



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة الجليلي اليابس سيدي بلعباس
UNIVERSITE DJILALI LIABES DE SIDI BEL ABBES
كلية علوم الطبيعة و الحياة و علوم الأرض
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
قسم علوم الفلاحة
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE L'AGRONOMIE

Mémoire

De fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : sciences de la nature et de la vie (S.N.V)

Filière : sciences agronomiques

Spécialité : Eau Et Environnement

Thème

**Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe
alluviale du moyen Chéelif occidentale par l'application de la
méthode SINTACS**

Présenté par : Mr. HATTAB Mohamed

Soutenu devant le jury

M^r. AMAR Youcef

Professeur UDL Sidi Bel Abbès

Président

M^r. MHAMDIA CHAFIK

MCB UDL Sidi Bel Abbès

Encadreur

M^m. AMAR Sara

MAB UDL Sidi Bel Abbès

Examineur

M^r. BOUHARIRA Abdelhak

Doctorant UHB Chlef

Co-Encadreur

Année Universitaire : 2019-2020

Résumé :

Dans la plaine du moyen Cheliff occidentale, les eaux souterraines constitue une ressource renouvelable très importante. La nappe alluviale se range parmi les réservoirs principaux d'eaux souterraines de la région. Elle est exploitée essentiellement pour l'approvisionnement en eau potable et pour l'agriculture. L'aire de la nappe est occupée par des zones agricoles, et urbaines ainsi que Industriels, caractérisées par une utilisation de plus en plus importante des engrais et d'autres produits chimiques, qui représentent un risque permanent pour la qualité des eaux souterraines.

La présente étude a pour objectif, l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale du moyen Cheliff occidentale. L'étude de la vulnérabilité à la pollution de cette nappe a été effectuée en appliquant une méthode de vulnérabilité intrinsèque SINTACS avec l'intégration des systèmes d'informations géographiques (SIG). Cette méthode est basée sur sept paramètres : (S) *Profondeur de l'eau*, (I) *recharge efficace*, (N) *Capacité d'atténuation de la zone non saturé*, (T) *Capacité d'atténuation du sol*, (A) *Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère*, (C) *Conductivité hydraulique de la zone saturée*, (S) *Pente topographique*. Ces paramètres ont été obtenus à partir de la zone d'information, cartes synthétiques relativement au secteur considéré et alors identifié dans chaque cellule après maillage du secteur étudié en cellules carrées régulières. Pour chaque maille, chaque paramètre de cote a été multiplié par le poids de cette maille et additionnée pour déterminer l'indice SINTACS. Une carte de la vulnérabilité intrinsèque montrant cinq classes obtenues à partir d'autre carte détaillée d'indice SINTACS Générale.

Mot clé : Cartographie, GIS, Vulnérabilité, SINTACS, Eaux souterraines, Pollution.

Abstract:

In the Western plain of the Cheliff means, the subsoil water constitutes a very significant renewable resource. The alluvial tablecloth lines up among subsoil water the principal reserves of the area. It is exploited primarily for the supply drinking water and agriculture. The surface of the tablecloth is occupied by agricultural and urban zones like Industrials, characterized by an increasingly significant use of manures and other chemicals, which represent a permanent risk for the quality of subsoil waters.

The present study aims at; the evaluation of the vulnerability to pollution of the alluvial tablecloth of the Cheliff means Western. The study of the vulnerability to pollution of this tablecloth was carried out by applying a method of vulnerability intrinsic SINTACS with integration of the geographical information systems (SIG). This method is based on seven parameters: (S) *Water depth*, (I) *effective recharge*, (N) *Attenuation capacity of the unsaturated zone*, (T) *Soil attenuation capacity*, (A) *Hydrogeological characteristics of the aquifer*, (C) *Hydraulic conductivity of the saturated zone*, (S) *Topographic slope*. These parameters were obtained starting from the synthetic chart, datum field relative to the sector considered and then identified in each cell after grid of the sector studied in regular square cells. For each mesh, each parameter of dimension was multiplied by the weight of this mesh and added to determine index SINTACS. A chart of the intrinsic vulnerability showing five classes obtained starting from another detailed chart of General index SINTACS.

Key Word: Cartography, GIS, Vulnerability, SINTACS, Groundwater, Pollution.

المخلص :

في سهل غرب الشلف المتوسط، المياه الجوفية هي مورد متجدد بأهمية كبيرة. تعد طبقة المياه الجوفية الرسوبية هي من بين الخزانات الرئيسية للمياه الجوفية في المنطقة. وهي تستخدم أساسا لتوفير المياه لأغراض الشرب والزراعة. تمثل الصناعة والزراعة مصدر رئيسي لتلوث هذه المياه الجوفية.

تمثل هذه الدراسة تقييم موضوعي لخطر التعرض لتلوث المياه الجوفية في الطبقات الرسوبية في الغرب الأوسط لشلف.

دراسة قابلية التعرض للتلوث في المياه الجوفية قد أنجزت من خلال تطبيق طريقة SINTACS مع تكامل نظم المعلومات الجغرافية. هذه الطريقة تقوم على سبع مقاييس: (S) عمق المياه، (I) التغذية الفعالة، (N) قدرة التوهين للمنطقة غير المشبعة، (T) قدرة توهين التربة، (أ) الخصائص الهيدروجيولوجية للخزان الجوفي، (C) التوصيل الهيدروليكي للمنطقة المشبعة، المنحدر الطبوغرافي (S). هذه المعايير تم الحصول عليها من معلومات المنطقة، والخرائط التركيبية النسبية لهذا القطاع، وبعد ذلك تم تحديدها في كل خلية الشبكة بعد منطقة الدراسة العادية إلى خلايا مربعة. لكل خلية، نقوم بضرب كل من $Poids * Cote$ لتحديد مؤشر SINTACS.

تحصلنا على خريطة تبين خمسة فئات الضعف الجوهري التي تم الحصول عليها من خرائط مفصلة للمؤشر العام

SINTACS.

الكلمات الرئيسية: رسم الخرائط، نظم المعلومات الجغرافية، الضعف الجوهري، المياه الجوفية، التلوث.

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions dieu de nous avoir accordé la connaissance de science et de nous avoir aidés à réaliser ce travail.

Au terme de ce travail, il nous est agréable de remercier tous ceux qui ont contribué à sa réalisation et en particulier mon promoteur *Mr MHAMDIA Chafik* et mon copromoteur *Mr BOUHARIRA Abdelhak* pour leurs aides et leurs orientations.

Nous remercions également *Mr AMAR Youcef* pour avoir accepté de nous honorer de sa présence en président de ce jury.

Nos remerciements s'adressent aussi à *Mm AMAR Sara*, d'avoir accepté d'examiner notre travail et participer au jury.

Ainsi qu'à toute l'équipe de l'Université de *DJILALI LYABES DE SIDI BELABES*, notamment les enseignants de Département des Sciences Agronomiques et des Sciences Biologiques.

DÉDICACE

*A tous ceux qui ont un titre ou un autre par leurs affections leurs encouragements et leurs
patiences m'ont aidé à mener à bien ce travail à son terme.*

A la mémoire de Mon père HATTAB EL Hadj

Ma mère

Mes frères et mes sœurs

*Mes amis plus particulièrement GHAZZANI Abdelhak, CHAKROUNE Omar,
BELKSSAKIS Salim.*

A la promotion de « Eau et Environnement »

Mohammed.

Table de Matière

| | |
|---|------------|
| Résumé | I |
| Abstract | I |
| ملخص | II |
| Remerciements | III |
| Dédicace | IV |
| Table des matières | V |
| Liste des figures | VII |
| Liste des tableaux | IX |
| Liste des abréviations | X |
| | |
| INTRODUCTION GENERALE | 01 |
| | |
| CHAPITRE I : NOTION DE POLLUTION ET CONCEPT DE VULNERABILITE. | 04 |
| | |
| I.1. Introduction aux eaux souterraines | 05 |
| I.2. Notions de pollution | 06 |
| I.2.1. Pollution des eaux souterraine | 06 |
| I.2.2. Classification des polluants | 07 |
| I.2.3. Mécanisme de transport et d'atténuation du polluant | 10 |
| I.3. Concept de vulnérabilité | 13 |
| I.3.1. Notion de vulnérabilité | 13 |
| I.3.2. Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité | 15 |
| I.3.2.1. Les méthodes basées sur les documents cartographiques | 16 |
| I.3.2.2. Les méthodes basées sur un système de cotation numérique | 17 |
| I.3.2.3. Les méthodes fondées sur la caractérisation des rejets | 18 |
| | |
| CHAPITRE II : CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE | 20 |
| | |
| II.1. Situation géographique de la zone d'étude | 21 |

| | |
|---|-----------|
| II.2. Hydrographie | 23 |
| II.3. Le climat | 23 |
| II.4. Géologie | 26 |
| CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES | 33 |
| III.1. Aspect théorique et pratique de la méthode SINTACS | 34 |
| III.1.1. Présentation | 34 |
| III.1.2. Description des paramètres SINTACS | 37 |
| III-1-3 Interaction entre les paramètres SINTACS | 40 |
| III.2. Cartographie de la vulnérabilité | 41 |
| III.3. Généralités sur les SIG | 43 |
| III.4. Optimisation d'un SIG pour la cartographie de la vulnérabilité | 45 |
| III.5. Objectif et intérêt des cartes de vulnérabilité | 45 |
| CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS | 47 |
| IV-1 Inventaire des données | 48 |
| IV-2 Réalisation des cartes thématiques | 49 |
| IV-2-1 Le paramètre « S » profondeur de l'eau | 49 |
| IV-2-2 Le paramètre « I » Recharge Efficace | 51 |
| IV-2-3 Le paramètre « N » Capacité d'atténuation de la zone non saturé | 53 |
| IV-2-4 Le paramètre « T » Capacité d'atténuation du sol | 55 |
| IV-2-5 Le paramètre « A » Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère | 57 |
| IV-2-6 Le paramètre « C » Conductivité hydraulique de la zone saturée | 57 |
| IV-2-5 Le paramètre « S » Pente Topographique | 59 |
| CONCLUSION GENERALE | 68 |
| Références bibliographiques..... | 72 |
| Annexe..... | 77 |

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : NOTION DE POLLUTION ET CONCEPT DE VULNERABILITE

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Les principaux types de nappes (Blum, 2004)..... | 05 |
| Figure I.2 : Définition de la zone non saturée. (Hydrogéologie, G. Castany, 2000)..... | 11 |
| Figure I.3 : Méthodes d'évaluation et cartographie de la vulnérabilité | 15 |

Chapitre II : CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

| | |
|--|----|
| Figure II.1 : Situation géographique de la zone d'étude | 22 |
| Figure II.2 : Carte pluviométrique de la région de Chlef (ABH-CZ, 2003)..... | 24 |
| Figure II.3 : Carte d'évapotranspiration de la région de Chlef (ABH-CZ, 2003)..... | 25 |
| Figure II.4 : Carte géologique du Moyen Cheliff occidental d'après Scet-Agri ; 1985 (Elmeddahi, 2008)..... | 28 |
| Figure II.5 : La stratigraphie synthétique du moyen-Chéliff occidental (Mattauer, 1958)..... | 30 |
| Figure II.6 : Les principales unités hydrogéologiques de la région de Chlef (ABH-CZ ,2003)..... | 31 |

Chapitre III : MATERIELS ET METHODES

| | |
|--|----|
| Figure III.1 : Détermination de la profondeur de l'eau (s) dans le cas d'une nappe libre (Aller et al, 1987 in Boujaltia, 2000)..... | 37 |
| Figure III.2 : Détermination de la profondeur de l'eau dans le cas d'une nappe captive (Aller et al, 1987 in Boujaltia, 2000)..... | 37 |
| Figure III.3 : Principe de construction de la carte de vulnérabilité (méthode SINTACS)..... | 42 |

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

| | |
|--|----|
| Figure IV.1 : Carte du paramètre « S » profondeur du l'eau..... | 50 |
| Figure IV.2 : Carte du paramètre « I » recharge efficace..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Figure IV.3 : Carte du paramètre « N » Capacité d'atténuation de la zone vadose | 54 |
| Figure IV.4 : Carte du paramètre « T » Capacité d'atténuation du sol | 56 |
| Figure IV.5 : Carte du paramètre « A » Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère | 58 |
| Figure IV.6 : Carte du paramètre « C » Conductivité hydraulique..... | 60 |
| Figure IV.7 : Carte des classes de pente | 61 |
| Figure IV.8: Carte du paramètre « S » Pente Topographique..... | 63 |
| Figure IV.9: Classes de vulnérabilité en % de superficie (Modèle SINTACS) de la nappe..... | 64 |
| Figure IV.10: Carte de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale du moyen Cheliff occidentale..... | 65 |

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

| | |
|--|----|
| Tableau II.1 : Principales Caractéristiques des 03 sous bassins versants de l'aire d'étude (ABH – CZ, 2003)..... | 21 |
| Tableau II.2 : Température moyenne mensuelle et pluie mensuelle (période 1981/1982) à (2003/2004) de la station de Mouafkia. (ONM –Chlef)..... | 26 |
| Tableau II.3 : Volume d'eau prélevé de la nappe alluviale (ABH – CZ, 2004)..... | 32 |

Chapitre III : MATERIELS ET METHODES

| | |
|---|----|
| Tableau III.1 : Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode (Civita et De Maio, 2004)..... | 35 |
| Tableau III.2 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SINTACS (Kaplej et al, 2013)..... | 36 |

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

| | |
|---|----|
| Tableau IV.1 : Les différentes sources d'informations utilisées pour l'évaluation des paramètres SINTACS..... | 48 |
| Tableau IV.2 : L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre profondeur du l'eau « I _S » (Rutharvel Murthy et al, 2015)..... | 49 |
| Tableau IV.3 : L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre recharge efficace du l'eau « I _I » (Rutharvel Murthy et al, 2015)..... | 51 |
| Tableau IV.4 : L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre impact de la zone non saturée « I _N »..... | 53 |
| Tableau IV.5 : L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre Capacité d'atténuation du sol « I _T »..... | 55 |
| Tableau IV.6 : L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère « I _A »..... | 57 |
| Tableau IV.7 : L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre Conductivité Hydraulique « I _C »..... | 59 |
| Tableau IV.8 : L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre Pente topographique « I _S »..... | 61 |
| Tableau IV.9 : Caractéristiques du degré de Vulnérabilité de la nappe alluviale..... | 62 |

Liste des abréviations :

A : Milieu aquifère

ABH-CZ : Agence du bassin hydrographique Zahraz

Ac : Cote relative au matériau du milieu aquifère

ANRH : Agence national des ressources hydrique

Ap : Poids relatif au matériau du milieu aquifère

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières

C : Conductivité hydraulique

Cc : Cote relative à la conductivité hydraulique

Cp : Poids relatif à la conductivité hydraulique

DBO : Demande biologique d'oxygène

Dc : Cote relative à la profondeur de la nappe

DCO : Demande chimique d'oxygène

DEFI: Durée étendue fréquence intensité

DHW-Chlef: Direction de l'hydraulique Wilaya de Chlef

Dp: Poids relatif à la profondeur de la nappe

DSA : Direction des Services Agricoles

EPA: l'agence de protection de l'environnement des Etats-Unis

I: Zone non saturée

Ic: Cote relative au matériau de la zone non saturée

Ip : Poids relatif au matériau de la zone non saturée

MAPA: Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation

MCO : Moyen Chélif Occidental

NRA: National rivers authority

NWWA: National Word Water American

OMS: Organisation mondial de la santé

ONID: Office National d'Irrigation et Drainage

ONM-Chlef : Office national de météorologie.

PRAST: Pouvoir épurateur, recharge, aquifer, soil, topography

S : Type du sol

Sc : Cote relative au type de sol

Liste des abréviations

SCCGI: Sydney coastal council group

SC et AGRI: Science et Agriculture

SIG: Système d'information géographique

Sp : Poids relatif au type de sol

Vol : Volume

ZNS : Zone non saturée

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau souterraine est une ressource naturelle importante à travers le monde. Elles offrent d'excellentes sources d'approvisionnement soit en eau potable ou en irrigation. Cependant, l'utilisation intensive de ces ressources en eau et l'accroissement des activités anthropiques ont engendrés de sérieux problèmes du fait d'un manque de protection de l'environnement **(Matini et al, 2009 in Kouakou et al, 2012)**.

Dont on est sensé la protéger contre toutes formes de pollution pour assurer sa pérennité Parmi ces problèmes, nous pouvons évoquer la pollution des ressources en eaux **(Soro et al, 2009 ; Ahoussi et al, 2010)**.

La pollution de l'eau dans nos villes est d'autant plus préoccupante car l'eau peut être considérée comme le milieu récepteur final de toutes formes de pollution. Ces milieux récepteurs sont les eaux superficielles (telles que les lacs, les étangs et les cours d'eaux) ainsi que les aquifères. Cependant, ce ne sont ni les sources de pollution ni l'ampleur et encore moins la nocivité des polluants mis en jeu, qui rendent le problème de pollution de l'eau crucial.

Les causes de la pollution de l'eau sont nombreuses et variées, les plus connues sont celles liées à l'activité humaine et notamment :

- ✓ L'urbanisation, par la forte consommation de l'eau qu'elle engendre, qui entraîne la production d'une quantité considérable d'eau usée surtout domestiques. Ainsi l'utilisation des cours d'eau comme dépotoir de déchets ou encore comme lieux de vidange des fosses septiques engendre une pollution par les excréta.
- ✓ L'industrialisation est l'une des causes majeures de la pollution de l'eau dans nos villes surtout en absence des dispositions pour traiter les effluents liquides ou gazeux avant leur rejet dans le milieu naturel.
- ✓ Les autres causes de pollution de l'eau sont liées à la mauvaise gestion des eaux usées et au mauvais drainage de certaines villes.

Les dernières décennies sont caractérisées par une période d'industrialisation et par une sécheresse intense qui touche l'Algérie du Nord d'une manière générale. Cette situation rend le domaine de l'eau de plus en plus vital et les nappes aquifères de plus en plus vulnérables à la pollution.

La plaine du moyen Cheliff occidentale qui appartient au grand bassin hydrographique Cheliff-Zahrez, présente une potentialité globale en eaux souterraines (Alluvions du Quaternaire, Calcaires lithothamnium et Grès et sable du Pliocène) de l'ordre de 26 Hm³/an. (ABH - CZ, 2003)

Notre travail a été réalisé dans le but de l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères vis-à-vis à la pollution de la nappe quaternaire alluvial du moyen Chéiff occidentale où sa potentialité en eau est estimée à 11Hm³/an (ABH - CZ, 2003), par une méthode paramétrique d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque, qui se présente sous forme de systèmes de cotation numérique basé sur la considération des différents facteurs influençant le système hydrogéologique de la vulnérabilité appelé méthode SINTACS, avec l'intégration des systèmes d'information géographique (SIG) qui représentent l'outil le plus adéquat à l'application de la méthode SINTACS.

Les cartes de vulnérabilité, ne remplacent pas les mesures de protection des eaux souterraines existantes, mais complètent utilement les informations disponibles pour l'aménagement du territoire (**Murat, 2000**).

Pour ce faire, nous avons structuré notre travail en quatre (04) Chapitres :

- Dans le premier chapitre nous rappelons les différents types et origines de pollution des eaux souterraines, les mécanismes d'atténuation du polluant dans le système aquifère, ainsi nous introduisant le concept de vulnérabilité avec une étude comparative des différentes méthodes d'évaluation de cette vulnérabilité.
- Dans le deuxième chapitre nous proposons une étude détaillée de la méthode SINTACS.
- Dans le troisième chapitre on donne une description du milieu physique d'étude et sa localisation.
- Le dernier chapitre est destiné aux résultats obtenus et à la discussion de ces derniers par le biais de différentes cartes thématiques réalisées, ces résultats peuvent être utilisés comme moyens de planification et de gestion durable des ressources en eaux souterraines.

CHAPITRE I

NOTION DE POLLUTION

ET CONCEPT DE

VULNERABILITE

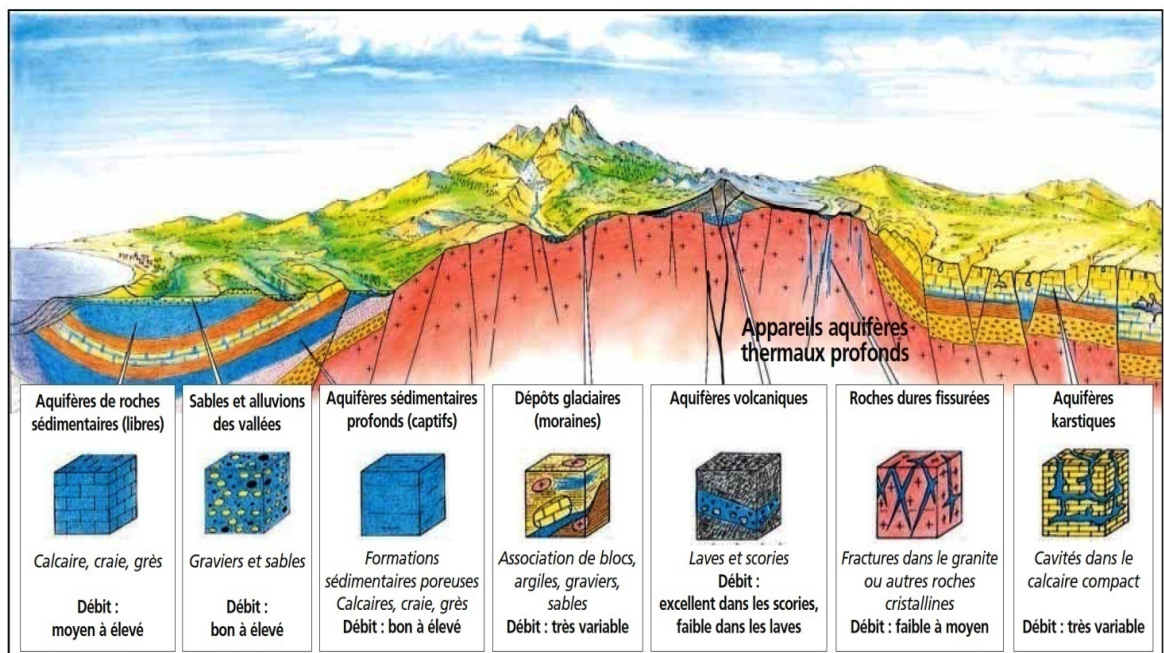
I-1 Introduction aux eaux souterraines

Certaines roches sont suffisamment poreuses ou fissurées pour contenir de l'eau. On parle alors de roches aquifères. Ces aquifères sont généralement composés de deux zones :

- **une zone non saturée** comprenant le sol et la partie supérieure de la roche aquifère. Dans cette zone, l'eau ne remplit pas l'intégralité des pores de la roche ;
- **une zone saturée** dans laquelle les interstices de la roche sont complètement saturés d'eau. Cette eau contenue dans la roche prend le nom de nappe.

Les eaux souterraines sont donc contenues dans les interstices (souvent microscopiques) de la roche et forment de vastes lacs ou rivières souterraines dans les aquifères karstiques.

