du Jurassique supérieur

Tableau 6 : résultats de l'analyse physico-chimique des eaux de forage d'Ouled Mimoun (éléments en mg/l) (ANRH, 2008)

Date du prélèvement	Ca	Mg	Na	K	Cl	So4	RS	Ph
Fge Ouled Mimoun -140101	51	70	35	1	65	48	640	7.8

2.7.2.1. Physico-chimie des eaux

2.7.2.1.1. Paramètres physiques

2.7.2.1.1.1. Le pH (potentiel Hydrogène)

Le pH de l'eau conditionne les équilibres physico-chimiques, en particulier l'équilibre calco-carbonique et donc l'action de l'eau sur les carbonates.

Le ph de l'eau du forage d'Ouled Mimoun qui est égal à 7.8 ce qui indique une eau généralement neutre et légèrement basique.

2.7.2.1.1.2. Le résidu sec

Le résidu sec représente la minéralisation totale de l'eau, c'est-à-dire la totalité des sels dissous et les matières organiques contenues dans l'eau. Ses valeurs peuvent être vérifiées à partir de la mesure de la conductivité.

Les eaux issues des aquifères carbonatés du Jurassique supérieur sont moins minéralisées avec un résidu sec de 0.64 g/l.

2.7.2.1.1.3. Dureté totale

Elle traduit la somme des teneurs en calcium et magnésium et permet une évaluation de la qualité des eaux. Elle se mesure en meq/l ou en degré français (°F). Elle est calculée par la formule suivante :

$$\text{TH}_{\text{meq/l}} = (\text{r Ca}^{++} + \text{r Mg}^{++})$$

$$\text{meq/l} = 5^{\circ}\text{F}$$

Tableau 7 : qualité de l'eau en fonction du titre hydrotimétrique.

TH(°F)	0 à 7	7 à 15	15 à 25	25 à 42	Supérieur à 42
Eau	très douce	douce	moyennement dure	dure	très dure

Les résultats obtenus et présentés dans le tableau 8 montrent que l'eau du forage d'Ouled Mimoun est dure (TH = 41.5 °F). Cette dureté relativement élevée résulte principalement de la provenance et de la circulation de ces eaux dans les formations du Jurassique supérieur.

2.7.2.1.2. Faciès hydrochimique

Le tableau ci-dessous représente les quantités en réaction de cations et anions majeurs de l'eau du forage d'Ouled Mimoun ainsi que le faciès hydrochimique de cette eau.

Tableau 8 : quantité en réaction et classification de l'eau du forage d'Ouled Mimoun.

Fge Ouled Mimoun	teneur en milliéquivalent/litre						Faciès	Type
	Ca	Mg	Na	K	Cl	So4		
-140101	2.5	5.8	1.5	0.025	1.8	1	chloruré magnésien	Cl > So4; Mg > Ca > (Na+ K)

2.7.3. Qualité des eaux souterraines de l'aquifère Plio-Quaternaire

Afin de montrer la qualité des eaux souterraines de l'aquifères Plio-Quaternaire, nous nous sommes basé sur les résultats des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines obtenus lors de la campagne réalisée en avril 2012 par Ammour.S et Tekfi.R.

La température est un paramètre clé du comportement et de la qualité des eaux souterraines. La température des eaux souterraines du plateau de Sidi Senouci varie entre 19C° et 21.5C°, ces valeurs reflètent celle de la température de l'air ambiant dont la moyenne est de 22°C dans cette

zone d'étude. Cela laisse penser que le système aquifère du Plio-Quaternaire est en équilibre thermique avec l'atmosphère.

Le pH mesuré quant à lui varie entre 7,10 et 7,72.

La mesure de la conductivité permet d'évaluer rapidement, mais très approximativement la minéralisation globale de l'eau et d'en suivre l'évolution (Rodier et al, 2009). Les valeurs de la conductivité de la zone étudiée sont très hétérogènes et sont comprises entre 898 et 2250 $\mu\text{S}/\text{Cm}$. Du point de vue spatial, la répartition des conductivités est très hétérogène, cela pourrait être liées aux diverses sources de minéralisation des eaux. Les formations du Plio-Quaternaire ont donné généralement des eaux chargées 1.7 g/l à la limite de la potabilité.

Chapitre 3 : Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines appliquée à la zone d'étude

3.1. Introduction

La cartographie de la vulnérabilité est définie par comme une technique de quantification de l'estimation de la vulnérabilité et comme technique de visualisation d'une manière utile et pratique dans le domaine de gestion des eaux souterraines.