Selon la nature géologique des terrains, il existe différents types d'aquifères (figure 1) que l'on peut regrouper en trois grands ensembles :



Source : Blum (2004)

Figure I.1 : Les principaux types de nappes

- **les aquifères sédimentaires** composés de roches sédimentaires (calcaire, craie, sable, grès). Ces systèmes sont caractéristiques des grands bassins. Ils peuvent être libres ou captifs.
- **les nappes alluviales** : formés de sables et de graviers, ces aquifères ont la particularité d'entretenir des relations avec les cours d'eau.

- **les nappes des roches cristallines** (granite, gneiss...) : dans ces systèmes, l'eau est le plus souvent contenue dans les fissures. Il s'agit donc généralement de petits systèmes sans grand aquifère individualisé. (Blum, 2004)

I-2 Notions de pollution :

La définition la plus générale du terme de pollution a été donnée par le premier rapport du Conseil sur la qualité de l'environnement de la Maison Blanche (1965) « La pollution » dit ce rapport « est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît, en totalité ou en partie, comme un sous-produit de l'action humaine, au travers des effets directs ou indirects altérant les critères de répartition des flux de l'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou à travers des ressources agricoles, en eau et en produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède ou les possibilités récréatives du milieu ».

On peut donner une définition plus restrictive de ce terme : « constitue une pollution toute modification de flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la concentration des constituants chimiques naturels ou encore l'introduction dans la biosphère de substances chimiques artificielles produites par l'homme ». (Ramade, 2000)

I-2-1 Pollution des eaux souterraines :

L'eau souterraine est considérée comme polluée lorsqu'elle contient, d'une part, des substances autres que celles liées à la structure naturelle des terrains où elle a séjourné et d'autre part lorsque les concentrations des constituants dissous ou en suspension dépassent les normes admissibles. (Hennia, 2006)

Cependant, dans le cas d'absence totale de constituants étrangers dans la nappe, l'eau souterraine peut être qualifiée de dégradée ou d'impropre à la consommation lorsque les concentrations de ses constituants dissous ou en suspension dépassent les normes admissibles.

I-2-1-1 Pollution directe ou indirecte :

La pollution générée par l'homme est directe lorsqu'elle a lieu sur le toit de la nappe d'eau souterraine. C'est le cas par exemple d'un rejet de produits organiques dans un puits. La pollution est indirecte lorsqu'elle se fait en direction des eaux souterraines à travers les autres eaux du cycle, d'autres eaux souterraines, ou à travers l'environnement inerte. Le déversement sur le sol d'un pesticide est une pollution indirecte sur les eaux souterraines, car

pour que le contaminant parvienne à la nappe, il traversera le sol et la zone non saturée de l'aquifère.

I-2-1-2 Nature de la pollution :

La pollution peut être :

- **Quantitative** : accroissement ou diminution du flux d'eau ou du flux de chaleur qui pourra être causé par la perméabilité du sol, le colmatage des berges...etc.
- **Qualitatives** : bactérienne, chimique, radioactive et thermique.

I-2-1-3 Caractérisation de la pollution :

La pollution est caractérisée par le « DEFI » c'est à dire sa durée, son Etendue, sa fréquence et son intensité (Parascandola, 1980 in Boudjelthia, 2000).

- 1- **Durée** : la durée l'émission polluante est très variable en fonction de son origine, des moyens de détection et des moyens de lutte pour son atténuation.
- 2- **Etendue** : l'étendue de la propagation d'un polluant dépend de sa source, du volume du polluant, des possibilités de détection et des moyens utilisés pour la stopper.
- 3- **Fréquence** : la fréquence d'un phénomène de pollution est directement liée à l'activité humaine à laquelle elle se rapporte, aux mesures prises dans le sens de diminution des actes volontaires ou involontaires de pollution et à l'existence d'infrastructures.
- 4- **Intensité** : Elle est fonction de la toxicité des contaminants et de leur concentration.

I-2-2 Classification des polluants

Les polluants peuvent être classés suivant différents critères :

I-2-2.1 En fonction de l'origine de la pollution

- **Urbaine** : eaux usées domestiques, eaux d'infiltration sous dépôts d'ordures ...etc.,
- **Industrielle** : eaux de rejet, eaux d'infiltration sous dépôts industriels, liquides dangereux tel que les hydrocarbures, eaux des lagunes,... etc.
- **Agricole** : eaux d'infiltration et de ruissellement sous aires cultivées, ou sous aires agricoles (élevage, lisières, épandages d'engrais azotés, produits phytosanitaires).

I-2-2.2 En fonction de la nature des polluants

- **Polluants physiques** : Les principaux agents physiques de la pollution sont : la chaleur, le transport de matière en suspension et la radioactivité.

- **Chaleur**, par élévation de la température de l'eau surtout de surface, elle provoque des effets écologiques sur la vie aquatique (développement de micro-organismes, prolifération des algues). Elle diminue la solubilité de l'oxygène, déficit renforcé par l'accroissement de l'activité biologique qui en consomme.

- **Matière solide en suspension** est introduite par les précipitations dans les eaux de surface. Certaines particules, très fines (de l'ordre du micron), peuvent ainsi transiter. Elles sont le fait de substances non solubles qu'elles soient de nature minérale ou organique. Elle se traduit par une augmentation de la turbidité, une diminution de la transparence, de mauvaises odeurs et par l'eutrophisation des milieux récepteurs.

La radioactivité est potentiellement le plus dangereuse des polluants physiques, c'est pourquoi, tous les rejets sont sévèrement réglementés et contrôlés. (ABH-CZ, 2000)

➤ **Polluants chimiques :**

L'eau par son pouvoir dissolvant élevé dissout les substances rejetées par l'activité humaine. Les polluants chimiques sont nombreux et d'origines diverses : sels minéraux dissous, métaux lourds, pesticides, détergents et hydrocarbures. Les métaux lourds, les pesticides et les détergents constituent les micropolluants.

- **Les sels minéraux dissous** : les plus nocifs sont les composés de l'azote : nitrates (NO_3) et nitrites (NO_2). Ils provoquent des troubles graves chez les jeunes vertébrés par dégradation de l'hémoglobine du sang et production de méthémoglobine toxique et sont les précurseurs de nitrosamines cancérigènes. Ces aspects toxicologiques sont encore très discutés et sujets à polémiques.

Par contre, la responsabilité des nitrates (et des phosphates) dans les phénomènes d'eutrophisation des rivières et eaux littorales est avérée. Ils correspondent à une prolifération importante de végétaux chlorophylliens, qui provoquent la baisse des quantités d'oxygène dissous disponible. (Hennia, 2006)

- **Les sulfates et les chlorures** : Ils sont naturellement présents dans l'eau souterraine (dissolution des sels minéraux des réserves). Les chlorures par leur persistance dans tous les milieux, constituent d'excellents traceurs naturels. Leur teneur maximum dans l'eau potable est fixée à 200 mg/l selon l'O.M.S.

- **Les micropolluants (métaux lourds, pesticides et détergents):** Les micros polluants regroupent des substances toxiques à très faible teneur dans l'eau. Ils sont dangereux même à l'état de traces, car la chaîne alimentaire a un effet cumulatif. Les plus dangereux sont : les cyanures très toxiques, le mercure, le chrome, le plomb, le sélénium, l'arsenic et le cadmium. Leur teneur, à l'état de traces, est sévèrement réglementée, même dans les eaux brutes de rivière utilisées par les stations de traitement.

Les métaux lourds sont principalement retenus pas les particules solides, et donc redistribués spatialement par le ruissellement et l'érosion hydrique, faisant des sols viticoles des sources potentielles de contamination des eaux. (Barbin et al, 2002)

- **Les polluants organiques (micro organiques) :** L'eau souterraine est milieu des micro-organismes, pathogènes ou non. (Hennia, 2006)

Les substances organiques sont éliminées naturellement dans l'eau (DCO) ou grâce aux micro-organismes qui les décomposent pour assurer leur substance (DBO). C'est le processus d'autoépuration. Cette dégradation conduit à des produits minéraux ; gaz carbonique, eau, nitrates, sulfates, phosphores,... etc. (ABH-CZ, 2000)

Pratiquement elle en est dépourvue dans les conditions naturelles. Le pouvoir auto épurateur du sol est très efficace. Un problème particulier est posé par les aquifères karstiques au sein desquels l'autoépuration est faible, voire nulle. (Hennia, 2006)

I-2-2.3 Selon la répartition Géographique :

- On distingue:
- La pollution diffuse
 - La pollution ponctuelle

➤ La pollution diffuse

L'agriculture constitue la première cause des pollutions diffuses des ressources en eau. Lorsque l'on considère les pollutions d'origine agricole, il faut englober à la fois celles qui ont trait aux cultures et à l'élevage. Les activités agricoles sont en particulier largement impliquées dans les apports d'azote et ses dérivés (nitrates et nitrites) que l'on trouve en fortes concentrations dans les engrais, mais aussi dans les lisiers et purins d'élevage. Cependant, certaines pratiques agricoles « normales » peuvent également être source e pollution, par exemple le retournement de sols forestiers ou de prairies naturelles qui peuvent libérer des quantités importantes de nitrates. Le drainage, par la concentration des eaux chargées en fertilisants et en produits phytosanitaires et, localement, leur rejet direct en nappe par des

puisards ou es forages, est également une cause de pollution importante, en premier lieu dans les aquifères fissurés.

➤ La pollution localisée

La contamination des eaux souterraines est dite localisée (ponctuelle) lorsque la source de pollution présente une extension géographique relativement restreinte. Tout entreposage déficient ou toute manipulation inadéquate de substances ou matières présentant un potentiel de contamination peut être à l'origine d'une contamination ponctuelle des eaux souterraines. Elle peut avoir une origine domestique ou industrielle et présenter un caractère chronique ou épisodique (Hennia, 2006).

I-2-2.4 Selon la répartition dans le temps :

Selon la répartition dans le temps on distingue :

- Pollutions permanentes se produisant de façon continue dans le temps
- Pollutions accidentelles se produisant par une erreur humaine (exemple de rupture d'une canalisation transportant une substance polluante)
- Pollutions saisonnières (exemple d'utilisation des engrais azotés dans certaines cultures saisonnières) (Ezziane et Chahma, 2002).

I-2-3 Mécanisme de transport et d'atténuation du polluant en milieu souterrain :

La pollution peut se faire par la surface des affleurements de l'aquifère, aussi bien dans une nappe captive que dans une nappe libre. Mais l'intensité de la pollution, le transport, la vitesse de propagation, la vitesse de destruction de cette pollution dépendent essentiellement de la nature de l'aquifère (Henri et Schoeller, 1975), et le devenir d'un polluant dépend en premier lieu des caractéristiques de l'écoulement qui le transport. (BUIL, 1992)

✚ Dans une nappe libre :

Certaines roches sont suffisamment poreuses ou fissurées pour contenir de l'eau (Blum, 2004). A l'effet de l'infiltration des polluants se produisant à la surface du sol jusqu'au surface de la nappe. Ces aquifères sont généralement composés de deux zones :

- **Une zone non saturée**, comprise entre le sol et la surface de la nappe. De nature très diverse suivant le type de roches concernées, elle conditionne en grande partie le transfert vers la nappe. Suivant que la roche est à perméabilité d'interstices ou de fressures, les circulations seront plus ou moins rapides (ABH-CZ, 2001). Les processus responsables du transport des

polluants dans la zone non saturée sont principalement l'advection, la dispersion mécanique et la diffusion moléculaire liquide. (Ezziane et Chahma, 2002)

- *Une zone saturée* qui constitue l'aquifère. Dans cette zone, les transferts sont essentiellement latéraux (composante horizontale) selon la direction générale d'écoulement dans la nappe. (ABH-CZ, 2001)

Le transfert des polluants dans le sol s'effectue d'abord à travers *la zone non saturée* (ZNS) avant d'atteindre la zone saturée.

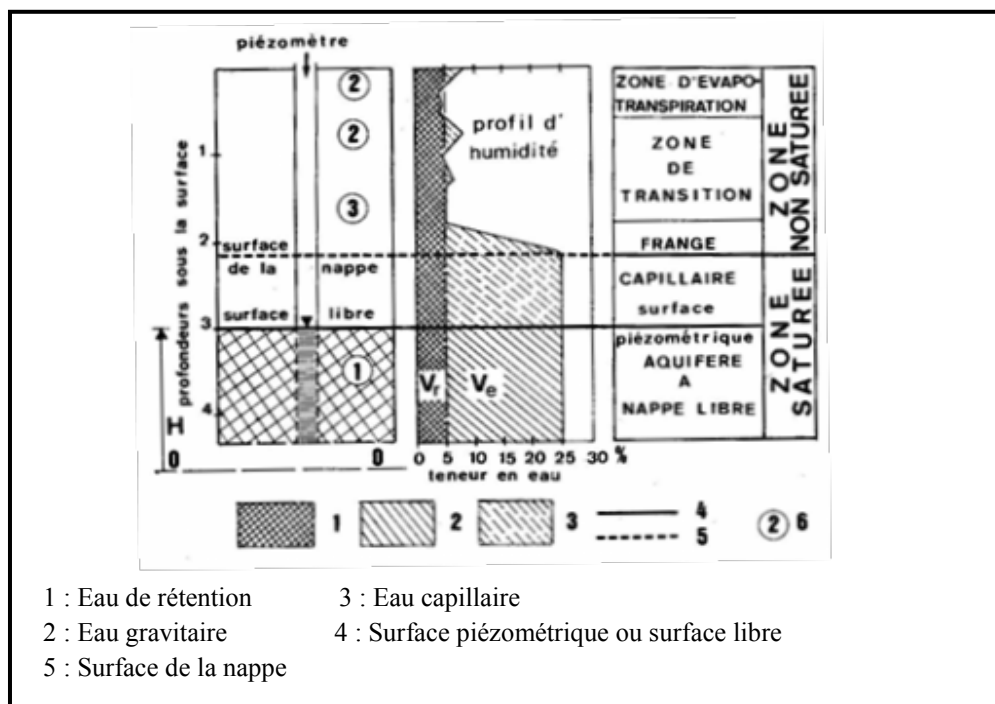


Figure I.2 : Définition de la zone non saturée. (*Hydrogéologie, G. Castany, 2000 in BRGM, 2005*)

✚ Dans une nappe captive :

L'existence d'une roche imperméable recouvrant l'aquifère empêche le transit direct d'un polluant déversé en surface. Le polluant ne peut parvenir que par injection volontaire de déchet liquide par forage, ou par mise en communication des nappes, par des ouvrages non étanches (exemple de fourrages d'eau profonds, ou de pétrole). (Ezziane et Chahma, 2002)

I-2-3-1 Les processus Physiques :

- **La volatilisation :** Elle fait référence au transfert d'une substance de la surface du sol vers l'atmosphère. Dans le contexte des eaux souterraines, la volatilisation ne constitue pas un processus efficace de dissipation si le polluant a migré au-dessous de la surface du sol.

- **Le lessivage :** Le lessivage des composés organiques sera régi en grande partie par les caractéristiques intrinsèques du sol tel que la porosité, le pH, le taux d'humidité et la teneur en argile et en matières organiques, de même que par les conditions météorologiques. En ce qui concerne les conditions climatiques, la durée et l'intensité des précipitations augmenteront ou atténueront la migration du polluant selon l'étendue de la diffusion ascendante (évaporation) relative au flux descendant (lixiviation).

- **L'adsorption :** Les phénomènes d'adsorption et de désorption peuvent retarder efficacement la migration des polluants dans le sol. Les constituants du sol les plus susceptibles d'être impliqués dans le processus sont ceux qui possèdent une grande surface spécifique (cas des argiles) ou encore des sites très réactifs sur lesquels peuvent se fixer diverses substances (cas de la matière organique). Le degré d'adsorption d'un polluant sera fortement relié à sa nature chimique c'est-à-dire à la grosseur de la molécule, sa polarité, la position de ses groupements fonctionnels, etc.

- **La photo-décomposition :** Une molécule de polluant qui est capable d'absorber de l'énergie en provenance du soleil pourra subir un certain nombre de réaction photochimiques entraînant ainsi sa dégradation. Le mécanisme n'est donc actif qu'à la surface du sol.

I-2-3-2 Les processus Biochimiques :

- **Dégradation chimique :** Les réactions chimiques les plus probables dans le milieu souterrain sont les processus d'hydrolyse des polluants qui se produisent habituellement par l'intermédiaire d'acides ou de bases, qui jouent le rôle de catalyseurs.

- **Dégradation par les micro-organismes :** La biodégradation représente le résultat final d'un ensemble de processus dynamiques qui sont impliqués dans la destruction biologique de composés organiques par les micro-organismes contenus dans le milieu souterrain. Les micro-organismes contribuent à l'atténuation du polluant par un ensemble de mécanismes comme la minéralisation, le Co-métabolisme, la détoxification, l'activation et le désamorçage.

- **Dégradation par les plantes :** Lorsque des végétaux sont mis en présence d'un milieu nutritif renfermant une certaine quantité de polluants, on observe une absorption du contaminant par les racines qui se produit assez rapidement. Une fois absorbé, le polluant peut subir des transformations sous l'influence du métabolisme de la plante hôte, ce qui retarde sa migration vers les eaux souterraines. (Hennia, 2006)

I-3 Concept de vulnérabilité :

Le concept de la vulnérabilité d'eaux souterraines a été développé dans les années 60 basé sur le fait que l'environnement assure des degrés variables de protection d'eaux souterraines contre l'infiltration des contaminants dans la sous-surface. C'est contrairement à la disponibilité d'eaux souterraines traçant, qui traite dans des conditions souterraines, parce que le centre des évaluations de vulnérabilité est sur la surface de terre.

La vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine est une notion complexe en raison de nombreux de facteurs qu'elle fait intervenir et de l'importance qui peut être attribué chacun d'eux. En d'autres termes, la vulnérabilité est en fonction des caractéristiques du milieu aquifère, en l'occurrence de la couverture du sol de la zone non saturée qui contrôle la propagation d'une pollution vers la nappe. (Ezziane et Chahma, 2002)

I-3-1 Notion de vulnérabilité :

Ce concept de base a pris une gamme des définitions sur la littérature technique où on rencontre :

Bachmat et Collins (1987) " la vulnérabilité des eaux souterraines " comme sensibilité de sa qualité aux activités anthropiques, qui peuvent prouver nuisible au présent et/ou à l'utilisation-valeur prévue de la ressource.

Foster (1987) définit " la vulnérabilité des eaux souterraines" comme "caractéristiques intrinsèques qui détermineront la sensibilité de diverses parties de l'aquifère à être compromis par une charge imposée de contaminant".

Friesel (1987) définit la vulnérabilité des eaux souterraines comme protectrice ou sa franchise pour se recharger, cela est la perméabilité des couches de couverture pour l'eau.

Le Conseil "Recherche" national des Etats-Unis (1993) a défini la vulnérabilité des eaux souterraines comme "tendance ou probabilité pour que les contaminants de parvenir à une position dans le système d'eaux souterraines, après introduction à un certain endroit au-dessus de la partie supérieure de la plupart de l'aquifère".

Ainsi Civita (1994), la notion de vulnérabilité à la pollution potentielle d'un aquifère est définie comme étant la susceptibilité intrinsèque d'un système aquifère de modifier la qualité et la quantité de l'eau souterraine, dans l'espace et dans le temps, à cause des processus naturels et/ou de l'activité anthropique (Hamza et al, 2004)

La notion de *vulnérabilité* des nappes souterraines à la pollution intègre les différents facteurs physiques et stables déterminant la mesure dans laquelle ces nappes se trouvent, dans les conditions naturelles, plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol. (Albinet et Margat, 1975)

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

La méthodologie proposée ici a la particularité de distinguer la vulnérabilité verticale d'une nappe vis à vis d'une pollution provenant de la surface du sol (basée uniquement sur les paramètres relatifs à la recharge, au sol et à la zone non saturée), de sa vulnérabilité horizontale (ou sensibilité) vis à vis d'une pollution ayant déjà atteint la nappe (basée uniquement sur seuls paramètres de la zone saturée de l'aquifère). (Sinan, 2003)

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 (Schnebelen et *al*, 2002) :

- **la vulnérabilité intrinsèque** est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. Se rapporte à la vulnérabilité déterminée sans considération des attributs et du comportement des contaminants particuliers (NAP, 1993).

- **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 (à notre échelle de travail) alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants éventuels) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis. (Schnebelen et *al*, 2002)

I-3-2 Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :

Les premières cartes de vulnérabilité furent tentées par des chercheurs français au début des années 70 (Albinet et Margat, 1970) et ont largement fait école, y compris dans les autres pays du monde. Elles consistaient à réaliser la synthèse de quelques paramètres ayant une description majeurs dans la vulnérabilité des aquifères. Depuis une vingtaine d'années, plusieurs méthodes ont été proposées et expérimentées, permettant une caractérisation simple et précise de la vulnérabilité. (ABH-CZ, 2000)

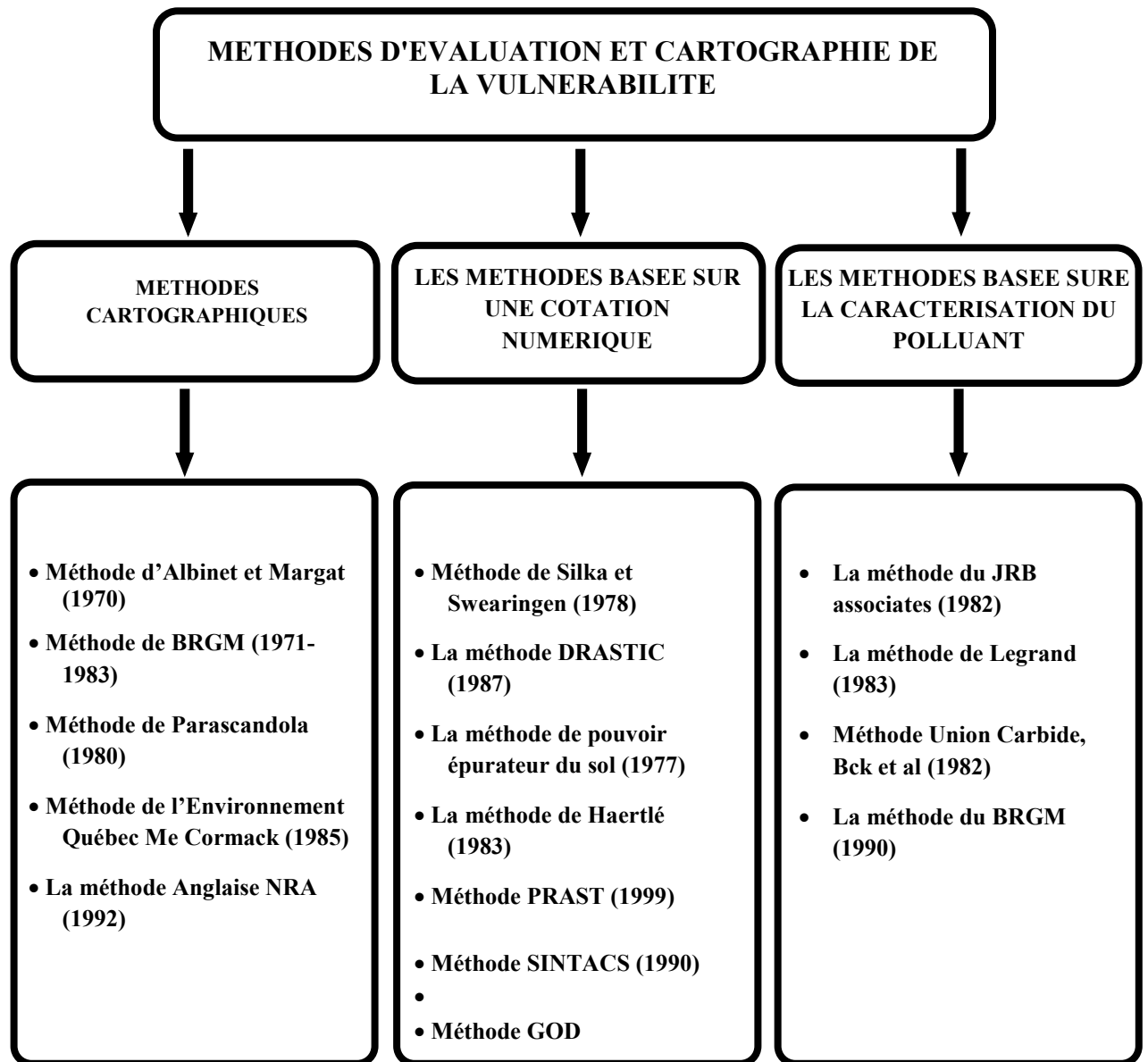


Figure I.3 : Méthodes d'évaluation et cartographie de la vulnérabilité

I-3-2.1 Les méthodes basées sur les documents cartographiques :

L'analyse et l'expression de la vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions ont été des leur débuts inséparable de sa représentation cartographique. La plupart des propriétés jouant un rôle dans les processus de la contamination des eaux sous terraines se prêtant bien a ce type de représentation.