A travers le monde, la représentation par cartographie du degré de vulnérabilité des nappes d'eau souterraine aux pollutions a débuté par les travaux précurseurs, réalisées initialement par J. Margat (1968) suivi par une application de M. Albinet & J. Margat (1970) sous forme d'une carte de vulnérabilité à l'échelle du 1/1 000 000 pour l'ensemble des eaux souterraines de leur territoire national. Par la suite, les propositions de méthodes de cartographie de la vulnérabilité se sont multipliés (voir chapitre 1). Les plus utilisées actuellement sont les méthodes à cotation numérique (systèmes matriciels, de classement, etc.), à l'exemple des méthodes Drastic ou God.

3.2. Choix de la méthode

Une des difficultés de l'évaluation de la vulnérabilité réside dans la quantité d'information nécessaire à une bonne évaluation (V. Murat, 2000). Globalement, les techniques d'évaluation se basent sur les trois grandes méthodes de cartographie décrites au chapitre 1. En Algérie, ces dernières années, l'application de ces méthodes s'est répandue, essentiellement par utilisation des méthodes à cotation numérique (Drastic, etc.), car paraissant faciles à appliquer. Néanmoins, leur mise en œuvre reste délicate à cause des contraintes liées à la qualité des données physiques introduites, souvent mal estimées (perméabilité, recharge nette, etc.). A cet effet, les méthodes de cartographie des complexes hydrogéologiques, ne semblent pas avoir été souvent mise en œuvre bien que leur simplicité d'usage contourne la nécessité de disposer des

nombreuses données physiques, mesurables tout en aboutissant à des résultats appréciables. C'est la raison qui nous a orienté vers l'application à la région d'Ouled Mimoun de l'une des premières d'entre elles : la méthode J. Margat, 1968/ Albinet & Margat, 1975. Cette méthode consiste en une classification des terrains rencontrés en surface suivant les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans ces terrains. Elle se base uniquement sur les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques naturelles (critères invariables dans le temps).

3.3. Facteurs de vulnérabilité

La détermination de la vulnérabilité des nappes de la région d'Ouled Mimoun a été réalisée à partir de quatre facteurs : nature géologique et types de nappes, perméabilité verticale de la zone non saturée, transmissivité de la couche aquifère, degré de pollution actuelle de l'eau des cours d'eau de surface. Ils sont identifiables à partir de l'analyse du contexte géologique et hydrogéologique de toute région.

3.3.1. Nature géologique et types de nappes

Les couches aquifères affleurantes comprennent généralement une nappe libre (J. Margat, 1968). Dans certaines zones de la région étudiée où les roches affleurantes ne sont pas aquifères (couches sédimentaires de faible perméabilité : marnes, argiles), la première nappe à partir de la surface du sol correspond à une nappe captive.

3.3.2. Perméabilité verticale de la zone non saturée

Cette zone comprend le sol et diverses "formations superficielles" au-dessus du "substratum géologique". Il représente donc un milieu généralement très anisotrope et peu homogène selon la direction verticale. Aussi est-ce la perméabilité des couches les moins perméables qui importe ici. La vulnérabilité est fonction de la perméabilité verticale.

La mesure in-situ de cette perméabilité est délicate, aussi sa définition qualitative par la qualification lithologique des couches suffirait pour établir une classification (J. Margat, 1968).

3.3.3. Transmissivité T de la couche aquifère

Les propriétés transmissives des dolomies sont excellentes, mais les niveaux calcaires sont plus productifs que les niveaux dolomitiques en raison de leur propriété de fissures et de chenaux, ces derniers constituent les chemins privilégiés pour une potentielle eau polluée qui y se propagera rapidement.

3.3.4. Proximité d'un cours d'eau de surface en liaison hydraulique avec la nappe et degré de pollution actuelle de l'eau de ce cours d'eau

3.4. Utilisation des SIG et réalisation de la carte de vulnérabilité

Les logiciels utilisables pour la réalisation de cartes de vulnérabilité sont nombreux et variés. On peut citer : Mapinfo, IDRISI, ARC INFO et ARC VIEW.

Pour la réalisation de la carte de vulnérabilité des eaux souterraines de la région d'Ouled Mimoun nous avons ArcGIS, cet outil nous a permis de faciliter la réalisation de ce type de carte relative à la méthode appliquée.