1) Méthode de Albinet et Margat (1970) :

Les grands principes cartographiques proposées consistent à représenter une vue générale des paramètres qui conditionnent la vulnérabilité. Ces paramètres sont la nature géologique du sous-sol, la profondeur de la nappe et le drainage de surface. (ABH-CZ, 2000)

La représentation en classes de la vulnérabilité semble en fait reposer sur une évaluation subjective établie en fonction des connaissances hydrogéologiques des concepteurs.

2) Méthode de BRGM (1971-1983) :

En 1971, Lienhardt et collin reprennent la méthode proposée par Albinet et Margat et l'adoptent dans le but de cartographier la vulnérabilité des nappes d'eau souterraines de la région Lyonnaise (France) à l'échelle du 1/50.000^{ème}.

3) Méthode de Parascandola (1980) :

Cet auteur suppose que la représentation de la vulnérabilité qui tient compte de chaque type de pollution des eaux souterraines à des fins d'intervention sur le milieu demanderait une mise à jour fréquente.

4) Méthode de l'environnement Québec Me Cormack (1985) :

En 1985, le Ministère de l'environnement du Québec a publié deux carets de vulnérabilité de la région de Granby. Les paramètres considérés sont la composition du matériel de surface, la topographie et la perméabilité.

5) La méthode anglaise NRA (National Rivers Authority, 1992) :

La méthode développée par NRA est basé essentiellement sur les caractéristiques de la couche du sol recouvrant le milieu aquifère. Elle tient compte également de la nature du sol, la présence d'une source potentielle de pollution, la nature géologique et l'épaisseur de la zone non saturée. (ABH-CZ, 2000)

I-3-2.2 Les méthodes basées sur un système de cotation numérique :

Les concepteurs de ces méthodes ont portés leur préférence sur une approche analytique et déterministe voulant se garde de toute subjectivité. L'option choisie est une approche synthétique et interprétative visant à estimer un index de vulnérabilité utilisable pour comparer différents sites ou construire une classification.

1) Méthode de Silka et Swearingen (1978) :

La méthode proposée par ces auteurs est simple, peu couteuse et s'échelonne en huit étapes. Le système de cotation développé permet la visualisation rapide des caractéristiques de défense des aquifères, de qualité ainsi que d'utilisation des eaux souterraines. La méthode prend également en considération la nature des contaminants.

2) La méthode DRASTIC (NWWA, 1985) :

La méthode DRASTIC développée en 1985 a été conçue dans le but d'offrir une base pour l'évaluation comparative de certaines régions en regard du potentiel de pollution des eaux souterraines. Elle a été appliquée et expérimentée sur douze bassins hydrogéologiques différents des Etats Unis d'Amérique.

Les auteurs de cette méthode emploient sept paramètres hydrogéologiques et physiographiques considérés comme importants dans les mécanismes de défense mis à la disposition du système aquifère contre une éventuelle pollution déversée en surface. Ces paramètres sont : la profondeur de la nappe, la recharge nette, les matériaux de l'aquifère, les matériaux du sol, la topographie, l'impact de la zone vadose, la conductivité hydraulique de l'aquifère. (Boudjeltia, 2000)

3) La méthode de pouvoir épurateur du sol (Rehse, 1977) :

Le pouvoir épurateur du sol, puis celui de la zone non saturée, est important pour éviter la propagation d'une pollution en direction des nappes.

La méthode proposée par Rehse (1977) tient compte de divers mécanismes qui sont étroitement liés. Ce sont les processus physiques, mécaniques et biochimiques qui agissent sur le transport des bactéries, sur la dégradation des composés organiques et chimiques qui interfèrent sur le transfert des solutés.

4) La méthode de Haertlé (1983) :

Deux principaux paramètres sont à la base de cette méthode : la perméabilité et l'épaisseur des couches de la zone insaturée.

5) Nouvelle méthode ou méthode PRAST (SAID R.1999) :

Bien que très efficace et simple d'utilisation, la méthode DRASTIC nécessite pour une application intégrale, des informations d'origine diverses nécessaires à l'évaluation des paramètres retenus. C'est pourquoi, nous proposons de remplacer les trois paramètres DRASTIC à savoir : la profondeur de la nappe D, la conductivité hydraulique C et la nature de la zone non saturée par un seul paramètre relatif au pouvoir épurateur verticale P du sous sol défini par Rehse (1977). (ABH-CZ, 2000)

6) La méthode SINTACS :

Elle est dérivée de la méthode DRASTIC, développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Petelet G *et al*, 2000).

Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC.

7) La méthode GOD :

Ce système a été développé par Foster en 1987, il est présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturé et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée.

Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

- Type de nappe (Groundwater occurrence).
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ;
- Profondeur de la nappe (Depth to groundwater table).

Les éléments nécessaires pour le schéma de protection des eaux souterraines et pour la classification de la vulnérabilité des aquifères sont, selon cette méthode : le type de sol, les formations géologiques de la zone non saturée et la profondeur de la nappe. Contrairement à DRASTIC, les paramètres ne subissent aucune pondération.

I-3-2.3 les méthodes fondées sur la caractérisation des rejets :

Constatant la multiplication du nombre des aménagements à risque de pollution comme les dépotoirs, les remblais de mines, les réservoirs supposés étanches....etc, les chercheurs

américains ont mis au point des méthodes d'évaluation spécifique qui permettent la caractérisation des aquifères localisés sous des sites de rejets.

1) La méthode du JRB Associates (1982) :

Cette méthode, mise au point en 1982 par la société JRB, rend compte des quatre paramètres suivants :

- les facteurs récepteurs (distance d'un point d'utilité, population,...etc.)
- les sites aquifères (profondeur de la nappe, perméabilité)
- les caractéristiques des rejets (toxicité, persistance,...etc.)
- les modes d'aménagement (quantité de rejets, superficie,...etc.)

2) La méthode de Legrand (1983) :

Cette méthode, validée uniquement pour les nappes libres, vise la classification relative des régions affectées par les dépotoirs et les sites d'enfouissement sanitaires. Les paramètres retenus sont la distance des points d'utilisation, la profondeur de la nappe, le gradient hydraulique, la perméabilité et l'adsorption. Chaque paramètre est assigné d'une cote qu'on additionne pour évaluer le degré de vulnérabilité.

3) Union Carbide, Bck et al (1982) :

Afin d'évaluer la lixiviation potentielle des insecticides utilisées dans la culture du tabac et de la pomme de terre dans leur transit du sol jusqu'à la nappe, la compagnie Union Carbide a mis au point une méthode basée sur un système de cotation numérique des paramètres suivantes : facteur d'application de pesticide, conditions de dégradation des pesticides, condition de transfert et la profondeur de la nappe.

4) La méthode du BRGM (1990) :

L'auteur fait emploi des formules de pondération des paramètres du sol qui constitue la première barrière et souvent la plus efficace pour s'opposer au transfert des polluants vers la profondeur.

Ces formules font intervenir les paramètres qui entrent en exercice dans les processus (physique, chimique et biologique) d'atténuation des polluants. Ces paramètres sont choisis en fonction de la nature de substance contaminant. (ABH-CZ, 2000)

CHAPITRE II

PRESENTATION DU MILIEU

PHYSIQUE

II-1 Situation géographique de la zone d'étude

La région du Moyen-Chélif est située au Nord - Ouest de l'Algérie ; elle fait partie du bassin versant du Chélif et occupe sa partie centrale. Ce même bassin constitue un sous bassin, il est le plus important, du grand bassin versant "Chélif-ZAHREZ". La vallée du Chélif occupe la partie Nord du bassin versant Chélif-ZAHREZ et elle est drainée par l'Oued Chlef qui la traverse sur une longueur de 750 km pour déverser dans la méditerranée près de la région de Mostaganem. Elle est divisée en trois grandes plaines : La plaine du "Haut- Chélif", la plaine du "Moyen-Chélif" et la plaine du "Bas-Chélif".

La plaine du Moyen-Chélif occidental, objet de notre étude, se situe au centre du bassin du Chélif (Nord - Ouest de l'Algérie), à environ 200 km à l'Ouest d'Alger. (Bradai, 2006)

La zone d'étude couvre la vallée du Cheliff, depuis 11 Km de l'amont d'Oum Drou, jusqu'à 10 km en aval de Boukadir. Elle s'étend dans la partie centrale jusqu'à Ouled Farés dans la vallée de l'affluent dit Oued Ouahrane. La partie se trouvant au Sud et longeant la RN n°4 à 2 Km environ est également incluse dans la présente étude.

La zone d'étude occupe un territoire de 321 km² dans le bassin du moyen Cheliff occidental qui est formé par trois sous bassins versants codés respectivement (0122, 0123 et 0124). (Hennia, 2006), les principales caractéristiques de ces bassins figurent dans le tableau ci-après.

Tableau II-1 Principales Caractéristiques des 03 sous bassins versants de l'aire d'étude
(ABH – CZ, 2003)

| Code bassin | Nom sous bassin | Superficie (Km ²) | Périmètre (Km) | Classe de Relief |
|-------------|------------------------|-------------------------------|----------------|------------------|
| 0122 | Oued Ras Ouahrane | 1437 | 224 | Assez fort |
| 0123 | Oued Sly | 1405 | 225 | Fort |
| 0124 | Oued Cheliff Ouarizane | 565 | 122 | Assez fort |

- Les cartes suivantes illustrent le périmètre d'étude dans son ensemble.

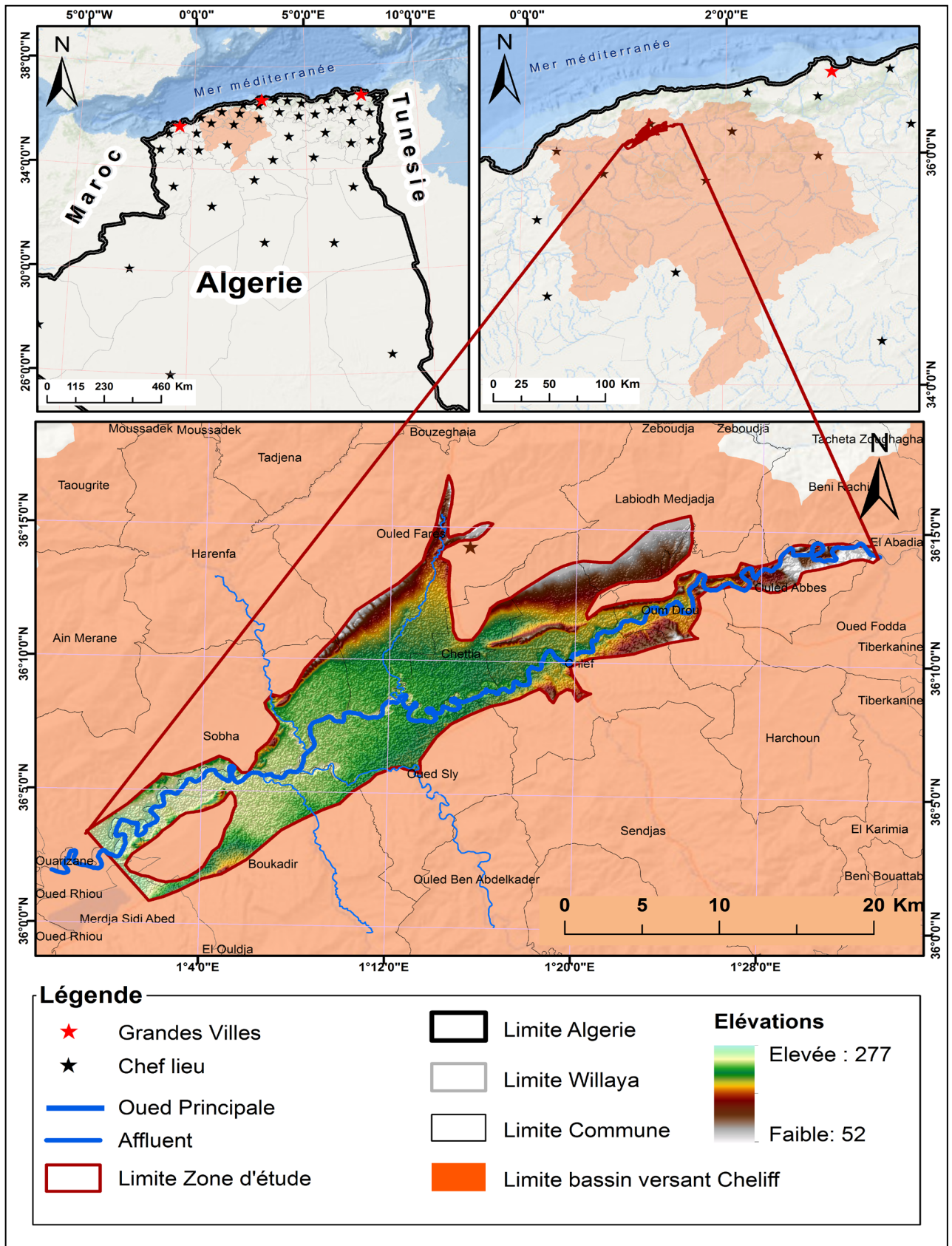


Figure II.1: Situation géographique de la zone d'étude

II-2 Hydrographie :

L'oued Cheliff traverse la totalité de la zone d'étude, il longe les communes suivantes : Oum Droua, Chlef, Chettia, Ouled farés, oued Sly, Sobha, Boukader, sur une longueur de 58 Km.

La plaine du Moyen-Cheliff occidental comprend les bassins collecteurs des Oueds suivants :

- Sur la rive droite : - l'Oued Ras ;
- l'Oued Ouahran.

Deux affluents situés sur la rive droite et issus des monts de Dahra

- Sur la rive gauche : - l'Oued Tsighaout ;
- l'Oued Sly.

Affluents sur la rive gauche. Ils ont des bassins versants plus étendus, dont la partie supérieure est formée par les reliefs montagneux de l'Ouarsenis.

L'oued Cheliff à un régime d'écoulement presque permanent par contre ces affluents le sont en hiver (décembre – janvier – février) ; la grande partie de l'année ils sont secs.

II-3 Le climat :

La wilaya de Chlef est une zone au climat méditerranéen. C'est un climat relativement froid en hiver et chaud en été, où les températures moyennes sont de l'ordre de 17°C avec une moyenne des minima de l'ordre de 10°C et une moyenne des maxima d'environ 30°C. Les plaines du Chélif, en général, ont un climat spécial, de type continental semi - aride, célèbre par sa dureté, malgré la proximité de la mer (50 km en moyenne).

3-1 Les précipitations

Pour l'élaboration de la carte figure 09 par l'ABH-CZ: Les précipitations sont mesurées à travers un réseau pluviométrique constitué de 26 postes, disposant de plus de 30 années de relevés.

Les pluies moyennes annuelles sont comprises, dans l'ensemble de la wilaya, entre 300 et 500mm. Des pluies moyennes annuelles supérieures à 500 mm sont enregistrées dans les postes situés au Nord et au Sud de la région (Sidi Akacha : 554,3mm et Saaidia : 536mm).

Les précipitations dans le Moyen-Chélif occidental sont très irrégulières dans le temps et dans l'espace. On distingue une diminution de précipitation d'Est en Ouest et du Nord au Sud.

De la carte figure 09 on peut bien distinguer que notre zone d'étude est situé dans la partie où les précipitations sont les plus faible compris entre 150 et 200 mm dans les zones les plus arrosés.

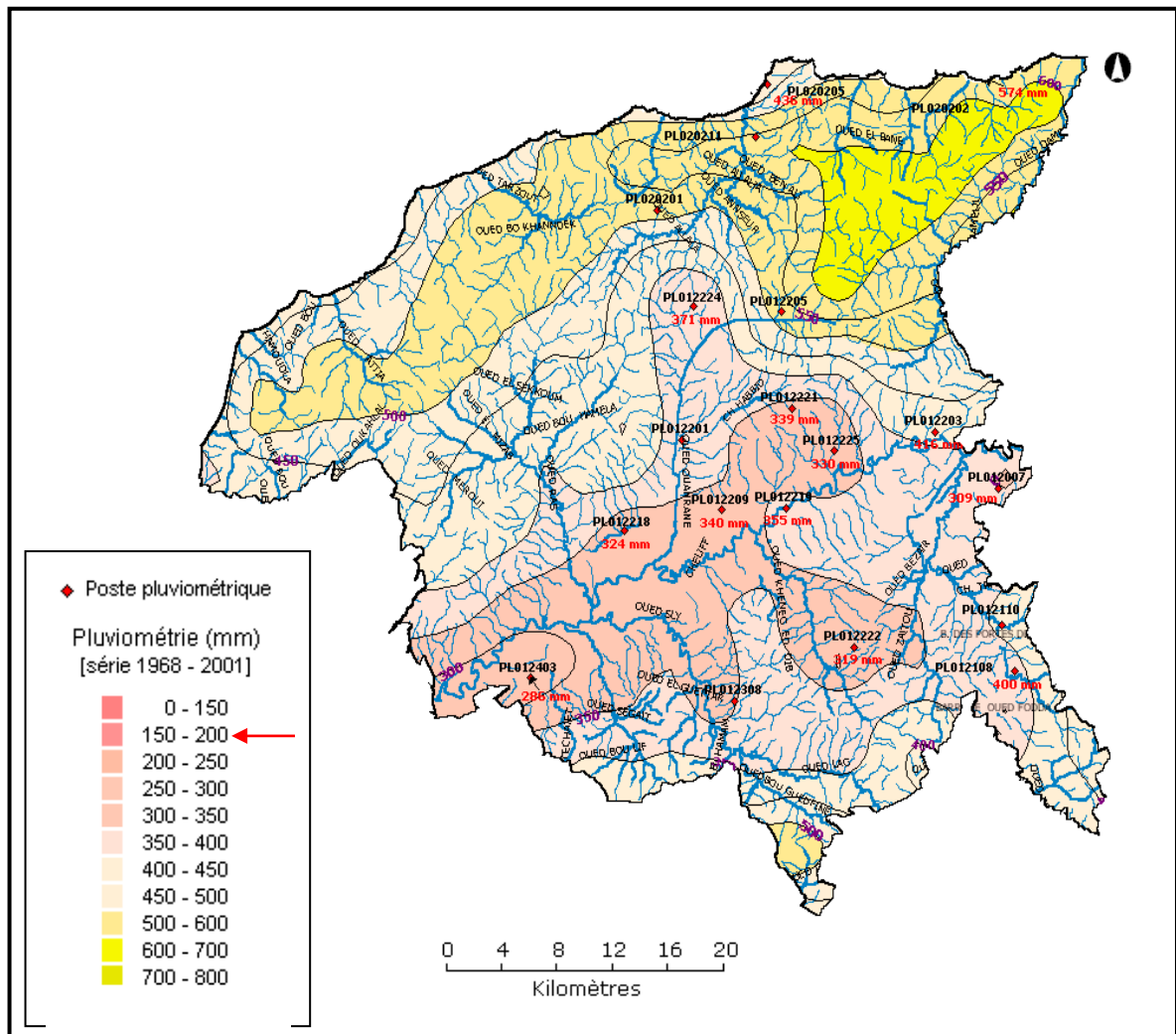


Figure II.2 : Carte pluviométrique de la région de Chlef (ABH-CZ, 2003)

3-2 Evapotranspiration :

L'exploitation de la carte d'évapotranspiration potentielle de la région de Chlef, extraite à partir de la carte d'évapotranspiration du Nord d'Algérie établie par les services de l'ANRH sur la base des données de 45 stations climatologiques et de 142 postes thermométriques, a permis de conclure que l'évapotranspiration se positionne en parfaite opposition à la

pluviométrie; les valeurs de l'évapotranspiration sont comprise entre 1200 et 1600 mm, avec un maximum de l'ordre de 1550 mm dans la vallée du Cheliff, et un minimum de 1250 mm enregistré dans les bassins du Côtier.