L'échelle de cartographie utilisée est le 1/50 000 avec la légende type proposée par M. Albinet, 1970 pour une cartographie à cette échelle. De plus, nous avons mis dans la carte l'essentiel des renseignements supplémentaires adaptés et proposés pour cette échelle.

Les étapes suivies lors de la réalisation de la carte de vulnérabilité ont été :

- La collecte des données (la carte géologique d'Ouled Mimoun à l'échelle de 1/50 000).
- Géoréférencement de la carte (définir le système de coordonnées et le Géoréférencement par quatre points d'appui).
- Digitalisation des couches géologiques.
- Remplissage de la table attributaire.
- Classification des couches géologiques en classes de vulnérabilités.
- Définir des symboles pour les différentes classes.
- Mise en page de la carte.
- Exporter la carte au format image.

En suivant la méthode utilisée pour créer la carte de vulnérabilité des eaux souterraines de la région d'Ouled Mimoun, nous avons inclus des indications stratigraphiques en utilisant également les données de la carte géologique au 1/200.000 présentée en Chapitre 2.

3.5. Mise en application de la méthode

Par application de la méthode sélectionnée, et selon la nature des formations géologiques figurant dans les deux cartes géologiques de la région, nous avons dégagé dans le secteur d'étude six classes de vulnérabilité telles que définis par les concepteurs de la méthode, allant de formations à forte vulnérabilité à des formations à faible vulnérabilité, ainsi que l'ensemble des autres renseignements qui sont à indiquer, dans la mesure du possible, dans ce type de carte (Captages d'eau, cimetières, dépôt d'essence, etc.) (Figure 11).