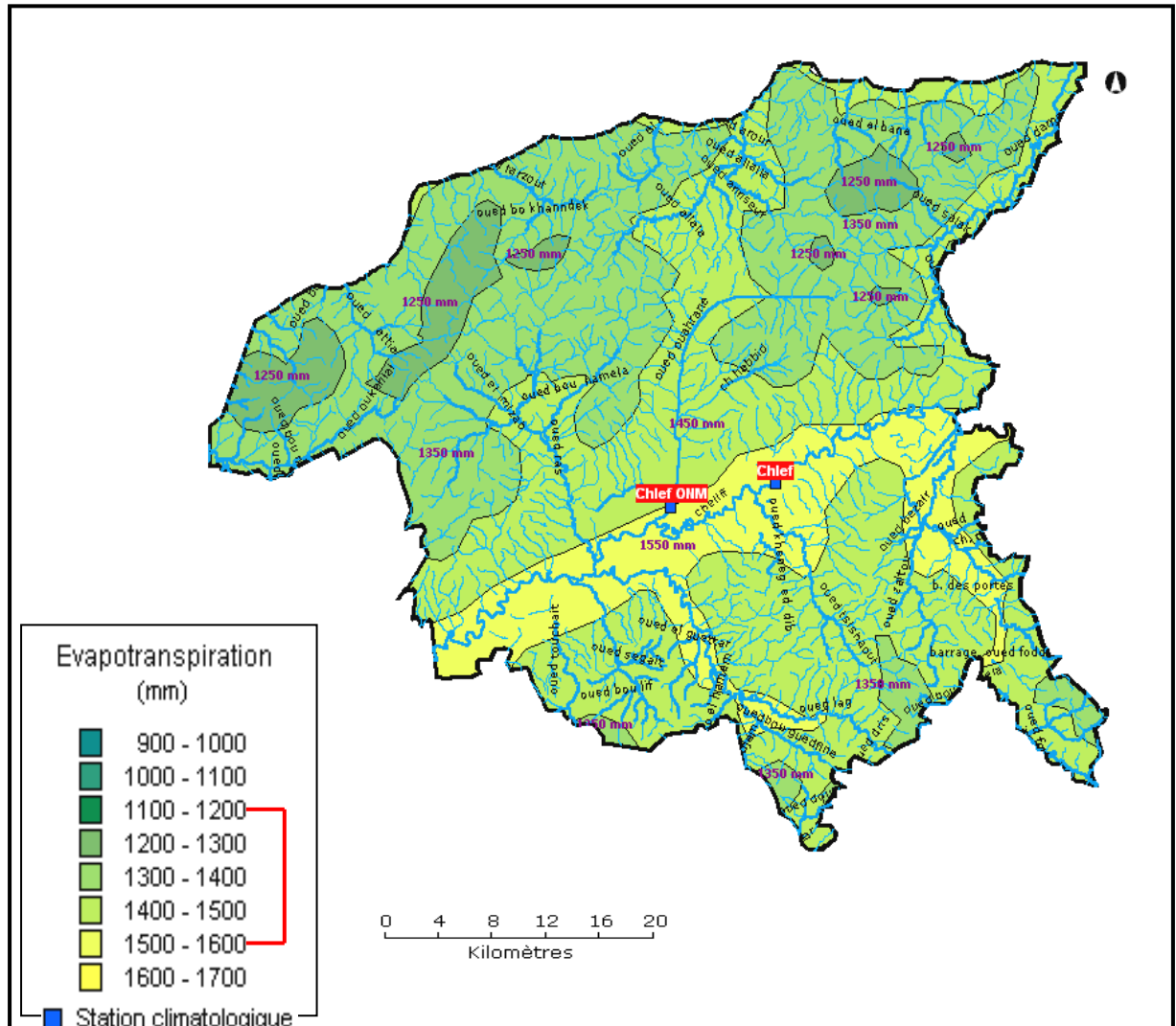


Figure II.3 : Carte d'évapotranspiration de la région de Chlef (ABH-CZ, 2003)

D'après la carte de la figure 10 on peut bien distinguer que notre zone d'étude vis à vis l'évapotranspiration est découpée en deux une partie Nord avec une évapotranspiration comprise entre 1200 à 1400 mm, et une partie Sud caractérisée par une évapotranspiration peu élevé comprise entre 1400 à 1600 mm.

3-3 Température :

Les relevés des températures pour une période allant de 1981/1982 à 2003/2004 relatives à la station de Mouafkia (Nord de la ville de Chlef), appartenant à l'ONM – Chlef, donne une

moyenne annuelle qui avoisine les +20°C, mais il existe un écart considérable (plus de +20°C) entre le mois le plus chaud qui est juillet (+39,2°C) et celle du mois le plus froid, janvier (+10,5°C). Les températures extrêmes (mini et maxi) présentent elles aussi, un éventail beaucoup plus large comme le montre le tableau suivant (tableau n°5).

Tableau II.2 : Température moyenne mensuelle et pluie mensuelle (période 1981/1982) à (2003/2004) de la station de Mouafkia. (*Source : ONM –Chlef*)

| | Sep. | Oct. | Nov. | Dec. | Jan. | Fev. | Mar. | Avr. | Mai | Juin | Juil | Août |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T min (°C) | +20 | +15,5 | +15 | +7,5 | +5,9 | +6,5 | +8,0 | +10,3 | +14,4 | +19,3 | +22,2 | +22,5 |
| T max (°C) | +34,1 | +28,2 | +21,3 | +17,1 | +16,0 | +18,1 | +21,4 | +24,2 | +28,8 | +35,4 | +30,6 | +30,1 |
| T moy (°C) | +26,4 | +21,2 | +15,7 | 11,9 | +10,5 | +11,8 | +14,3 | +17,0 | +21,5 | +27,2 | +39,2 | +38,4 |
| P (mm) | 17,59 | 35,89 | 54,82 | 47,03 | 42,78 | 44,09 | 38,62 | 35,52 | 26,66 | 6,28 | 2,44 | 4,14 |

Les paramètres, température, précipitation et évapotranspiration nous donne une idée sur les paramètres utilisés dans la méthode SINTACS (Recharge de la nappe, type de sol) pour estimé les indices partiels de vulnérabilité.

II-4 Géologie

III-4-1 Structure et Lithostratigraphie

La structure profonde de la plaine est considérée comme étant un synclinorium. Sur ce synclinorium reposent les principales structures suivantes :

- Le synclinal d'Ouled Farés.
- L'anticlinal de Médjadja.
- Le synclinal de Mouafkia
- L'anticlinal des Monts rouges.

Toutes ces structures se prolongent sous la plaine du Cheliff où s'y ennoient.

La morphologie du bassin du moyen Cheliff est étroitement liée à son histoire géologique depuis le tertiaire jusqu'à nos jours et qui peut être résumée comme suit :

1) Miocène inférieur :

Les terrains du miocène inférieur comportent à la base des grès associés à des conglomérats ou des poudingues surmontés par une série marneuse. Cet ensemble affleure

sous les calcaires récifaux du miocène supérieur dans les premiers contreforts de l'Ouarsenis dans le bassin d'Echeliff – Boukadir.

2) Miocène supérieur :

On distingue des calcaires récifaux à algues (de l'ordre des Lithothamniées) qui plongent sous la plaine, leur limite nord présumée ne dépasse pas l'aplomb de l'Oued Cheliff.

Le miocène supérieur est constitué également par des marnes gypseuses et des gypses massifs qui affleurent dans l'anticlinal, au nord du synclinal d'Ouled Farés.

3) Pliocène :

On distingue le pliocène marin (Plaisancien-Astien) et le pliocène continental

➤ **Pliocène marin (Pliocène inférieur) :** Il comporte :

- Des calcaires récifaux de même type que ceux du miocène supérieur mais moins légèrement développés qui affleurent à l'ouest d'Oued Ras.

- Des grès : le Plaisancien de base qui affleure largement partout au nord de la plaine.

- Des marnes, lesquelles caractérisent un milieu néritique assez profond.

Ce pliocène marin constitue l'essentiel du synclinal de Mouafkia (au nord d'Echeliff).

➤ **Pliocène continental :** Il comporte :

- Des argiles avec de rares bancs de grès grossiers sur le côté ouest de la plaine.

- Des grès et limons à Hélix ; les grès grossiers à galets dominent à l'est ; sables, limons, marnes sableuses dominent au centre du bassin d'Echellif ; sables et grès dominent à l'ouest.

L'épaisseur du pliocène marin a été estimée à 100 m dans le synclinal de Mouafkia et les grès astiens de la partie supérieure de l'ordre de 50 mètre.

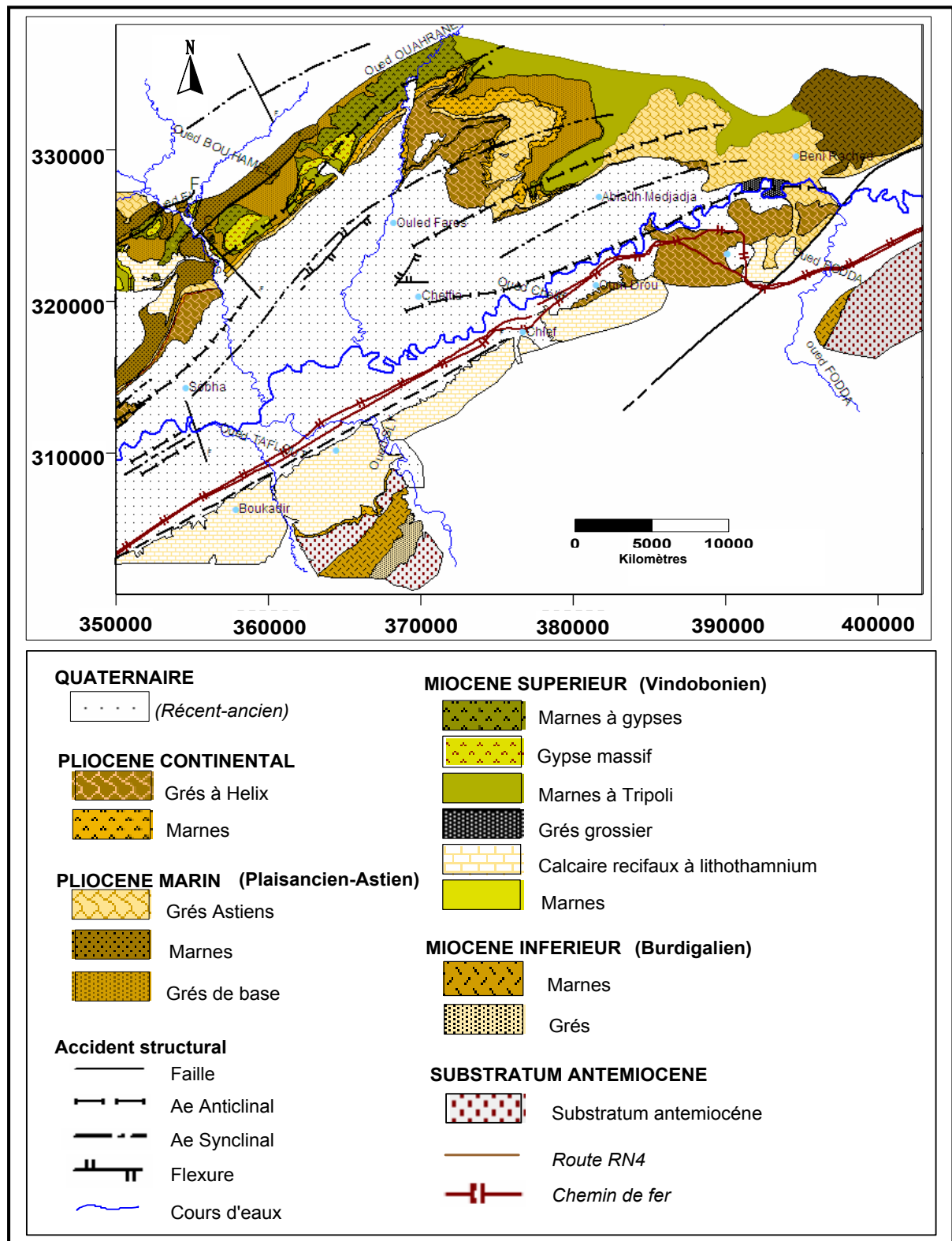


Figure II.4 : Carte géologique du Moyen Cheliff occidental d'après Scet-Agri ; 1985 (Elmeddahi, 2008)

4) Le Quaternaire

Les dépôts quaternaires sont continentaux, ils sont prédominants dans la plaine de Mouafkia et la dépression de Chlef-Oum Drou où ils affleurent largement.

On distingue un quaternaire ancien et un quaternaire récent.

- **Le Quaternaire ancien** est constitué par des alluvions grossières essentiellement conglomératiques intercalées de quelques lentilles argileuses. Il affleure sur les Medjadjas, les montagnes rouges et la bordure Sud de la dépression Chlef - Oum Drou. L'épaisseur de ces dépôts est en moyenne de 100 m mais, ils peuvent atteindre des épaisseurs plus grandes, au synclinal de Boukadir et d'Ouled Farés il peut atteindre environ 200 m.

- **Le Quaternaire récent** correspond à des alluvions dont la prédominance des éléments fins (limons) le caractérise, son épaisseur atteint 70 m dans la plaine de Mouafkia. Les limons bruns à rougeâtre, les limons gris et les alluvions actuelles formés de limons, de sables, de galets et de cailloutis occupent le fond des talwegs et les zones de confluence des oueds. (Elmeddahi, 2008)

II-4-2 Hydrogéologie :

L'étude géologique, l'analyse lithostratigraphique et la structure du bassin nous ont permis de distinguer les terrains susceptibles de constituer les aquifères suivants :

- Les calcaires miocènes à lithothamnium.
- Les grès et marnes de base Miocène inférieur, Miocène supérieur, Pliocène marin et continental.
- Les alluvions quaternaires.


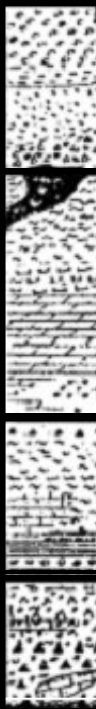
| ERE SYST | | ETAGES | DESCRIPTION | LITH | EPAI | |
|-----------------|------------|---|---|--|---|----------|
| | QUATERN | Récent | Alluvions à éléments fins |  | 10 | |
| | | Moyen | Alluvions grossières (galets et graviers) | | à | |
| | | Ancien | Grès et conglomérants. Limons grisés de base. | | 120m | |
| CENOZOIQUE | PLIOCENE | Villafranchien | Série rouge. Grès et sable rouge parfois argileux. |  | 20 | |
| | | Astien Plaisancien | Grès marin Série détritiques de base. | | à 200m | |
| | MIOCENE | Messinien Tortonien | Gypses Marnes bleues très épaisses Tripolis et marnes à tripolis | | 120 à | |
| | | Serravallien Langhien | Calcaires à lithothamniées Séries détritiques et grès de base | | 1200m | |
| | | Burdigalien Aquitainien | Séries conglomératiques sableuses Séries marneuses noires Calcaires gréseux Schistes à passage conglomératiques | | 150 à 700m | |
| | PALEOG | Eocène | Marnes bitumineuses foncées Argiles à lumachelles et marnes gypsifères Marnes bitumineuses à lentilles de calcaires | | 400m | |
| | MESOZOIQUE | CRETACE | SUP | | Marnes et calcaire argileux Marnes argileux Schistes argilo-marneuses | 400m |
| | | | Aptien | | Calcaires argileux parfois gréseux Calcaires marneux | 100 à |
| | | | Barrémien | | Marnes grises très épaisses | 1400m |
| | | | Néocomien | | Argiles gréseuses avec des quartzirétiques | |
| JURASSI- QUE | | Malm | Marno-calcaires Marnes compactes (Oxfordien) | 300 | | |
| | | Dogger Lias | Calcaires microcristallins/siltstones noduleux Calcaires dolométriques | à 700m | | |
| Trias | | Gypses, cargneules, dolomies, argilites, et marnes barriolées | | | | |
| PALEOZOIQUE | | | Socle métamorphisé... | | | |

Figure II.5 : La stratigraphie synthétique du moyen-Chélif occidental d'après Mattauer (1958)

1) La nappe alluviale :

Une nappe libre à multicouches avec un ou deux aquifères profonds plus productifs, constituée essentiellement d'alluvions (galets et gravier) ; sa recharge potentielle annuelle est de 12 hm.³

2) La nappe des grés et sable du Pliocène marin :

Elle présente un système aquifère à nappe libre ou captive. Sa partie libre est alimentée par le déversement de diverses sources situées dans les collines bordant la plaine du côté nord. C'est une réserve sa potentialité en eaux est estimée à 3Hm³/an seulement.

3) La nappe du calcaire Lithothaminium :

Bordée entre la nappe quaternaire au nord et le massif de l'Ouarsenis au sud, la nappe calcaire est considérée comme une réserve importante. Elle est à surface libre, à structure tabulaire ou plissée et/ou fracturée. La recharge potentielle annuelle est semblable à celle de la nappe alluviale 12Hm³/an (ABH-CZ, 2000).

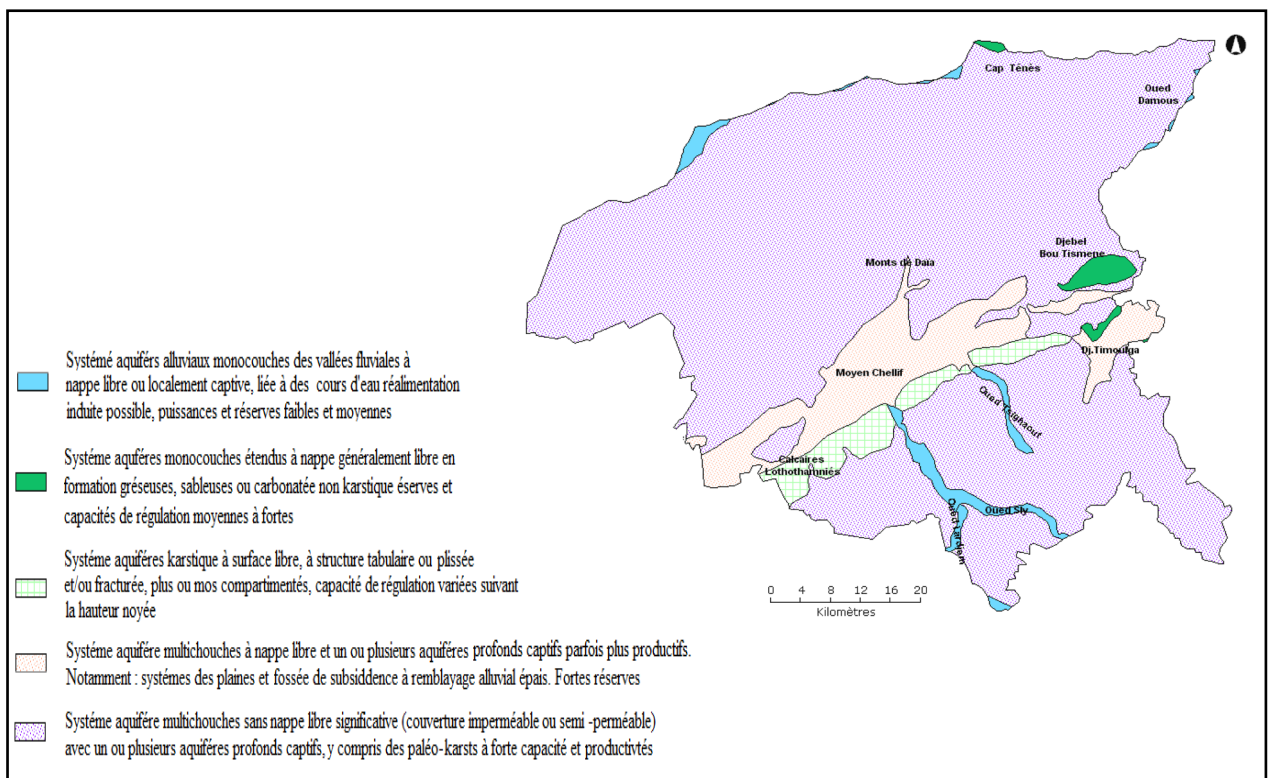


Figure II.6 : Les principales unités hydrogéologiques de la région de Chlef (ABH-CZ ,2003)

II-4-3 Choix de l'aquifère étudié

Parmi les trois principaux aquifères (miocène calcaire, pliocène marin et quaternaire) cités précédemment, nous avons choisi la nappe alluviale du quaternaire pour les raisons suivantes :

- Elle représente une ressource souterraine importante car elle mobilise 48 % des besoins en eau potable de la région de Chlef avec un volume d'eau totale exploité en 2002 par exemple estimé de 20906 Hm³ (ABH- CZ, 2004);
- Elle regroupe un nombre important de sources de pollution qui causent la dégradation qualitative de ces eaux ;
- Le réseau d'implantation y est très dense ; nous comptons quatorze (14) forages et soixante et un (61) puits qui font objet de suivis piézométrique et hydro chimique annuels par l'ANRH et l'ABH-CZ avec un volume d'eau totale exploité en 2002 par exemple estimé de 20906 Hm³ (ABH-CZ, 2004) .

• Identification de la nappe étudiée

La nappe alluviale du moyen Cheliff occidental est séparée de celle de l'orientale, en amont, par le seuil d'Oum Drou, et à l'aval par le seuil de Boukadir. Elle est limitée au Nord par les monts de Dahra et au Sud par le massif de l'Ouarsenis.

Cette nappe couvre une superficie de 321 Km² environ et un périmètre de 199 Km. Elle est couverte par les limons qui s'étendent sur toute la plaine et sur la bordure Sud du lit actuel. En profondeur, par contre, se trouvent les alluvions grossières en plusieurs horizons .Elle sont bien développées dans l'axe Nord du Synclinal entre Ouled Farés et Sobha et dans la plaine de Mouafkia.

Tableau II.3: Volume d'eau prélevé de la nappe alluviale pour l'année 2004 (ABH - CZ)

| Usage | Volume prélevé (en Hm ³) pour l'année 2004 |
|--------------|--|
| Domestique | 10.00 |
| Agricole | 4.75 |
| Industriel | 0.74 |
| Total | 15.49 |

CHAPITRE III

MATÉRIELS ET MÉTHODES

III-1 Aspect théorique et pratique de la méthode SINTACS

III-1-1 Présentation :

La méthode SINTACS est la version italienne de la méthode DRASTIC c'est une méthode mieux adaptée aux conditions méditerranéennes. Cette méthode prend en considération les mêmes paramètres que la méthode DRASTIC avec des poids et des cotes différentes. L'acronyme SINTACS correspond aux initiales des sept facteurs suivants :

la profondeur du plan d'eau (**S** = Soggiacenza), la recharge efficace de l'aquifère (**I**=infiltrazione), l'effet de 'autoépuration de la zone vadose (**N** = effeto di autoepurazione del non-saturo), le type de sol (**T** = tipologia della copertura), les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère (**A** = caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero), la conductivité hydraulique de l'aquifère (**C** = conductibilità dell'acquifero) et la pente topographique (**S** = l'acclivita della superficie topografica) (Civita, 1994).

L'index final résultant de cette méthode est divisé sous forme de pourcentage puis d'intervalles définis sur la base de 500 tests. Ces intervalles sont regroupés en six classes de vulnérabilité.

SINTACS utilise donc les sept mêmes paramètres que **DRASTIC** mais est plus flexible au niveau du système d'indexation et de pondération.

La spécificité de cette méthode consiste au fait qu'elle propose cinq scénarios différents :

- Scénario « Impact Normal » : scénario relatif aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés avec une profondeur de la nappe qui n'est pas très élevée, localisés dans des aires à sols épais. Les zones relatives à ce scénario correspondent aux régions stables, de point de vue occupation des sols, avec existence ou non de terres cultivées, une utilisation faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et des périmètres urbains très dispersés.
- Scénario « Impact Sévère » : correspond aux mêmes types d'aquifères soumis à une occupation des sols intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, des implantations industrielles et urbaines denses, et des dépôts liquides et solides de déchets.
- Scénario « Drainage important à partir d'un réseau superficiel » : scénario relatif aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau.
- Scénario « Terrain très karstifié ».
- Scénario « Terrain fissuré ».

La méthode SINTACS est une méthode d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle des aquifères par systèmes paramétriques ; le principe commun de ces systèmes

consiste à sélectionner préalablement les paramètres sur lesquels se base l'évaluation de la vulnérabilité. (Hamza et al, 2004)

La méthode proposée repose sur les hypothèses de base suivantes :

- Le contaminant (Les sources potentielles de contamination) est présenté sur la surface au sol ;
- Le contaminant (Les sources potentielles de contamination) atteint la couche aquifère par le mécanisme d'infiltration ;
- Le polluant à la même mobilité comparé à la mobilité des eaux souterraines ;
- L'unité hydrogéologique considérée (zone d'étude) est de 40 hectares plus grands qu'extérieurs. (SCCGI, 2005)

Les poids attribués aux différents paramètres dans les différentes versions SINTACS sont présentés dans le (Tab.01). Quatre classes de vulnérabilité peuvent être identifiées selon les valeurs des indices de vulnérabilité (Tab.02).