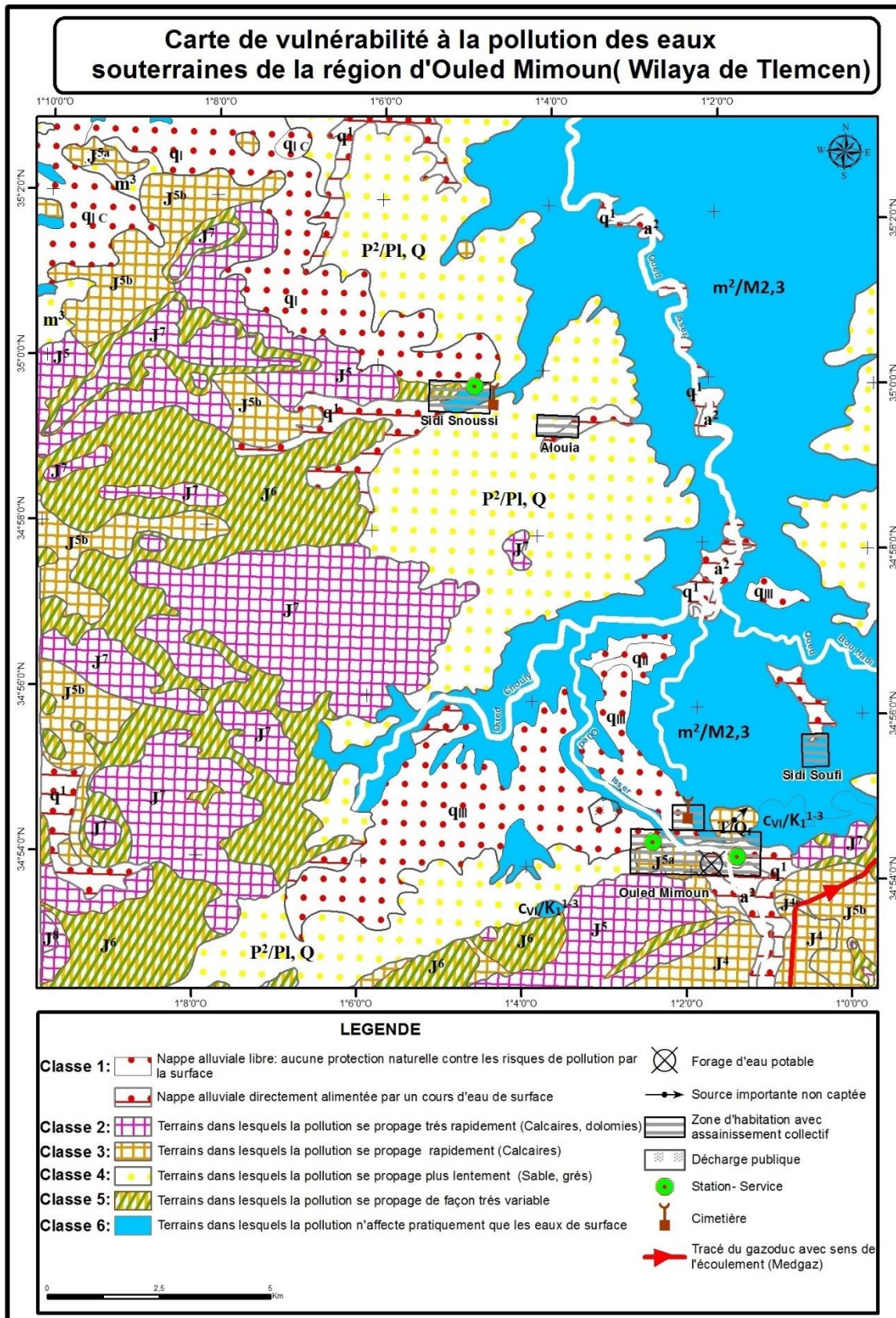


Figure 11 : Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région d'Ouled Mimoun par application de la méthode de Margat/Albinet (1968,1975).

- **Classe 1 : Domaine des alluvions**

Comprenant :

- Nappe alluviale libre avec aucune protection naturelle contre les risques de pollution par la surface.

L'aquifère est constitué par les alluvions des plateaux et les alluvions anciennes de niveau de 30 à 60 m.

- Nappe alluviale directement alimentée par un cours d'eau de surface

Cette nappe circule dans des alluvions récentes et dans des alluvions anciennes de niveau de 15 à 20 m. Ces alluvions se localisent essentiellement dans le lit d'Oued Isser et de l'Oued Chouly.

- **Classe 2 : Terrains dans lesquels la pollution se propage très rapidement (calcaires, dolomies, domaine karstique)**

Ces terrains correspondent à des formations de dolomies et de calcaires d'âge kimméridgien supérieur et de calcaires et dolomies d'âge kimméridgien inférieur. Ces formations du Jurassique affleurent à l'ouest et au sud-ouest d'Ouled Mimoun, principalement dans Djebel El Matmar El Abiod et Djbel Miez.

- **Classe 3 : Terrains dans lesquels la pollution se propage rapidement (craie, calcaires, dolomies, basaltes)**

Classe représentée par des terrains sont situés essentiellement au sud d'Ouled Mimoun, constitués par des calcaires et des grès fins.

- **Classe 4 : Terrains dans lesquels la pollution se propage plus lentement (sables, grès)**

Classe correspondant dans la région par des dépôts de grès parfois sableux et conglomérats d'âge Pliocène, affleurant à l'Ouest d'Ouled Mimoun et dans le plateau de Sidi Senouci.

- **Classe 5 : Terrains dans lesquels la pollution se propage de façon très variable**

Ces terrains apparaissent dans l'Ouest d'Ouled Mimoun, représenté par des marnes et calcaires d'âge kimméridgien moyen.

- **Classe 6 : Terrains dans lesquels la pollution n'affecte pratiquement que les eaux de surface.**

Classe représentée par des terrains sont situés essentiellement au nord d'Ouled Mimoun, constitués par des marnes d'âge miocène moyen et des argiles d'âge crétacé inférieur.

Conclusion générale

Les nappes libres sont les plus exposées à la pollution et ce risque augmente en fonction de plusieurs facteurs comme par exemple la nature des activités humaines, c'est le cas de la zone étudiée pour l'importance de cette ressource pour répondre à tous les besoins de la zone telle que l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable.

Pour une gestion cohérente et efficace des eaux souterraines face au risque de contamination, il faut qu'une stricte politique en matière de protection des eaux souterraines mise en œuvre, plus les outils qui permettraient d'atteindre cet objectif. La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterrains est l'un de ces outils.

Les caractéristiques hydrogéologiques, hydrostructurales et morphologiques variables qui caractérisent le territoire étudié et les circonstances de l'étude, a fait de la méthode J. Margat et M. Albinet la méthode privilégiée.

La carte de vulnérabilité établie dans le territoire en question, montre la particularité vulnérable des formations carbonatées du jurassique, qui affleurent principalement dans la partie Ouest dans ce territoire, ces formations qui constituent les principaux réservoirs d'eau souterraines nécessitent une protection spéciale.

Cette carte à l'échelle du 1/50.000 présente un préalable aux études quantitatives détaillées que nécessite l'aménagement de zones particulières, industrielles ou urbaines.

Finalement, cette carte a une fonction très utile, elle peut aider considérablement la définition des périmètres de protection des captages d'eau potable et la formulation d'avis sur des implantations de décharges publiques, dépôts de déchets ou de matériaux nocifs ou d'établissements générateurs de pollution.

Références bibliographiques

Achour M., 2014. Vulnérabilité et protection des eaux souterraines en zone aride : cas de la vallée du M'Zab (Ghardaïa - Algérie). *Mémoire de Magister, Univ. D'Oran*, 126 p.

Adda M., 2013. Caractérisation hydrochimique et pollution des eaux souterraines en contexte urbain : cas de l'agglomération oranaise Algérie. *Mémoire de Magister, Univ. d'Oran*, 135 p.

Adda M., Hassani M.I., Zaidi-Mebrouk N. 2015 : Caractérisation hydrochimique et pollution des eaux souterraines en contexte urbain : cas de l'agglomération oranaise (wilaya d'Oran-Algérie), *International Journal for Environment & Global Climate Change, Vol 3, Issue 2, 201, ISSN 2310-6743, pp 108-116.*

Albinet M., Margat, J., 1975. Cartographie de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine. *Groundwater Pollution-Symposium, Proceedings of the Moscow Symposium, August 1971 ; Actes du Colloque de Moscou, Août 1971 : IAHS-AISH Publ. No. 103, 1975.*

Ammour S., Tekfi R., 2012. Etude d'impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines cas du plateau de Sidi Senouci (Tlemcen). *Mémoire de Magister, Univ. Tlemcen*, 91 p.

Bemoussat A., 2012. Impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines à travers le bassin de la Tafna. *Mémoire de Magister, Univ. Tlemcen*, 136 p.

Bensaoula F., 1992. Carte hydrogéologique d'Ouled Mimoun au 1/50 000 et notice explicative (Algérie). Thèse. Magister. Univ. Oran. 365 p.

Bensaoula F., Bensalah M., Adjim M. (2005) : Les forages récents dans les aquifères karstiques des monts de Tlemcen. *Larhys Journal, N°4,7-15.*

Bensaoula F., Darni I., Adjim M. (2005) : Trente années de prospection et de mobilisation des ressources en eau souterraine, par forages, dans la wilaya de Tlemcen. *Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 10, Mars 2012, pp. 91-99.*

Bensaoula F., Adjim M : La mobilisation des ressources en eau : contexte climatique et contraintes socio-économiques (cas de la wilaya de Tlemcen). *Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 07, Juin 2008, pp. 79-92.*

BENSAOULA F., ADJIM M., BENSALAH M : L'importance des eaux karstiques dans l'approvisionnement en eau de la population de Tlemcen. *Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 06, Décembre 2007, pp. 57-64.*

BRGM (1996) - contribution a une normalisation d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions des eaux souterraines.

Bouanani A., 2004. Hydrologie, Transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérien). *Thèse de Doctorat d'état, Univ. Tlemcen*, 250 p.

Ducommun R.2010. Estimation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères en milieu urbain. *Th. Doc. Université de Neuchâtel, Suisse, 207 p.*

Fréchette R., 1988. Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, face aux risques de contamination engendrés par les usages des pesticides. *Th. Doc. Université du Québec, Canada, 127 p.*

Gherissi R., 2012. Hydrologie et modélisation pluie - débit : cas du bassin versant de l'Oued Lakhdar (ex : Chouly) Tafna-NW Algérie. *Mémoire de Magister, Univ. Tlemcen, 103 p.*

Hassani M.I., 2015. Vulnérabilité et protection qualitative des eaux souterraines. *Doc. Lab. Georen, n°4, Université Oran 2, 41 p.*

Kerzabi R., 2008. Identification de l'aquifère des grès serravaliens du bassin Miocène dans la région de Remchy - Hennaya et Ouled Mimoun. *Mémoire de Magister, Univ. Tlemcen, 64 p.*

Lassouani A, 2007. Cartographie de l'aléa sismique application à la commune de Bensekrane (W Tlemcen). *Mémoire de Magister, Univ. Tlemcen, 102 p.*

Margat J., 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution (*Groundwater vulnerability to contamination*) (in French). *Base de la cartographie. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Orléans, France.*

Annexe : Planches photographiques



Photo n° 1 : Vue de l'Oued Isser en état d'étiage.



Photo n° 2 : Affleurement de marnes et calcaires du Kimméridgien moyen.



Photo n° 3 : Affleurement d'argiles de Lamoricière (Berriasien)