Tableau III.1 : Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode (Civita et De Maio, 2004).

| Scénarios Paramètres | Impact Normal | Impact Sévère | Drainage Important | Karst | Terrains Fissurés |
|-------------------------|---------------|---------------|--------------------|----------|-------------------|
| S | 5 | 5 | 4 | 2 | 3 |
| I | 4 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| N | 5 | 4 | 4 | 1 | 3 |
| T | 4 | 5 | 2 | 3 | 4 |
| A | 3 | 3 | 5 | 5 | 4 |
| C | 3 | 2 | 5 | 5 | 5 |
| S | 2 | 2 | 2 | 5 | 4 |

Tableau III.2 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SINTACS
(Kaplej et al, 2013).

| Degré de vulnérabilité | Indice de vulnérabilité |
|------------------------|-------------------------|
| Très Faible | 26-80 |
| Faible | 80-105 |
| Moyenne | 105-140 |
| Haute | 140-186 |
| Très Haute | 186-210 |
| Extrême | 210-260 |

Les couches utilisées pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination ont été converties à partir du vecteur (thèmes d'entités polygonales) au format raster. Les huit paramètres critiques du modèle SINTACS-modifié (Normal), à savoir, la profondeur des eaux souterraines, la recharge efficace, les caractéristiques de l'aquifère, les types du sol, la topographie, l'impact de la zone vadose, conductivité hydraulique et le taux d'infiltration ainsi que l'utilisation des sols ont été spatialement analysés en utilisant des techniques de reclassement et en attribuant des poids et des notes. Dans cette étude, chaque couche de données a été reclassée dans une échelle commune de son potentiel de contaminer la qualité des eaux souterraines.

Le modèle SINTACS n'a pas été conçu pour une utilisation dans les SIG, même si elle a été révélée que ce genre de tentatives peut fournir divers substantielle avantages (Merchant, 1994).

L'outil d'analyse spatiale disponible dans ArcGIS 10.2 a été utilisé pour développer les couches de données pour les composants du modèle SINTACS. La performance d'ArcGIS sur l'analyse et l'indexation des techniques rasters de recouvrement ont été appliquées pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sur la zone d'étude. Les zones souterraines de vulnérabilité ont ensuite été croisées validés avec les résultats de la qualité des eaux souterraines pour l'eau potable et des normes agricoles pour connaître leur pertinence (Rutharvel et al, 2015).

III-1-2 Description des paramètres SINTACS

1- Profondeur de l'eau(S)

C'est un paramètre déterminant dans le contrôle du transfert et de l'atténuation du polluant dans la zone non saturée. Les nappes d'eau situées à grande profondeur offrent une protection élevée et imposent un retard important des polluants.

Dans le cas d'une nappe libre, la profondeur de l'eau représente la portion du sol entre la limite de la couche végétale et la surface libre de la nappe.

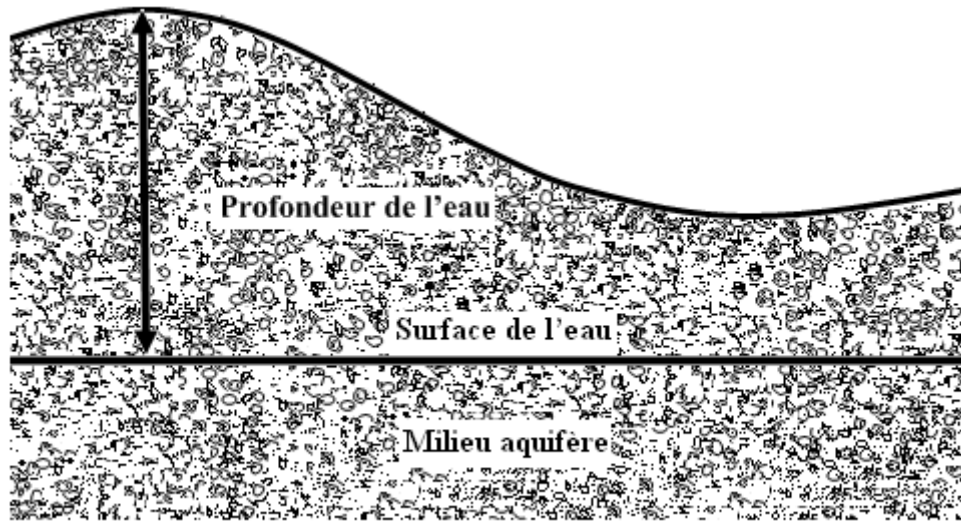


Figure III.1 : Détermination de la profondeur de l'eau (s) dans le cas d'une nappe libre (d'après Aller et *al*, 1987 in Boujaltia, 2000)

Pour le cas d'une nappe captive, présentant une protection naturelle vis-à-vis de la pénétration du polluant, la profondeur de l'eau représente la tranche de sol entre la couche végétale et le substratum inférieur de l'aquifère et non pas la surface libre de l'eau car cette dernière est très variable à cause des fortes fluctuations de la pression.

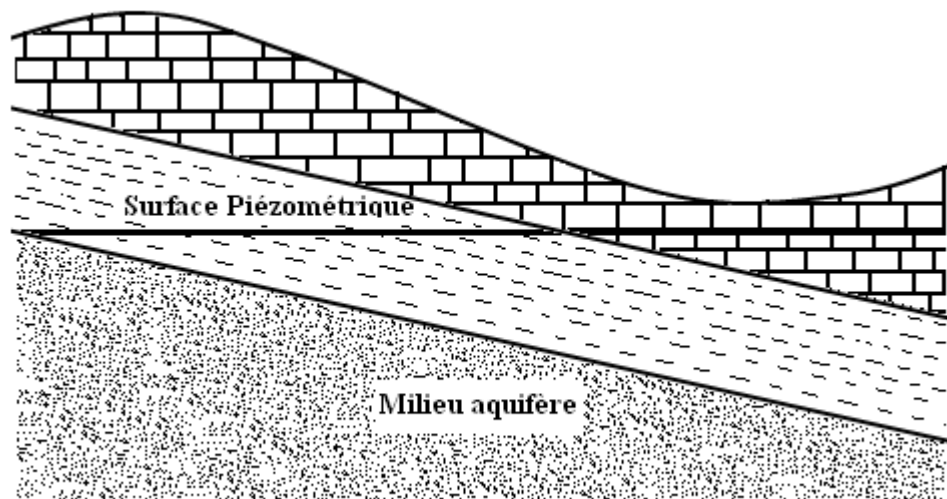


Figure III.2: Détermination de la profondeur de l'eau dans le cas d'une nappe captive (d'après Aller et *al*, 1987 in Boujaltia, 2000)

Le concept d'une nappe libre ou captive est sûrement spatial, le même aquifère peut être libre dans une région et captive dans une autre. Donc le potentiel de pollution diminue avec l'augmentation des conditions de captivité de l'aquifère. En ce qui concerne une nappe semi-captive, c'est à l'utilisateur de décider de travailler avec les conditions d'une nappe libre ou captive. (Boudjelthia, 2000)

2- Recharge efficace de l'aquifère (I):

La recharge nette est définie comme étant la quantité d'eau totale transportée par infiltration efficace depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère des nappes.

La recharge annuelle nette correspond au rehaussement moyen de la couche d'infiltration de l'aquifère (mesuré en centimètres), faisant suite aux précipitations enregistrées. C'est ainsi que la quantité d'eau disponible pour la dispersion et la dilution des polluants dans la zone insaturée et la zone saturée est contrôlée par ce paramètre. La valeur de cette recharge est moins précise et difficile à obtenir.

C'est le paramètre le plus délicat à évaluer dans la méthode SINTACS, le système de cotation ne reflète pas le facteur de dilution.

La recharge nette est fonction des paramètres suivants :

- Echange vertical avec la surface du sol correspond à la relation suivante :
Recharge verticale = pluie locale + Infiltration des eaux d'irrigation – pompages.
- Echange avec les aquifères entourant l'aquifère considéré.
- Echange avec les oueds (Relation Oued-Nappe).

On doit noter que la valeur des deux derniers échanges est définie en fonction des niveaux respectifs de l'eau dans les différents milieux.

3- Effet de l'autoépuration de la zone vadose (N)

L'identification des différents matériaux dans cette zone a été obtenue en utilisant des informations pour la description lithologique et sections (CNA 2001 in Ramos et *al*, 2011). Une fois que la profondeur de l'eau soit connue, il est possible de procéder à une division initiale en sous zone non saturée ou saturée. Après avoir déterminé l'épaisseur de la zone non saturée et les variations lithologiques relatives de la stratigraphie hydrogéologique de la région (Oumar et *al*, 2014).

4- Type de sol (T):

Les caractéristiques de texture du sol sont liés à la quantité de recharge qui peut infiltrer dans le sol et donc la répartition spatiale de la cote de la zone non saturée indiquent le potentiel des contaminants de se déplacer verticalement dans la zone non saturée. La présence de matières fines texture tels que des limons et des argiles peut relativement diminuer la perméabilité du sol et de limiter la migration des contaminants (Al Kuisi et *al*, 2006). La carte pédologique de la plaine alluviale d’Affreville (Boulaine, 1955) à été vectorisée sous la plateforme ArcGis dans le format (.SHP). Un reclassement à été attribué à chaque type de sol de telle façon, que cette manipulation nous a permis à réduire le nombre de polygones typologiques du sol à moins de 10 classes (Oumar et *al*, 2014).

5- Caractéristiques hydrogéologiques du milieu aquifère (A)

Les propriétés de l'aquifère décrivent les éléments de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité lorsque les contaminants se mélangent avec les eaux souterraines. La typologie de l'aquifère peut interagir avec tout processus qui se déroule sous le niveau de l'eau comme la dilution, la dispersion et l'absorption.

Ceux-ci et des procédés similaires sont affectés de manière significative par les types lithologiques et aquifère perméabilité. Donc, toutes les caractéristiques précédentes doivent être prises en compte pour l'évaluation de la vulnérabilité (Al-Shatnawi et *al*, 2015).

L'étude de la carte géologique vectorisée de la plaine d’Affreville nous ont permis de déterminer 4 formations importantes pour le paramètre A.

6- Conductivité hydraulique de l'aquifère(C) :

La conductivité hydraulique est contrôlée par la texture granulométrique (porosité et indice des vides) et le degré de fracturation du milieu aquifère.

Ce paramètre est en relation direct avec les caractéristiques de l'écoulement dans la nappe (débit, vitesse, gradient hydraulique). Ainsi à une valeur importante de conductivité, est associé un important potentiel de pollution.

La valeur de la conductivité hydraulique est déterminée à partir des essais de pompage, dans le cas d'absence de ses essais, cette valeur est estimée à partir des caractéristiques géologiques du milieu aquifère.

7 - Pente (S) :

Le modèle numérique d'élévation (**DEM**) a été utilisé pour extraire l'information de pente pour la zone d'étude (Ramos et *al*, 2011), la topographie représente un facteur déterminant pour le ruissellement des polluants ou leurs infiltrations.

A 0-2% de pente, le plus grand potentiel existe pour l'infiltration de polluants, alors existe avec > 18% de pente faible potentielle d'infiltration. Cependant, la contamination des eaux de surface augmente avec une plus grande probabilité d'érosion (Aller et *al*, 1987).

Sous la plateforme *Spatial Analyst Tools du ArcGis* une reclassification est faite selon la calasse de caque grille puis un poids est attribué a chaque classe.

III-1-3 Interaction entre les paramètres SINTACS :

Il est évidant qu'il existe une large dépendance entre les paramètres SINTACS la vulnérabilité d'un site peut être évaluée en fonction du temps de transfert, de l'écoulement et de la concentration, associés a une éventuelle d'un polluant.

Pour la vulnérabilité d'untel site, la pollution des eaux souterraines sera évaluée selon le temps de transport, de l'écoulement et de la concentration associée à l'incidence de l'introduction du polluant à travers ce site .Les paramètres SINTACS doivent être distribués comme suit :

✓ **Selon le temps de transport :**

- Profondeur de l'eau.
- Type de sol.
- Impact de la zone non saturée.
- Recharge nette.
- Conductivité hydraulique de l'aquifère.

✓ **Selon l'écoulement :**

- Milieu aquifère.
- Conductivité hydraulique de l'aquifère (existence d'un gradient hydraulique).

✓ **Selon la concentration :**

- Profondeur de l'eau.
-

- Recharge nette.
- Milieu aquifère.
- Type de sol.
- Topographie.
- Impact de la zone non saturée.
- Conductivité hydraulique.

Il faut noter que la conductivité hydraulique est fonction de la possibilité du transfert du polluant à partir du point d'incidence et de la direction de migration qui est liée au gradient. (Boudjelthia, 2000)

III-2 Cartographie de la vulnérabilité :

L'analyse et l'expression de la vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions ont été dès leur départ inséparable de sa représentation cartographique. L'image étant le support de communication le plus efficace et la carte étant par essence le mode d'expression privilégié des distributions des caractères dans l'espace.

La méthode SINTACS est une méthode axée sur une cotation numérique de la vulnérabilité ; mais elles se prêtent bien à une cartographie multicritère, monothématique que décisionnelle.

Les principales étapes qui mènent à la création des cartes de vulnérabilité sont les :

1) Acquisition des données permettant d'évaluer tous les paramètres de la méthode employée. Ceci nécessite une recherche bibliographique intense et parfois des investigations de terrains pour compléter ou actualiser certaine donnée telle que la profondeur de l'eau qui varie dans le temps.

2) Tracé des cartes thématiques et attribution des cotes aux différents paramètres de la méthode considérée (SINTACS). Pour chacun des paramètres considérés par la méthode utilisée, on réalise une carte thématique sur la quelle sont délimitée les zones en fonction des intervalles établies par le système de cotation SINTACS. Chacune des zones ainsi délimitées reçoit une côte de 1 à 10 relative au paramètre représenté, et l'indice (poids \times côte) correspondant est ainsi calculé. Pour ce faire, il est recommandé d'utiliser pour chaque carte thématique une couleur, afin de visualiser les intersections des zones dans la phase de superposition.

3) Effectuer une série de superposition de toutes les cartes paramétriques afin de visualiser intersections les des grandes unités hydrogéologiques ainsi que les sous unités correspondantes.

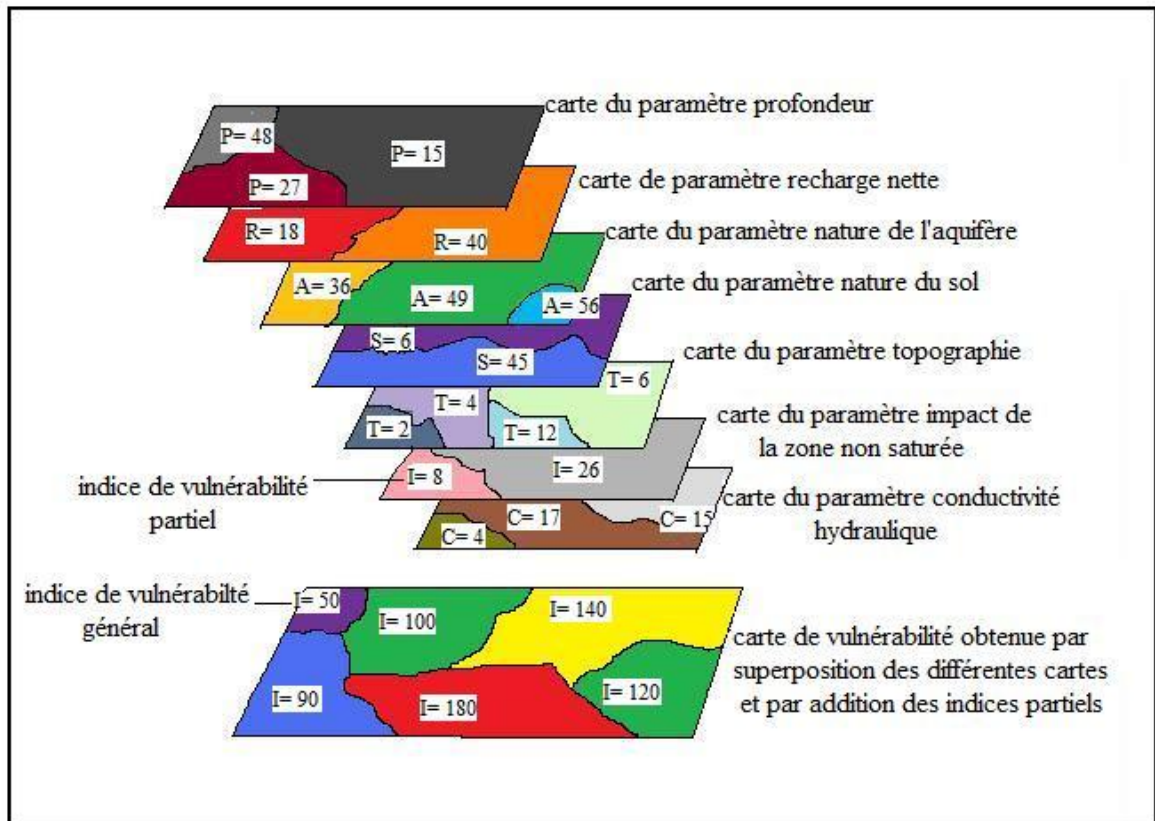


Figure III.3 : Principe de construction de la carte de vulnérabilité (méthode SINTACS)

4) Calcul de l'indice de vulnérabilité général pour chaque unité hydrogéologique obtenue et chaque sous unité déduite

5) Représenter les limites des différentes unités hydrogéologiques sur un fond topographique et porter à l'intérieur de ces unités leurs numéros d'identification ainsi que la valeur de l'indice général de vulnérabilité correspondant.

6) L'identification des unités se fait par une lettre et des chiffres (exemple: 2A₃¹⁴³) qui représentent le code du bassin versant (2), L'unité hydrogéologique (A), La sous unité hydrogéologique (3) et l'indice globale de vulnérabilité⁽¹⁴³⁾.

7) Les différentes unités hydrogéologiques peuvent alors être coloriées pour faciliter la lecture de la carte synthétique de vulnérabilité ainsi obtenue de sorte qu'elle permet une visualisation graduelle : les couleurs rouge, orange, et jaune indiquent les sites à fort potentiel de vulnérabilité et les couleurs bleu, indigo et violet caractérisent les moins sensibles. (ABH-CZ, 2000)

III-3 Généralités sur les SIG

III-3 -1 Définitions

Un système SIG est « un environnement conçu pour l'analyse et la modélisation de la distribution spatiale de phénomènes » (COLLET, 1992).

Cet outil informatique se compose d'une base de données géographique dans laquelle les données regroupées par thème, ont une structure en grille ou en image numérique géoréférencée que l'on appelle communément des couches ou des strates d'informations géographiques.

Selon FICHER (1993) « un SIG peut être définie comme un système de gestion de base de données conçu pour *saisir, stocker, manipuler, analyser et afficher* de données à référence spatiale en vue de résoudre des problèmes complexes de gestion et de planification ».

Selon DIDER (1990) « un système d'information géographique est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision ».

III-3- 2 Principales fonctions des SIG

L'utilité principale des SIG peut être considérée comme étant la production des cartes, bien entendu, il ne se limite pas à cette fonction, puisque un SIG d'après PORNON (1996) permet aussi :

- De présenter toutes sortes d'information, de la transformer en série de données compatibles, de les combiner et d'afficher les résultats sur une carte.
- De traiter les figures, les plus riches en introduisant des courbes, des cercles, des ellipses ou des surfaces, dotés d'attributs graphiques tel que couleur, type de trait, éclaircissement...., répandant à des équations mathématiques complexes.

- Le traitement direct des objets géographiques, en permettant de les identifier, c'est-à-dire de les désignés par un nom ou un code, les individualisant sans ambiguïté.
- De dessiner certes, mais aussi de les positionner en coordonnées géographiques et surtout de connaître les relations qu'ils entretiennent entre eux dans l'espace.
- De disposer les objets dans un système de référence géographique, de les convertir d'un système à un autre, de rapprocher entre des cartes de sources différentes et de faciliter leur superposition.
- De corriger certains contours de la moins fiable en reprenant les coordonnées correspondantes de la plus fiable.
- D'extraire tous les objets géographiques situés à une distance donnée, d'un carrefour, d'une route ou d'une décharge...etc.
- D'extraire tous les objets situés dans un périmètre donné, de fusionner tous les objets ayant une caractéristique commune.
- De collecter, produire et gérer des données géographiques. L'objectif est de créer et de tenir à jour une base de données graphique et alphanumérique pour permettre la consultation aux divers utilisateurs.
- De gérer l'allocation des ressources, ceci concerne la localisation des quantités, qualités, et mouvement des ressources.
- De définir un itinéraire, le SIG permet la recherche d'un chemin optimale des réseaux (de canalisation par exemple), en prennent en considération un ensemble de contraintes.
- De choisir un lieu d'implantation : il s'agit de sélectionner le meilleur site pour implanter un nouveau service en fonction de ses caractéristiques techniques, démographiques ou économiques.
- D'évaluer les ressources de surface ou de sous-sol, analyse de phénomène physique pour comprendre, exploiter et protéger les ressources naturelles.
- de surveiller et contrôler, l'enregistrement et l'analyse des occurrences d'évènement dans le temps, permet de comprendre le processus qui en est la cause et d'adopter des réponses ou des corrections. (ZIANE et ZAIRI, 2008)

III-4 Optimisation d'un SIG pour la cartographie de la vulnérabilité :

L'utilisation des techniques d'information dans la cartographie de la vulnérabilité des eaux sous terraines a la pollution, a relancé cette activité qui a marqué une certaine diminution depuis quelques années en France par exemple (Roux, 1988 *in* ABH-CZ, 2001), compte tenu de la rapide obsolescence de ces documents qui nécessiteraient une actualisation fréquente.

C'est d'ailleurs grâce aux techniques d'information géographiques que les Etats Unis d'Amérique ont pu mettre en œuvre, à l'échelle nationale, d'un système d'évaluation de la vulnérabilité des ressources en eaux souterraines au moyen des systèmes multicritères (Aller *et al*, 1985).

Les descriptions paramétriques ou d'autres descripteurs de caractères zonaux, présentées sous formes de cartes de base ou non sont les entrées d'une base de données spatiales. Adéquates, ces dernières peuvent être utilisées par des logiciels appropriés qui permettent d'éditer des cartes spécifiques sans contraintes d'échelles.

L'intégration des SIG tels que, ArcGIS ,...etc, permettent l'usage de bases de données graphiques digitalisées ou directement saisies par utilisateur. Ce qui permet alors de rendre les cartes de vulnérabilités facilement révisables, adaptable et modulables en fonction des nouvelles conditions hydrogéologiques et des objectifs (ABH-CZ, 2001).

II-5 Objectif et intérêt des cartes de vulnérabilité :

La carte de vulnérabilité d'une nappe libre offre un aperçu sur la répartition spatial du degré de vulnérabilité des sols et sous-sols en différentes zone d'une région étudiée. Comparée à une carte d'inventaire des sources de pollution, elle permettra un aperçu sur les sites susceptibles aux risques de pollution.

La cartographie de la vulnérabilité des nappes d'eaux souterraines à la pollution a comme toute cartographie thématique plusieurs objectifs :

- Message de sensibilisation : il s'agit de faire comprendre et de montrer que la vulnérabilité varie suivant les lieux et implique une politique de protection des qualités différenciées. Tel est le but des premières cartes.
- Informations offertes répondant à des demandes : indication préalable sur un site donné ou sur plusieurs sites à comparer, pouvant suffire au stade de préfaisabilité de projet, anticipant sur une étude de détail et pouvant contribuer à orienter la programmation de celle-ci.

- Classification d'un territoire afin de prendre en compte la variable vulnérabilité parmi d'autres conditions ou contraintes (source de pollution, qualité des eaux souterraines ...etc.) dans le choix et les plans d'aménagement du territoire et d'occupation du sol.(ZIANE et ZAIRI, 2008).

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

IV-1 Inventaire des données :

Nous examinerons dans cette partie les résultats de l'application de la méthode SINTACS à la nappe alluviale de la plaine du moyen Cheliff occidentale.

Les principales étapes pour l'estimation de la vulnérabilité sont l'acquisition des données, l'évaluation des indices paramétriques, la réalisation des cartes thématiques, Calcul de l'indice SINTACS général et enfin la réalisation de la carte finale qui nous permettra d'évaluer la vulnérabilité à la pollution dans notre zone d'étude.

Pour appliquer la méthode SINTACS, il est d'abord indispensable de rassembler le maximum d'informations physiographique, pédologiques et hydrogéologique de la zone à cartographier.

Les différentes sources d'informations utilisées pour l'évaluation des paramètres qui caractérisent la vulnérabilité de la nappe alluviale de la plaine du moyen Cheliff occidentale sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Les différentes sources d'informations utilisées pour l'évaluation des paramètres SINTACS.

| Paramètres | Sources d'informations |
|---|---|
| profondeur de l'eau | <ul style="list-style-type: none"> • Niveau statique relevé au niveau des coupes de forages • Annuaire piézométrique de la plaine du moyen Cheliff (DHW-Chlef) |
| Milieu aquifère et la zone non saturée | <ul style="list-style-type: none"> • Coupes des forages situés dans la zone du moyen Cheliff occidentale (DHW-Chlef) • Carte géologique de la zone du moyen Cheliff occidentale |
| Topographie | <ul style="list-style-type: none"> • Carte topographique du Bassin Hydrographique Zahrez 1 :200.000 (DHW-Chlef) • Carte topographique de la wilaya de Chlef 1 :200000 |
| Type du sol | <ul style="list-style-type: none"> • Carte des sols d'Algérie plaine du Cheliff 1 :50000 (Boulaine, J 1956) |
| Conductivité hydraulique | <ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique de la wilaya de Chlef (ABH-CZ, 2003) • Coupe hydrogéologique (ABH-CZ) |

IV-2 Réalisation des cartes thématiques :

IV-2-1 Le paramètre « S » profondeur de l'eau :

La profondeur de la nappe est un paramètre prépondérant dans la caractérisation de la vulnérabilité par la méthode SINTACS, il est par conséquent assigné d'un poids maximal égal à 5.

L'évaluation de ce paramètre a été faite à partir des valeurs relevées directement au niveau des coupes de forages. Pour la réalisation de la carte du paramètre profondeur de l'eau « S » on a utilisé le niveau statique de 47 puits et forage inclus dans notre zone d'étude.

Les données de profondeur du plan d'eau dans la nappe sont mesurées durant le mois de Mai 2012, avec une variation de 1 mètres dans la zone centrale de la nappe et à proximité du oued Cheliff et à plus de 54 mètres dans les bordures de la nappe.

La carte des profondeurs de la nappe (**Figure IV.1**) a été établie en utilisant la méthode D'interpolation par IDW. Elle met en évidence une variabilité spatiale marquante et montre quatre classes allant de 04 à 51 m (**Tableau IV.2**).

Ainsi, la zone de très faible profondeur de (4 à 8 m) caractérise le Nord-Est de la plaine (Ouled Abbas), celle de faible profondeur (8 à 16 m) le Sud-Ouest (Sobha et Boukadir) et le Nord-Est (Labiodh Medjadja), traduisant ainsi une vulnérabilité élevée. Au contraire, une grande partie du centre de la plaine abrite des eaux à forte profondeur (plus de 16 m) avec un indice partiale faible ($I_s = 5$).

Tableau IV.2: L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre profondeur du l'eau I_s (Rutharvel Murthy et al, 2015).

| Profondeur de l'eau (S) | | | | |
|--------------------------|------|--------------|-------|----------------|
| Classe de profondeur (m) | Cote | Cote utilisé | Poids | Indice SINTACS |
| < 4 m | 10 | / | | / |
| 4.01 – 8 m | 8 | 8 | | 40 |
| 8.01 – 12 m | 3 | 3 | 5 | 15 |
| 12.01 – 16 m | 2 | 2 | | 10 |
| > 16 m | 1 | 1 | | 5 |

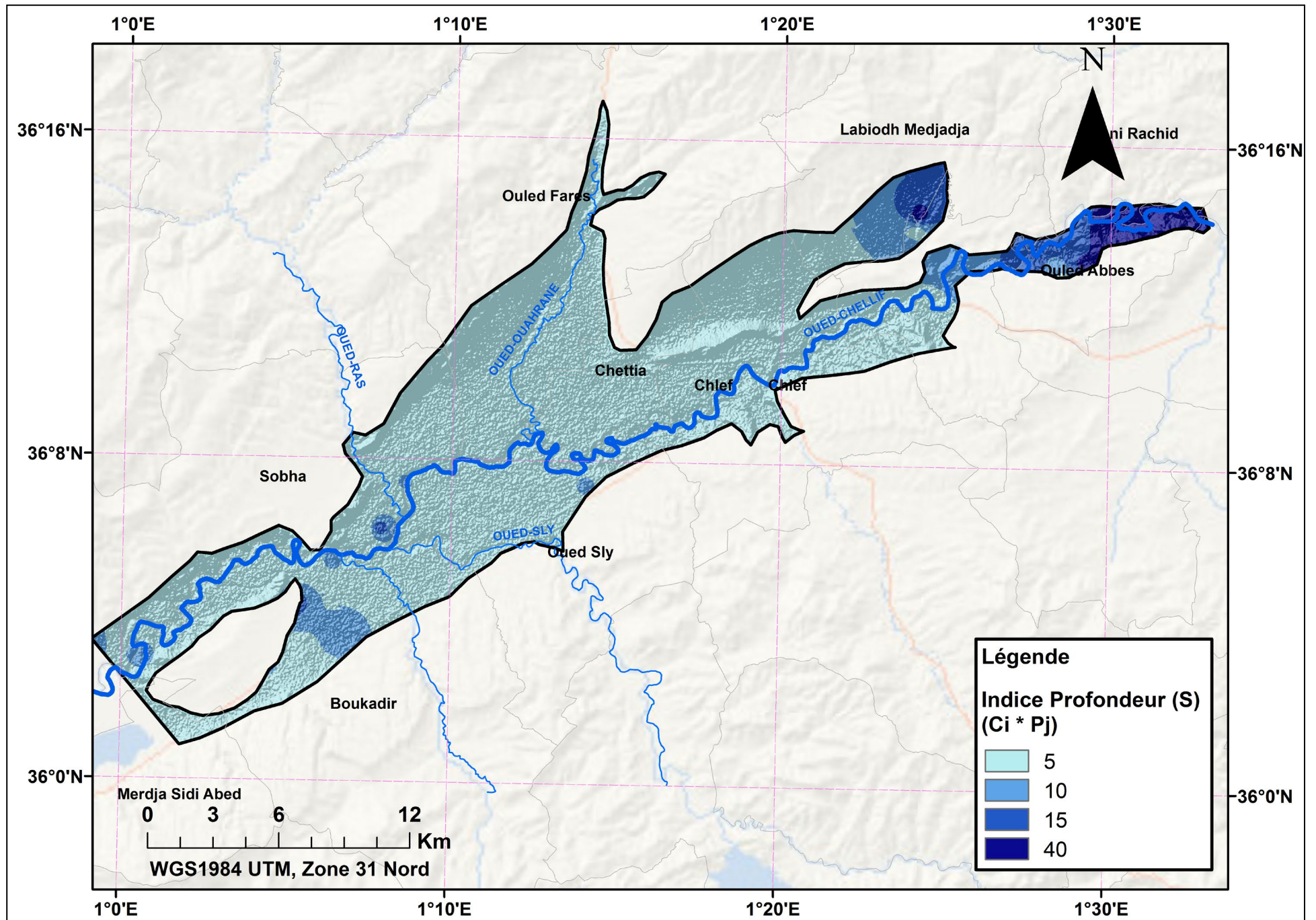


Figure IV.1 : Carte du paramètre « s » profondeur de l'eau

IV-2-2 Le paramètre « I » Recharge Efficace :

Ce paramètre est également prépondérant dans la définition du degré de vulnérabilité. Dans le concept de vulnérabilité, la recharge efficace correspondant à l’infiltration efficace est le seul paramètre responsable de la réalimentation des nappes. Elle représente ainsi le moyen de transfert du polluant de la surface du sol vers le milieu aquifère.

La recharge nette de la nappe dépend de l’infiltration directe à partir des eaux de pluie et l’alimentation continue et normale des oueds, en période de crues ou décrues.

L’évaluation de la recharge efficace des nappes est souvent très difficile à réaliser sans études hydrogéologique et hydrologique préalables.

Selon l’étude réalisée par **Rutharvel Murthy et al, (2015)**, on peut estimer l’infiltration efficace suivant la nature de texture des sols de la plaine (**Tableau IV.3**). Les sols au centre de la plaine présente une texture argileuse qui correspond à un indice de vulnérabilité partiel faible ($I_i = 4$). Ainsi que les sols à proximité de l’oued et ses affluents présente une texture sableuse avec un indice de vulnérabilité partiel ($I_i = 12$). Par contre les sols des bordures de la nappe sont de texture de Limon argileux ($I_i = 20$) (**Figure IV.2**).

Tableau IV.3 : L’indice de vulnérabilité partiel du paramètre recharge efficace du l’eau I_i (**Rutharvel Murthy et al, 2015**).

| Texture du sol | Recharge efficace (I) | | Poids | Indice SINTACS |
|------------------------|-----------------------|--------------|-------|----------------|
| | Cote | Cote utilisé | | |
| Sable loameux | 7 | 7 | 4 | 28 |
| Limon sableux | 7 | 7 | | 28 |
| Limon argileux sableux | 6 | / | | / |
| Limon argileux | 5 | 5 | | 20 |
| Limon argile limoneux | 4 | / | | / |
| Argile sableux | 4 | / | | / |
| Sable limoneux | 3 | 3 | | 12 |
| Argile | 1 | 1 | | 4 |

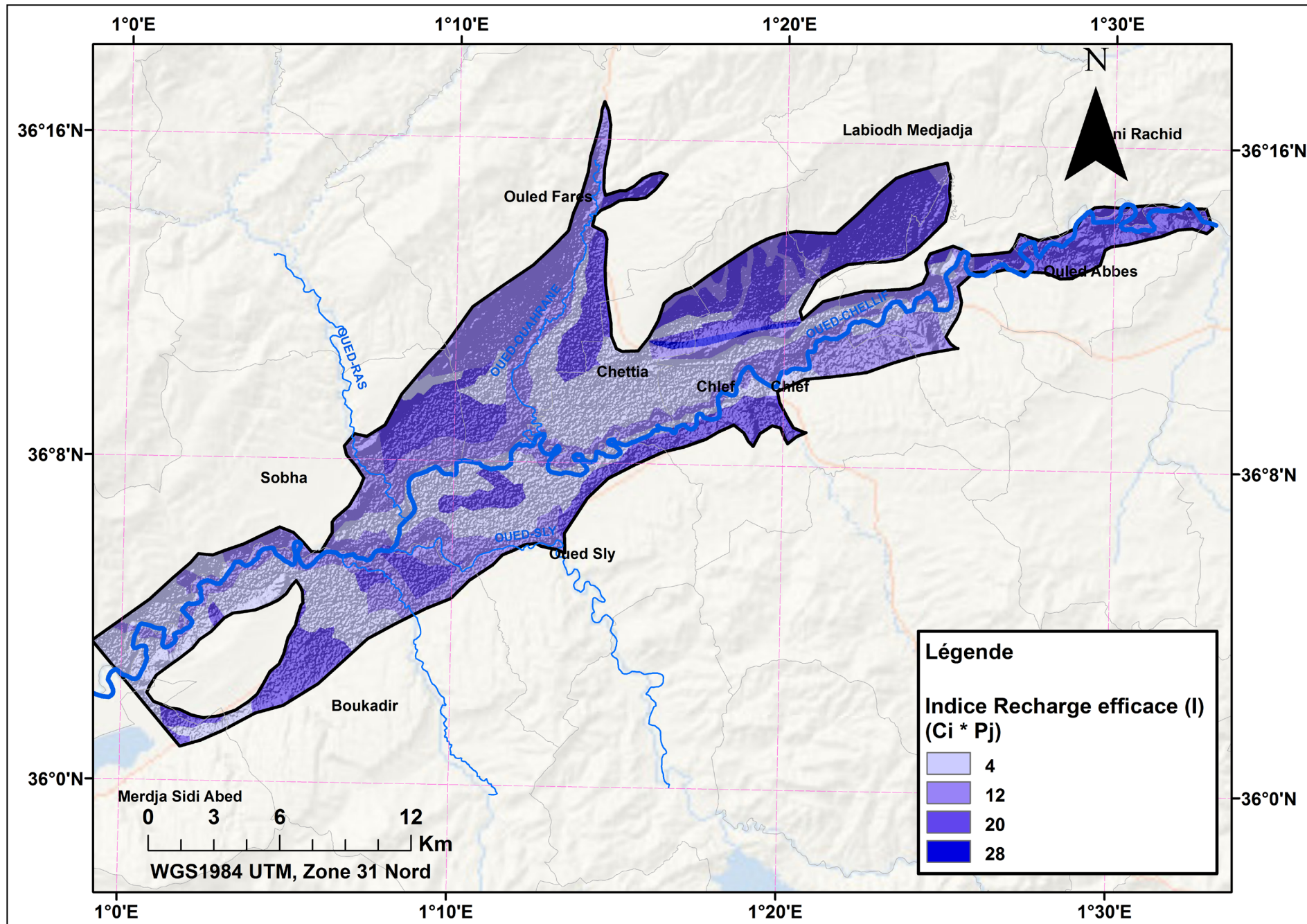


Figure IV.2 : Carte du paramètre « I » recharge efficace

IV-2-3 Le paramètre « N » Capacité d'atténuation de la zone non saturé

Quant au paramètre « N », la texture de la zone non saturée décrite par l'examen des coupes hydrogéologiques réalisées ainsi que des forages permet de distinguer 4 zones caractérisées par un indice de vulnérabilité partiel différent, ces zones sont bien détaillées dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.4 :L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre impact de la zone non saturée « I_N »

| Capacité d'atténuation de la zone vadose (N) | | | | |
|---|-------------|---------------------|--------------|-----------------------|
| Texture du sol | Cote | Cote utilisé | Poids | Indice SINTACS |
| Sable loameux | 10 | / | 5 | / |
| Limon sableux | 9 | 9 | | 45 |
| Limon argileux sableux | 8 | / | | / |
| Limon argileux | 7 | 7 | | 35 |
| Limon argile limoneux | 4 | / | | / |
| Argile sableux | 3 | / | | / |
| Sable limoneux | 2 | 2 | | 10 |
| Argile | 1 | 1 | | 5 |

Les résultats obtenues pour ce paramètre est présenté dans la carte de la **figure (IV.3)**, où on trouve que pour les sols de la plaine de texture argileux correspond à un indice de vulnérabilité partiel faible ($I_N = 5$), et pour les sols a texture sableuse proche de l'oued Chélif et ses affluents, l'indice de vulnérabilité partiel ($I_N = 10$) et un indice de ($I_N = 35$) se trouve au limites de la plaine de texture Limon argileux. En revanche l'indice ($I_N = 45$) occupe une petite superficie de la plaine vers le nord, avec une texture Limon sableux.

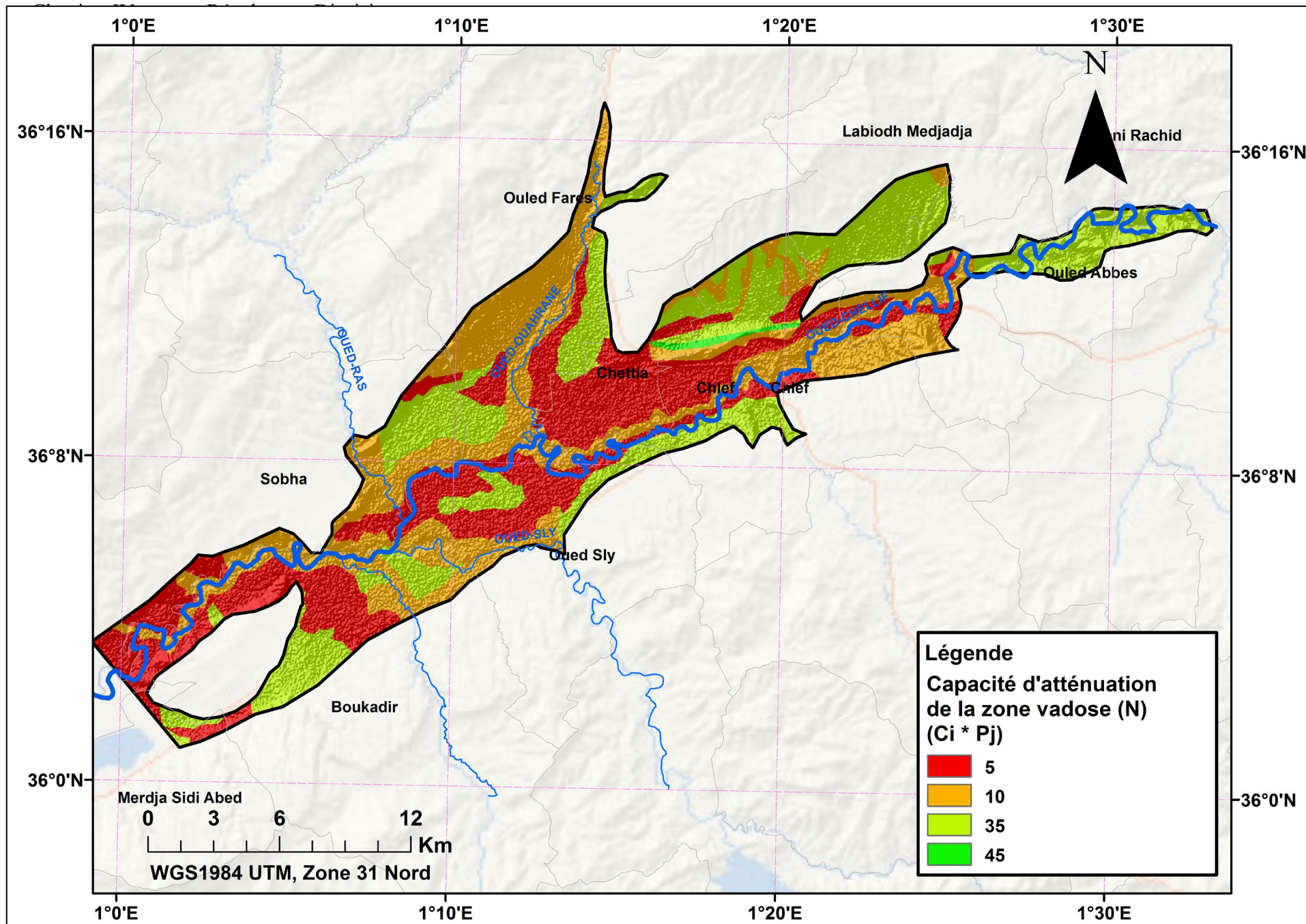


Figure IV.3 : Carte du paramètre « N » Capacité d'atténuation de la zone vadose

IV-2-4 Le paramètre « T » Capacité d'atténuation du sol

L'étude pédologique de Boulaine (1950 à 1955) est la principale étude qui a été réalisée dans tout le nord d'Algérie. Cette étude couverte la totalité de notre zone d'étude qui permet facilement de déduire les types de sol qui sont incluse dans notre région.

Les catégories de sols rencontrés dans notre zone sont présentées dans le **Tableau (IV.5)** et la **figure (IV.4)** :

- Sols argileuse, ce type de sol est le plus abondons, il occupe la partie centrale de la plaine avec du sable, l'indice de vulnérabilité est égale à 3.
- Le sable occupe le lit majeur de l'oued Cheliff ainsi que le lit de l'Oued Sly, Oued Ras et Oued Ouahrane. L'indice de vulnérabilité partiel I_T est égal à 6.
- Sols limoneuse argileux, occupe la zone périphérique Sud de la zone d'étude et aussi la plaine de Medjadja ce type de sol correspond à un indice de vulnérabilité partiel I_T égale à 21.
- Le Sable loameux, ce type de sol n'est pas trop abondent dans notre périmètre d'étude il occupe une petite zone dans la partie Nord-Est de notre zone d'étude avec un indice de vulnérabilité partiel I_T égale à 27.

Tableau IV.5 :L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre *Capacité d'atténuation du sol*

| Capacité d'atténuation du sol (T) | | | | |
|--|-------------|---------------------|--------------|-----------------------|
| Texture du sol | Cote | Cote utilisé | Poids | Indice SINTACS |
| Sable loameux | 10 | / | | / |
| Limon sableux | 9 | 9 | | 27 |
| Limon argileux sableux | 8 | / | | / |
| Limon argileux | 7 | 7 | 3 | 21 |
| Limon argile limoneux | 4 | / | | / |
| Argile sableux | 3 | / | | / |
| Sable limoneux | 2 | 2 | | 6 |
| Argile | 1 | 1 | | 3 |

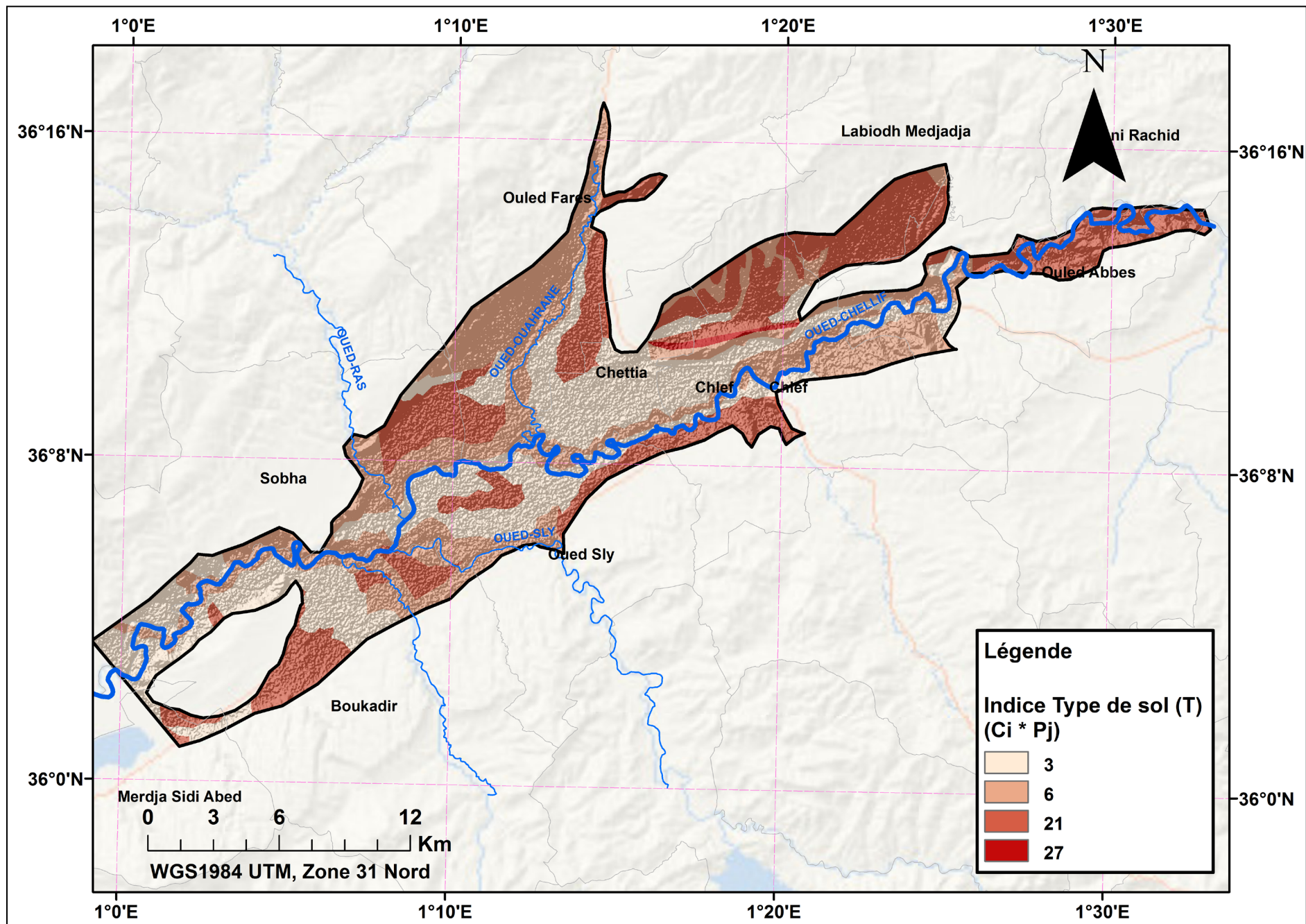


Figure IV.4 : Carte du paramètre « T » Capacité d'atténuation du sol

IV-2-5 Le paramètre « A » Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère

Les matériaux qui constituent la zone saturée de l'aquifère sont identifiés à partir de la carte géologique de la plaine moyen Chélif occidentale, ainsi que de la description lithologique des coupes des forages.

La carte du paramètre « A » (**figure IV.5**) nature de l'aquifère montre essentiellement deux zones principales sont les alluvions récentes et les alluvions anciennes caractérisées par des indices de vulnérabilité différents (**Tableau IV.6**):

- Zone 1 : situé au limites de la plaine, caractérisée par un indice de vulnérabilité partiel faible $I_A = 5$.
- Zone 2 : couvre la plus grande partie de la plaine formée par des galets et graviers avec des passages argileuse ou du gravier argileux, l'indice de vulnérabilité partiel $I_A = 50$.

Tableau IV.6 : L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère I_A

| Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère (A) | | | | |
|--|-------------|---------------------|--------------|-----------------------|
| Lithologie | Cote | Cote utilisé | Poids | Indice SINTACS |
| Alluvions anciennes | 10 | 10 | 5 | 50 |
| Alluvions récentes | 1 | 1 | | 5 |

IV-2-6 Le paramètre « C » Conductivité hydraulique de la zone saturée :

Les valeurs des conductivités hydrauliques utilisées pour l'établissement de la carte de répartition spatiale de ce paramètre ont été estimées et obtenues à partir des essais de pompage.

Pour la zone d'étude, nous avons utilisé une combinaison de collecte allant de la carte de transmissivités déjà réalisée par ARNH (2008) avec celle des profondeurs d'eau souterraine. Les conductivités hydrauliques sont calculées en divisant les transmissivité par l'épaisseur de la zone saturée (**Oumar et al, 2014 ; Rutharvel Murthy et al, 2015**). Ces valeurs obtenues a permis d'établir la carte du paramètre C (**Figure IV.6**).

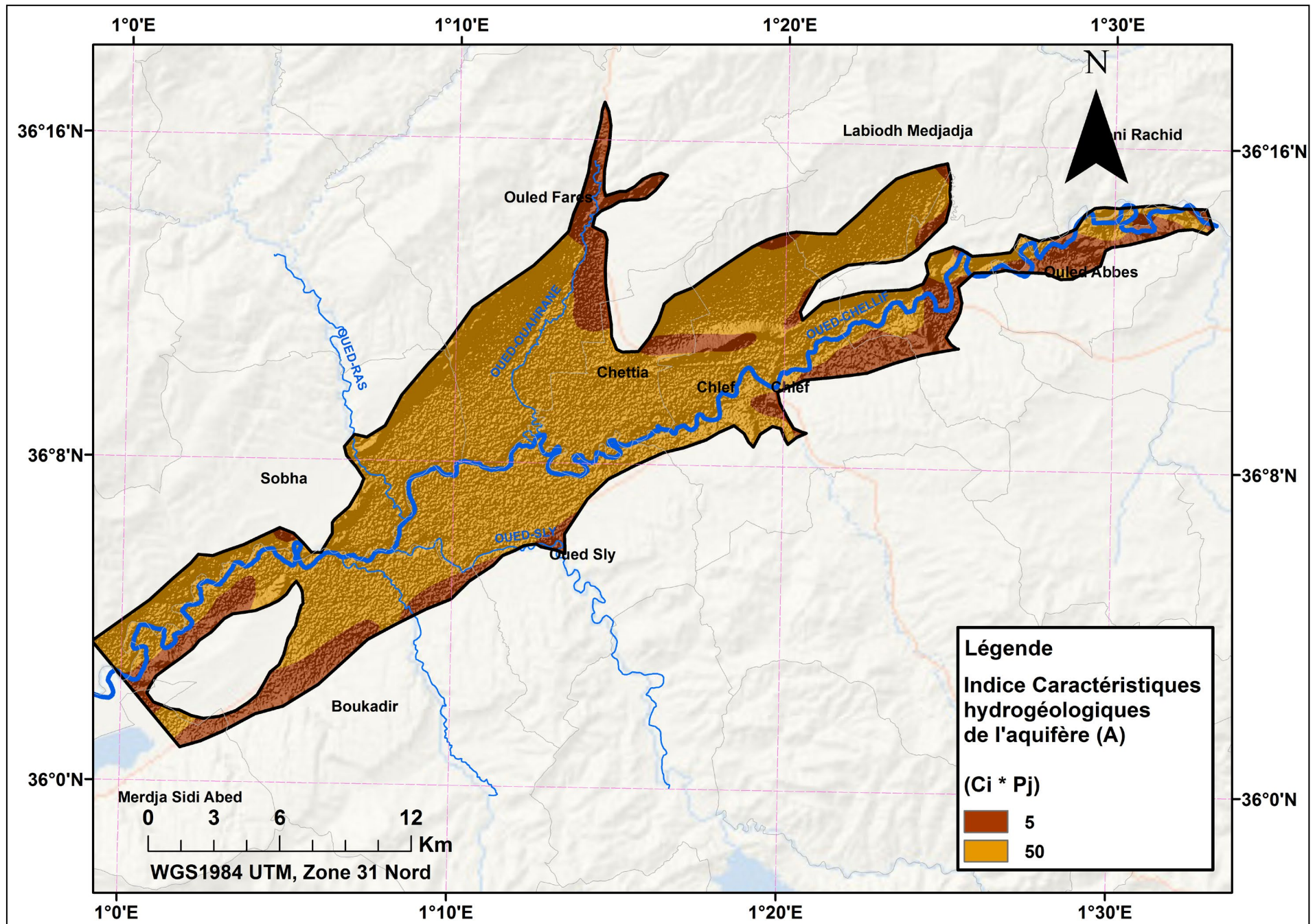


Figure IV.5 : Carte du paramètre « A » Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère

Les valeurs de la conductivité hydraulique dans notre région, sont comprises entre 09 et 116 m/j. Selon le modèle SINTACS (**Tableau IV.7**), on peut distinguer cinq classes dont la première (< 10 m/j), ou elle représente seulement 0.5% de la superficie totale du périmètre, la deuxième avec un intervalle de (10,01 à 20 m/j), qui représente 10%, la troisième classe (20,01 à 30 m/j) qui couvre 5% de la superficie globale de la plaine, la quatrième la classe dépassant (30,01 à 40 m/j) qui couvre presque 9% de la surface totale et dernièrement la classe dépassant 40 m/j qui couvre presque 81% de la surface totale couvrant la région centrale de la plaine.

Tableau IV.7 : L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre Conductivité Hydraulique Ic

| Conductivité hydraulique (C) | | | | |
|-------------------------------------|-------------|---------------------|--------------|-----------------------|
| Classe (M/j) | Cote | Cote utilisé | Poids | Indice SINTACS |
| < 10 | 2 | | | 6 |
| 10.01 - 20 | 3 | | | 9 |
| 20.01 - 30 | 4 | | 3 | 12 |
| 30.01 - 40 | 5 | | | 15 |
| > 40 | 6 | | | 18 |

IV-2-5 Le paramètre « S » Pente Topographique

La carte du paramètre topographie du terrain de la plaine du moyen Cheliff occidental (**Figure IV.8**) a été établie sur la base de la carte MNT téléchargé à partir du site de l'USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), et à l'aide de l'ArcGIS nous avons réalisé la carte des pentes (**Figure IV.7**).

La plaine du moyen Cheliff occidental ne représente pas de grands dénivelés, néanmoins cinq classes de pentes ont été déduites (**Tableau IV.8**) selon **Murthy et al, (2015)** :

- La première et deuxième classe se localise dans une zone réduite aux limites de la plaine avec des pentes très faibles inférieures à 2% d'un indice partiel I_s égale à 15, et de 2 à 6% assignée d'un indice partiel I_s égale à 12.
- La troisième classe qui se présente dans la partie sud où les pentes varient de 6 à 12% cette classe est affectée d'un indice partiel I_s égale à 9.
- Pour la quatrième et la cinquième classe, couvrent la totalité de la plaine avec une variation de 12 à 18 % d'un indice partiel I_s égale à 6, ainsi pour la dernière classe où la pente est supérieure à 18%, avec un indice I_s égale à 3.

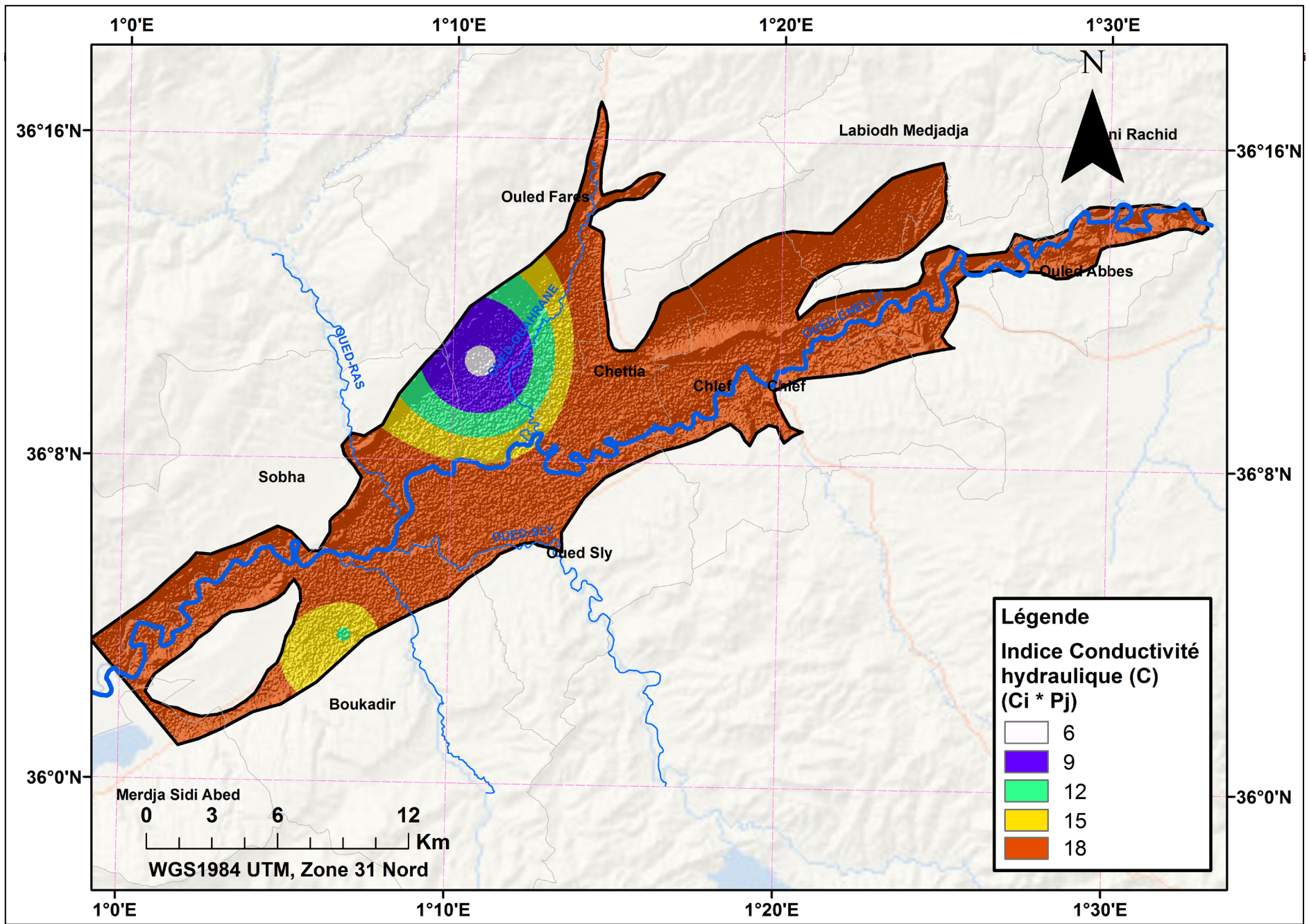


Figure IV.6 : Carte du paramètre « C » Conductivité hydraulique

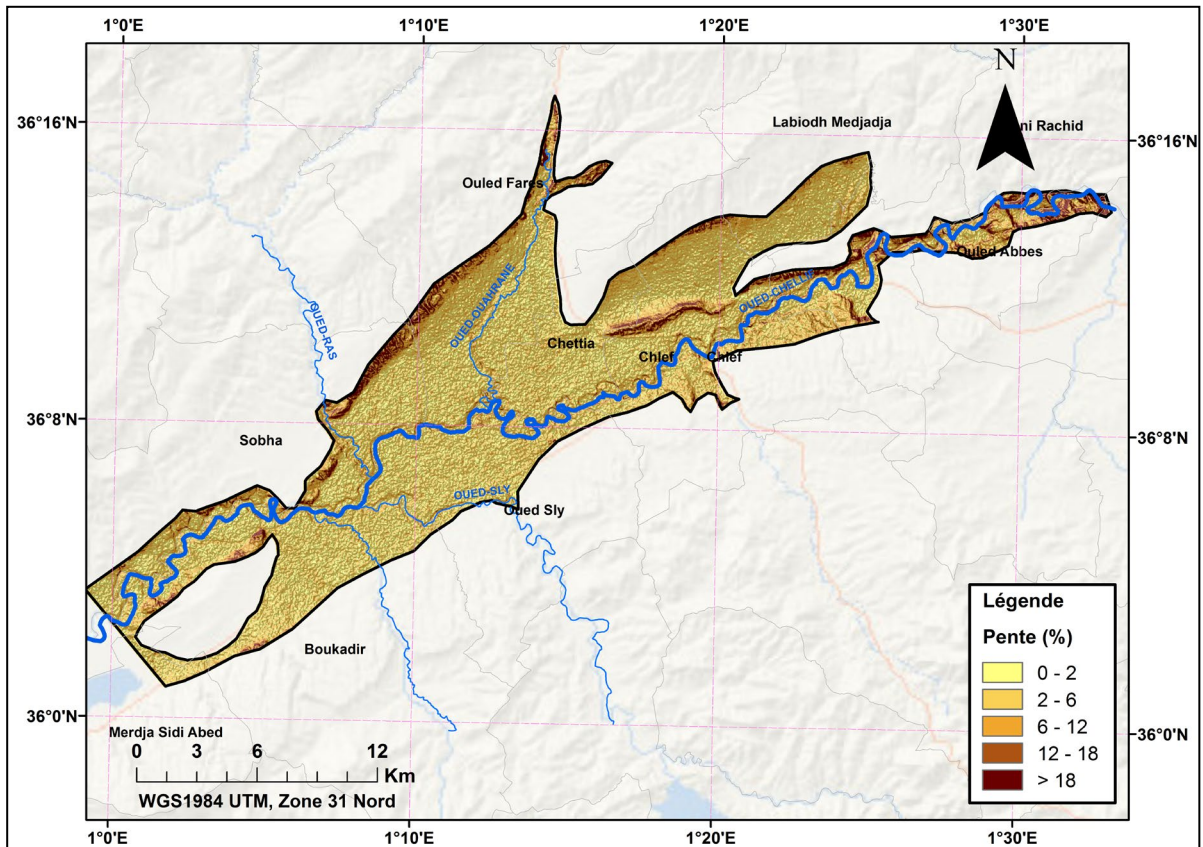


Figure IV.7 : Carte des classes de pente.

Tableau IV.8 : L'indice de vulnérabilité partiel du paramètre Pente topographique Is

| Pente Topographique (S) | | | | |
|-------------------------|------|--------------|-------|----------------|
| Classe de Pente (%) | Cote | Cote utilisé | Poids | Indice SINTACS |
| < 2 | 5 | 5 | | 15 |
| 2 – 6 | 4 | 4 | | 12 |
| 6 – 12 | 3 | 3 | 3 | 9 |
| 12 – 18 | 2 | 2 | | 6 |
| > 18 | 1 | 1 | | 3 |

IV-3 Calcul de l'indice général et réalisation de la carte de la vulnérabilité :

Pour ce travail la carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution dans la plaine alluviale du Moyen Chéliff Occidentale a été élaborée, à partir des sept paramètres standards du modèle SINTACS.

La carte de vulnérabilité conçue est la résultante de la superposition des différentes couches issue de la cartographie des sept paramètres à l'aide du logiciel ArcGIS, pour cela nous avons importé les cartes raster pour chaque paramètre en utilisant l'outil calculatrice raster pour applique la formule SINTACS.

Tableau IV.9 : Caractéristiques du degré de Vulnérabilité de la nappe alluviale.

| Degré de Vulnérabilité | Indice de vulnérabilité | Superficie en Km ² | Pourcentage (%) |
|------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------|
| Très Faible | 80 < | 37.99 | 12.1 |
| Faible | 80 - 105 | 162.96 | 51.7 |
| Moyenne | 105 - 140 | 36.91 | 11.7 |
| Haute | 140 - 186 | 74.63 | 23.7 |
| Très Haute | 186 > | 2.5 | 0.8 |

Après l'élaboration de la carte de vulnérabilité de la nappe alluviale du moyen Cheliff occidental (**Figure IV.10**) à l'aide de la répartition de l'indice SINTACS général. L'observation des critères d'évaluation des degrés de vulnérabilité dans la méthode SINTACS montre qu'il y a 05 classes de vulnérabilité (**Figure IV.9**) et leurs répartitions sur la totalité de la plaine (**Tableau IV.9**) :

- Classe à très faible degré de vulnérabilité soit un indice SINTACS général inférieur a 80, occupe une petite superficie environ de 12% à la limite de la nappe. Cette zone est caractérisée par une nature de l'aquifère de faible perméabilité et une grande profondeur.
- Classe à faible degré de vulnérabilité, l'indice SINTACS général est compris entre 80 et 105, la classe de vulnérabilité faible couvre une grande partie avec environ 52 % de la superficie totale, beaucoup plus présente au centre de la plaine, cette classe est caractérisée par sa grande profondeur et faible pente.

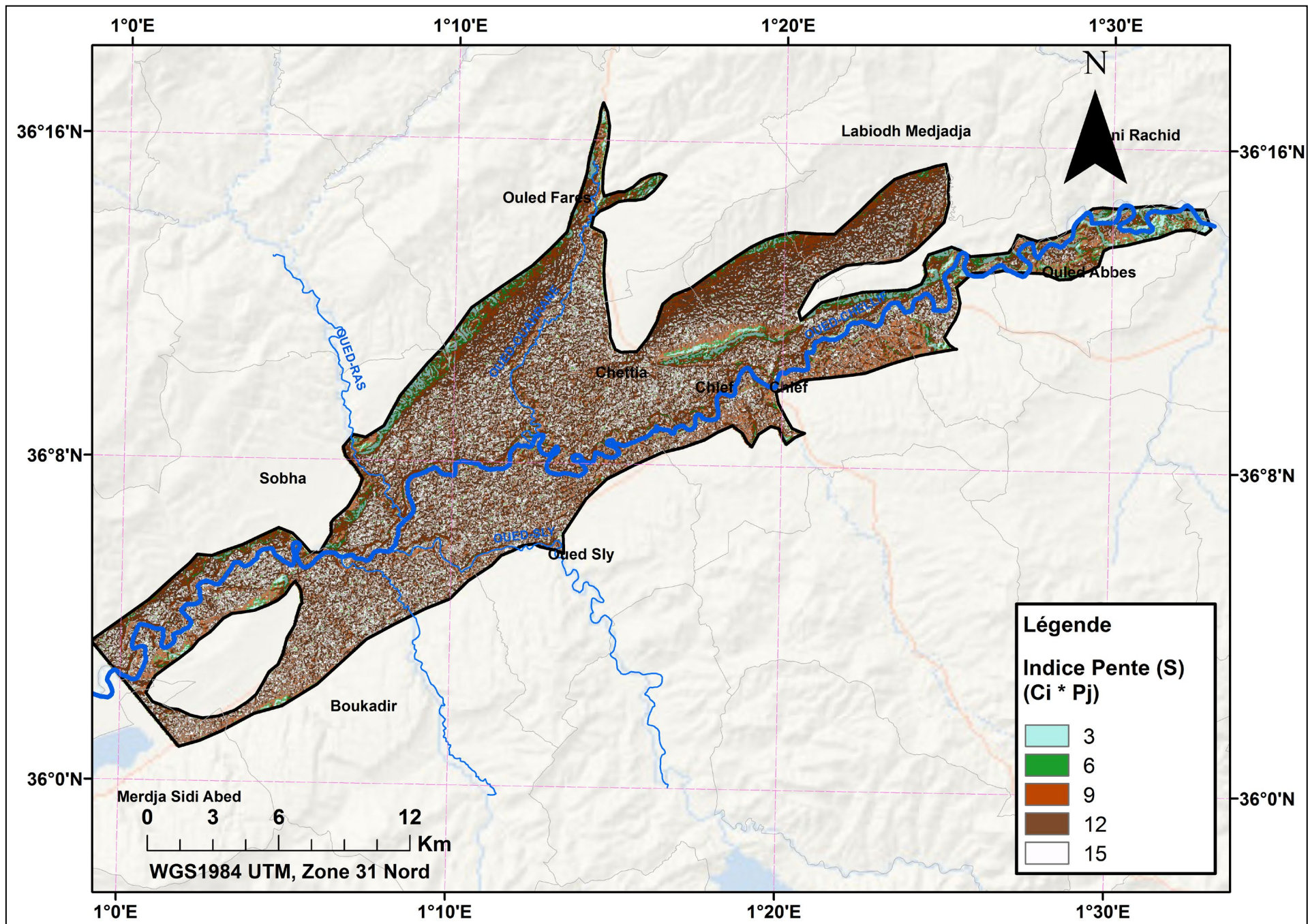


Figure IV.8 : Carte du paramètre « S » Pente Topographique

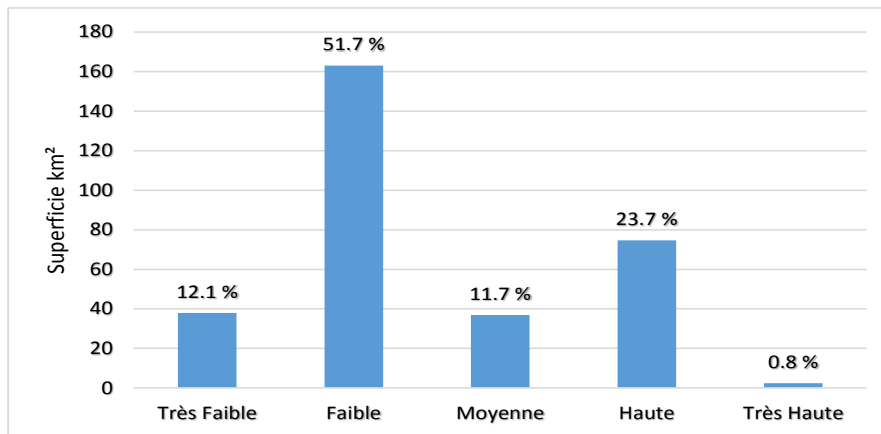


Figure IV.9 : Classes de vulnérabilité en % de superficie (Modèle SINTACS) de la nappe.

- Classe de vulnérabilité moyenne où l'indice SINTACS général varie de 105 à 140, cette classe se localise principalement dans la partie Nord et Sud de la zone d'étude, occupe environ 12 % de la superficie totale.
- Classe de vulnérabilité élevée avec un indice supérieur compris entre 140 à 186, la plus grande partie de cette classe se situe dans la partie Nord-est de notre zone ainsi on peut la retrouver dans la partie Sud-ouest avec des degrés moindre (Environ 24% de la superficie totale), caractérisée par un type de sol de Limon argileux.
- La dernière classe de vulnérabilité très haute, d'un indice supérieur à 186, occupe une très petite superficie de 0.8 %, se situe dans la partie Nord-est de la plaine, caractérisé par de faible profondeur (Inferieur de 4 m).

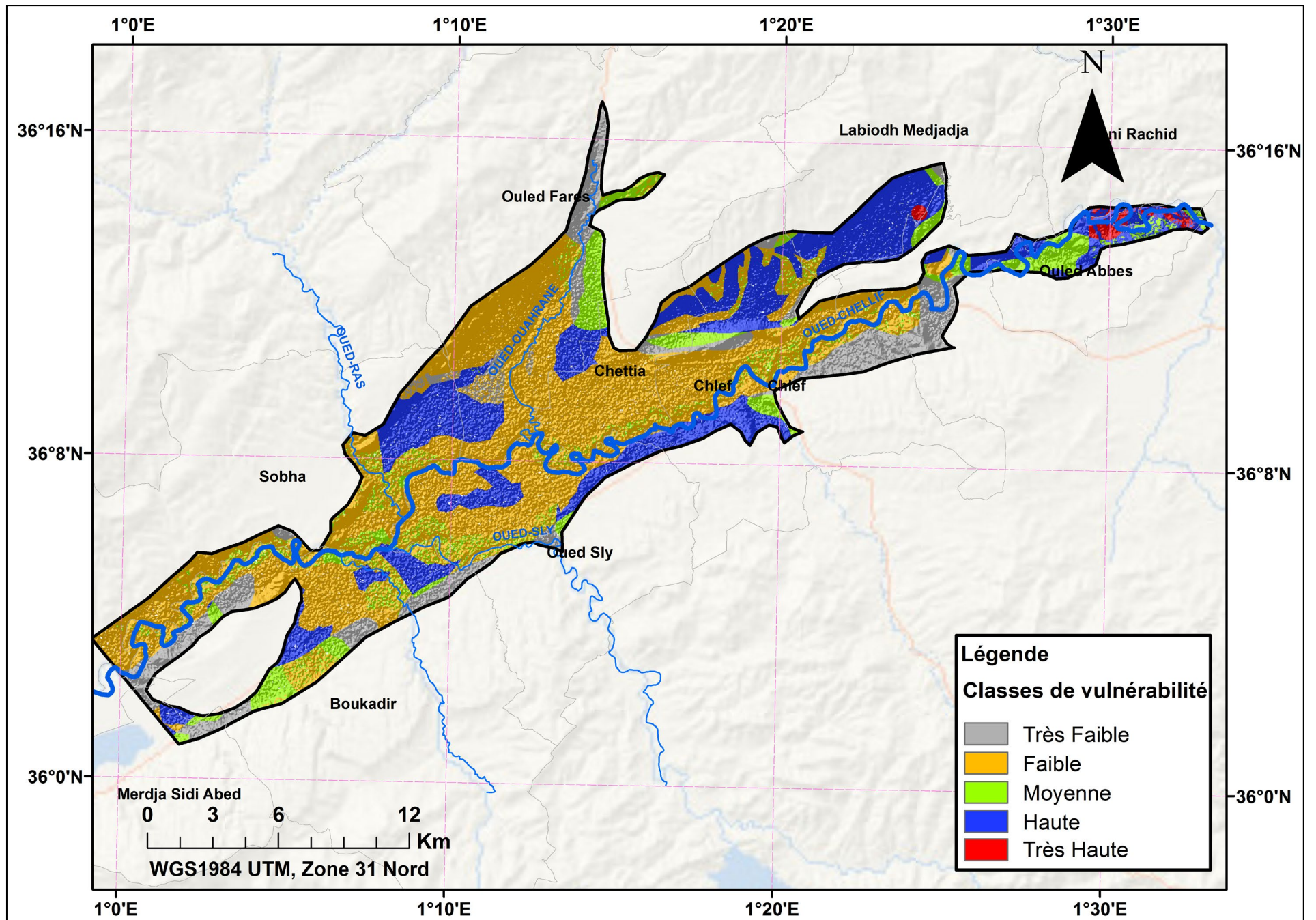


Figure IV.10 : Carte de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale du moyen Cheliff occidentale

CONCLUSION GENERALE

Conclusion

CONCLUSION

La pollution des eaux souterraine en Algérie est le risque permanent de la limitation de la ressource en eau, où la prévention contre la pollution des nappes constitue une étape importante, à laquelle les scientifiques faire de plus en plus d'efforts, notamment en étudiant la vulnérabilité des nappes souterraines.

Cette étude quantifier la vulnérabilité de la nappe alluviale du moyen Cheliff occidental à la contamination par la pollution de façon à évaluer l'impact des polluant sur la qualité des réserves en eau souterraine en appliquant la méthode SINTACS.

L'application de la méthode SINTACS aux aquifères de la nappe alluviale du moyen Cheliff occidental, a permis l'établissement de la carte de vulnérabilité à la pollution, qui met en évidence cinq zones de vulnérabilité différentes : très faible vulnérabilité, faible vulnérabilité, vulnérabilité moyenne et vulnérabilité élevée et très élevée.

Cette méthode nécessite sept paramètres. La fiabilité de ces paramètres dépend des données utilisées pour leur réalisation. Plusieurs paramètres comme la profondeur de la nappe, a été produite par interpolation. L'interpolation utilisée dans cette étude peut entraîner des erreurs dans la réalisation des paramètres, car l'interpolation n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles.

L'une des difficultés de l'application de la méthode SINTACS est aussi les limites des classes et les côtes qui sont assignées aux différents paramètres. En effet, les limites des classes standards ne reflètent pas souvent la réalité de la zone d'étude du fait que ces classes peuvent regrouper des entités différentes. Ainsi, l'assignation des côtes n'est pas toujours identique à celle définie par la méthode.

En dépit des différentes limites soulevées dans l'établissement de la carte de vulnérabilité à la pollution, il n'en demeure pas moins que la carte de vulnérabilité intrinsèque établie par la méthode SINTACS est la plus fiable.

Les cartes de vulnérabilités pourront servir à l'élaboration d'une politique visant à prévenir la pollution des formations aquifères. Les zones vulnérables pourront faire l'objet de règlement spécifique permettant d'orienter les choix finaux relatifs à l'aménagement du territoire et à l'occupation du sol.

Conclusion

Elles peuvent être également utilisées pour rétablir les priorités d'action en ce qui concerne la surveillance de la qualité des eaux souterraines ou la restauration des sites déjà pollués.

La carte de vulnérabilité est donc un outil précieux pour gérer et aménager un territoire, dont l'objectif est la protection des ressources en eau et la prévention de leur contamination.

En fin nous suggérons pour la poursuite de ce travail les recommandations suivantes :

Protection prioritaire des secteurs vulnérables dans l'ordre d'empêcher la pollution supplémentaire de secteurs à plus déjà pollués ;

Adaptation de la méthodologie aux conditions algériennes ;

Testé la méthode sur des territoires sélectionnés ;

Création d'une banque de données et d'informations centralisées pour la gestion des aquifères ainsi qu'un réseau de communication avec les différents centres de recherche.

Réaliser des travaux plus approfondis pour détecter les erreurs, toujours possibles, qui peuvent se présenter sur la carte de vulnérabilité SINTACS.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE:

ABH - CZ, 2003 a. Mission I : *Ressources en eaux et en sols*. Schéma-Directeur d'Aménagement Hydraulique de la wilaya de Chlef. Ministère des ressources en eau, 59p.

ABH - CZ, 2003 b. Mission II : *Evaluation de la demande en eau*. Schéma-Directeur d'Aménagement Hydraulique de la wilaya de Chlef. Ministère des ressources en eau, 67p.

ABH - CZ, 2004 – Cadastre Hydraulique du bassin hydrographie du Cheliff-Aval du barrage de Boughzoul – Première partie : Haut et moyen Cheliff, 62 p.

ABH - CZ, 2004 – Cadastre Hydraulique du bassin hydrographie du Cheliff-Aval du barrage de Boughzoul – Deuxième partie : Bas Cheliff et Mina, 52 p.

ABH-CZ, 2000. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. *Volume 1,2 et 3.*

AHOUSSE K.E, SORO N, KOUASSI A.M, SORO G, KOFFI Y.B, ZADE G.P.S. (2010). Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des métaux lourds (Cu²⁺, Mn²⁺, Zn²⁺, Pb²⁺) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 4(5): pp 1753-1765.

ALBINET. M et MARGAT. J, 1975. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine-*Groundwater Pollution - Symposium - Pollution des Eaux Souterraines*. Actes du Colloque de Moscou.

ALLER L, BENNET T, LEHR J.H, PETTY R.J ET HACKETT G. (1987). Drastic, a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using Hydro Geological Settings. *Environmental Research*, 36, 455p.

AL-SHATNAWI A.M, EL-BASHIR M.S, BANI KHALAF R.F ET GAZZAZ N.M. (2015). Vulnerability mapping of groundwater aquifer using SINTACS in Wadi Al-Waleh Catchment, Jordan, *Arab J Geosci*, Springer, 13p.

ANDRZEJ. J, et al (2007). GROUNDWATER VULNERABILITY ASSESSMENT AND MAPPING; Selected papers from the Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping International Conference, Ustron, Poland, 2004. Taylor & Francis Group, London, UK 2007.

Barbin. V Et Al 2002. "TRANSPOLL" : Transfert et redistribution des polluants vers les eaux superficielles et souterraines dans le bassin-versant de la Vesle (Marne). *Orléans*.

Blum. A, 2004. L'état des eaux souterraines en France-Aspects quantitatifs et qualitatifs. *Institut français de l'environnement, Etudes et travaux n°43 France. P 36*

Boudjaltia. M, 2000. Evaluation et la cartographie de la vulnérabilité des nappes Souterraines A La Pollution Par La Méthode DRASTIC - Cas De La Nappe Du Moyen Cheliff-

Boulaine J. (1957). Etude des sols des plaines du Cheliff, Etude régional n°07.

Bradai. A, 2006, évaluation de la qualité des eaux souterraines de la plaine du moyen chélif occidental, application de la géostatistique, mémoire de magister (CUKM).

BRGM, 2005. Cartographie de la VULNERABILITE intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais (BRGM/RP – 54238 - France)

Buil. N, 1992. Modélisation tridimensionnelle du transport de polluants dans les écoulements à surface libre .Thèse pour obtenir le titre de Docteur de l'Université Claude Bernard – Lyon1.

CASTANY. G, 1982. Principes et méthodes de l'hydrologie, DUNOD, 342p.

Civita M. (1990). La valutazione della vulnerabilita degli acquiferi all'inquinamento (Assessment of aquifer vulnerability to contamination). Protezione e gestione delle acque

Coollet. C, 1994. Système d'information géographique en mode image, TEC et DOC.

Dider. A, 1996. Base de données : du schéma conceptuel au schéma physique, BRGM, 422p

Environnement Earth Science, p 2263.

Ezziane R et Chahma A 2002. L'utilisation du SIG dans l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité des nappes souterraines à la pollution par la méthode DRASTIC- cas de la nappe du moyen chellif occidental-, mémoire d'ingénieur d'état UHBB.

Ficher. M, 1993, conception de base de données dans les SIG, DUNOD, 321p.

Hamza M.H et al., 2004. Evaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle par les pesticides, de la nappe côtière alluvionnaire de la plaine de Metline-Ras Jebel-Raf Raf, Nord-est tunisien, selon la méthode DRASTIC appliquée par les systèmes d'information géographique. L'ASSAINISSEMENT EN ALGERIE : Historique et évaluation. LA HOUILLE BLANCHE/N° 5-2004. P 86-94.

Hamza M.H, Ayed. A, Alain Et Ramiro. R, 2007. Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline–Ras Jebel–Raf Raf (Nord-est tunisien). Géoscience 339 (2007) 493–505

Hennia K, 2006, contribution à la gestion qualitative des eaux souterraine dans les zones semi-arides, application au moyen chéiff occidental, thèse de magistère (UHBCH).

Henri J. Schoeller 1975. La pollution des eaux souterraines-Groundwater Pollution - Symposium - Pollution des Eaux. Souterraines (Actes du Colloque de Moscou, Août 1971): IAHS-AISH Publ. No. 103.

Kachi S, et al 2007. Vulnerability and Pollution Risks in the Alluvial Aquifer of Tebessa-Morsott. American Journal of Environmental Sciences. 2007 Science Publications

KOUAKOU S DEH, KOUAME K.J, SALEY M.B, TANO K. JJ, ANANI E.K.A , SIGNO K. H, JOURDA J.P et BIEMI J. (2012). Evaluation de la vulnérabilité spécifique aux nitrates (NO₃) des eaux souterraines du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire), Int. J. Biol. Chem. Sci.6(3), pp 1390-1408.

MAPA (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation), 1998. Guide d'application-Examen des projets de distribution au Québec d'eau embouteillée importée générales; P 29.

MATINI L, MOUTOU JM, KONGO-MANTONO M.S. (2009). Evaluation hydrochimique des eaux souterraines au Sud-ouest de Brazzaville, Congo. *Afr. Sci.*, 5(1): pp 82-98.

Mato, Rubhera R.A.M 2002. Groundwater Pollution in Urban Dar es Salaam, Tanzania Assessing Vulnerability and Protection Priorities Eindhoven: Technische Universities Eindhoven, P195

Miliana, Mémoire Master II en Hydrogéologie, Université de Khemis Miliana, 95p.

NAP, 1993. Ground Water Vulnerability Assessment: Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty; National Academies Press

Oumar A.A et Berbara F. (2014). Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines et de l'analyse de sensibilité, en utilisant un modèle GIS- Based SINTACS, plaine de Khemis

Pornon. H, 1996, Les Sig Mise En Œuvre et application, HERMES, 159p.

Ramade. F, 2000. Dictionnaire Encyclopédique Des Pollutions; Ediscience International.

Ramos J.A, Tapia Silva F.A et Sandoval Montes I. (2011). Analysis of aquifer

ROSEN. L, 1994. A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. Ground Water 32: p.278-285.

RUPERT. MG, 1999. Improvements to the DRASTIC groundwater vulnerability mapping method. U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-066-99, USGS, Reston, VA

Rutharvel Murthy K, Dhanakumar S, Sundararaj P, Mohanraj R Et Kumaraswamy K.(2015). Gis-Based Modified Sintacs Model For Assessing Groundwater Vulnerability to

Pollution in Vellore District (Part of Palar River Basin), Tamil Nadu, India, Springer Earth

SCCIG (sydney coastal council group) 2006. Groundwater management handbook; *A guide for local government* – First Edition; Sydney, 155p.

SCET-AGRI (1), 1985. Hydrologie, hydrogéologie et bilan des ressources, étude de réaménagement et de l'extension du périmètre du moyen chéiff, ministère de l'hydraulique.

SCET-AGRI (3), 1985. Rapport de synthèse, étude du réaménagement et de l'extension du périmètre de moyen Chéiff, ministère de l'hydrologie.

SINAN. M, MASLOUHI. R et RAZACK. M, 2003. Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Application à la nappe du Haouz de Marrakech, Maroc. Management of Water Resources 2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco.15 p.

Soil Conservation Service, 1951. Soil Survey Manual. Agricultural Handbook No. 18, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

SORO G, METONGO SB, SORO N, AHOUSSE KE, KOUAME KF, ZADE SGP ET SORO T. (2009). Métaux lourds (Cu, Cr, Mn et Zn) dans les sédiments de surface d'une

Bibliographie

lagune tropicale africaine : cas de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 3(6), pp 1408-1427.

soterranee : metodologie, *Technologie e Obiettivi*, Marano sul Panaro, 3, p 39-86.

System Sciences, pp 429-453.

TREPANIER. S, 2008. Caractérisation, modélisation et étude de la vulnérabilité de l'eau souterraine contaminée aux nitrates dans un sous bassin de la vallée d'Annapolis. Mémoire Présenté Comme Exigence Partielle De La Maîtrise En Sciences De La Terre. Université Du Québec À Montréal.

vulnerability and water quality using SINTACS and geographic weighted regression,

ZIANE. A et ZAIRI. Y, 2008. Apport des SIG dans l'étude d'impact pour le choix d'un site de décharges public - Cas : communes de la wilaya de Chlef. Mémoire d'Ingénieur (UHBCH).

ANNEXE

ANNEXE



Ministère des Ressources en Eau
Agence du bassin hydrographique Chelif- Zahrez

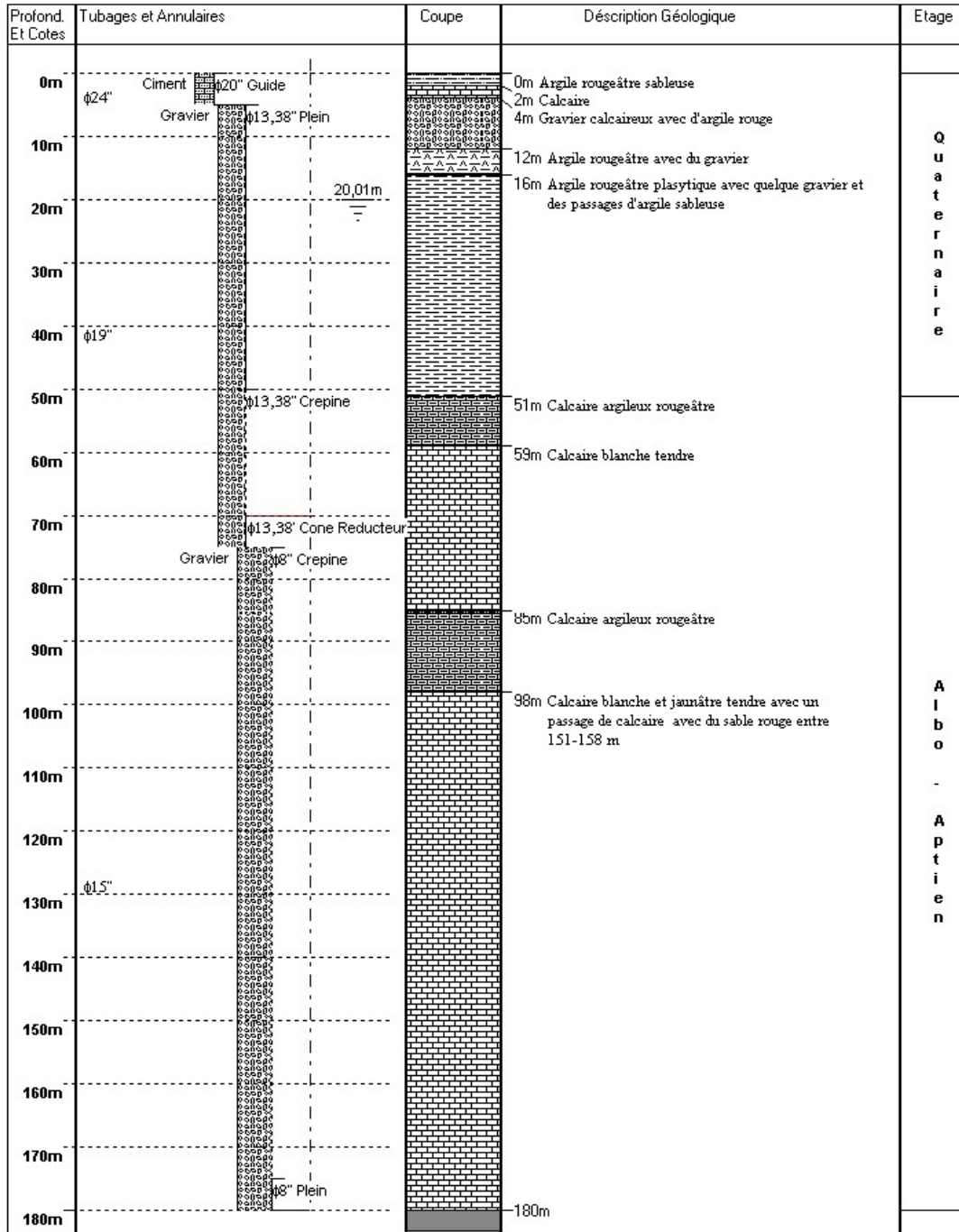
F01230221B0006

Fichier du Forage :

X: 362 500 m
Y: 309 850 m
Z: 95 mNGA

Nom : BOUACHERIA EXPLO AEP
N° Carte : 105
N° Forage : 938

Formation captée : -
Débit d'exploitation(l/s) : -
Rabat. d'exploitation(m) : -



WADEX

Date Informatique - (03).77.96.50.

Figure 7. Forage situé à Site Bouachria Boukadir