

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



FACULTE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

Spécialité : Ressources en eau
Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de

MASTER 2

THEME

**Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des
nappes d'eau souterraine par les méthodes
DRASTIC et SINTACS.**

Application à la nappe de Dakhla (Laghouat)

Réalisé Par:

- **Kissari Djamel Eddine**
- **Bellakhdar Samira**

Encadré Par:

- Mr Bouache Mohamed

Soutenu publiquement devant le jury :

Mr Hamlat Abdelkader

Président

Mr Tadj Walid

Examineur

Mr Stamboul Madani

Examineur

Année Universitaire : 2016/2017

Remerciment

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos vifs

remerciements tout d'abord :

ALLAH le tout puissant pour nous avoir donné la santé, le courage Et la volonté d'étudier, et la

force de réaliser ce travail.

*Notre Encadreur : Mr BOUache Momammed Maître assistant chargée de cours à l'université de
Ammar Thelidji, pour ses orientations, ses précieux conseils et sa contribution dans l'élaboration de ce
travail.*

Nous tenons également à remercier :

Mr. le chef département de la science technique

Tous nos enseignants du Département d'Hydraulique particulièrement.

Et Tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail.

*Mr. KISSARJ Djamel-eddine
Mm. BELLAKH DAR Samira*

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*Mon chère marie qui ma encouragé et
Soutenue dans mon travail*

*Mes parents qui m'ont toujours apportée
Son amour et son affection*

*Mes très chères enfants : Saad , Ibrahim et Souheib
Mes très chères sœurs
Mes très chers frères
Toute ma belle famille*

*A tous les enseignants de l'hydraulique,
Et tous les étudiants de l'hydraulique, en particulier
La promotion 2016/2017*

A toutes personnes utilisant ce document pour un bon usage.

Mme : Bellakhdar Samira

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE1 : pollution des eaux souterraines	
I.1 Introduction.....	02
I.2- Classification des nappes aquifères.....	02
I.3- Sources et origines de la pollution:	07
I.4- Epuration naturelle des eaux contre la pollution:	09
I.5- Conclusion:.....	10
CHAPITRE 2 : Les SIG pour l'évaluation de la vulnérabilité des nappes	
II.1- Introduction:	11
II.2- Notions Générales de vulnérabilité	11
II.3- Origine de la vulnérabilité des eaux souterraines:	12
II.4- Différents types de la vulnérabilité.....	13
II.5- Critères de la vulnérabilité.....	13
II.6- Cartographie de la vulnérabilité.....	15
II.6.1- Utilisation des SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité des nappes.....	15
II.6.2- Utilité des cartes de vulnérabilité.....	16
II.6.3- Méthodes de cartographie de la vulnérabilité.....	16
II.7- Conclusion.....	21
Chapitre III: Présentation de la région d'étude	
III.1- Situation Géographique.....	22
III .2 -Contexte climatique.....	23
III.3 –Température.....	23
III.4-précipitation	23
III.5-Le Vent.....	24
III.6- Synthèse bioclimatique.....	25
III.6.1- Diagramme ombrothermique de GAUSSEN.....	25
III.6.2- Climagramme d'EMBERGER.....	26
III .6.3- Evaporation.....	27
III .6.4- Evapotranspiration.....	27
III.6.5- Evapotranspiration potentielle (ETP).....	27
III .6.6-Evapotranspiration Réelle (ETR).....	28
III.7- Discussion des résultats.....	32
III.8- Conclusion	33
III. 10- Hydrographie.....	36
III. 10.1- les oueds.....	37
III. 11-Géologie et Hydrogéologie de la zone d'étude	38
III. 11.1-La Géologie.....	38
III. 11.2- La stratigraphie.....	41
III.11.3-Tectonique.....	41
III.11.4- Conclusion.....	43
III. 11.5- Hydrogéologie	44
III.11.6- CONCLUSION.....	54
CHAPITRE IV : Matériel Et Méthodes	
IV.1- Méthodes de vulnérabilité intrinsèque utilisées dans la région d'étude.....	55

Sommaire

IV.1.1- La méthode DRASTIC.....	55
IV.1.2- La méthode SINTACS.....	59
CHAPITRE V	
V.1-Introduction	61
V.2- Evaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC.....	61
V.2.1-Traitement des paramètres DRASTIC.....	61
V.2.2-Carte de vulnérabilité DRASTIC.....	65
V.2.3- Discussion	68
V.2.4- Sensibilité Du Modèle DRASTIC	68
V.3- Evaluation de la vulnérabilité par la méthode SINTACS.....	69
V.4- Discussion.....	72
CONCLUSION GENERALE.....	73

Liste des tableaux

Tableaux		Page
Tableau 01	Méthode d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution et informations de base relative	18
Tableau 02	La température moyenne annuelle de la zone d'étude	23
Tableau 03	Précipitations mensuelles de la région de Laghouat	23
Tableau 04	Force du vent à la station de Laghouat période (1990 -1996)	24
Tableau 05	Fréquence des directions du vent à la station de Laghouat période (1913-1938)	24
Tableau 06	Nombre moyen de jours de Sirroco (1913-1938)	24
Tableau 07	Humidité relative moyenne aux stations de Laghouat (1913-1938) et (1990-1993)	25
Tableau 08	Evaporation mensuelle et annuelle à la station de Laghouat (19732-1980)	27
Tableau 09	Evapotranspiration potentielle en mm (Période 1913 - 1937)	28
Tableau 10	ETR annuelle en mm	31
Tableau 11	Loghydrogéologique synthétique	46
Tableau 12	Poids des paramètres dans la version DRASTIC standard	56
Tableau 13	Cotes accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC	58
Tableau 14	Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode	60
Tableau 15	Equation de Williams et Kissel (1991)	62
Tableau 16	Les classes de la pente et les cotes	63
Tableau 17	La conductivité hydraulique et les cotes attribuées dans la zone d'étude	64
Tableau 18	Le classement des indices de vulnérabilité de la méthode DRASTIC	66
Tableau 19	Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SINTACS	69

Liste de figures

Figures		Page
Figure 01	Les différentes nappes d'eau souterraines	02
Figure 02	Echange entre eaux de surface et souterraines	06
Figure 03	Courbes isopièzes incurvées vers l'amont	06
Figure 04	Courbes isopièzes vers l'aval	07
Figure 05	différentes sources de contamination des eaux souterraines en milieu urbain	08
Figure 06	Modèle « origine – écoulements – cible »	12
Figure 07	Situation géographique de la zone d'étude	22
Figure 08	Diagramme ombrothermique de GAUSSEN de la région de Laghouat	26
Figure 09	le diagramme de Wundt pour la station de Laghouat	30
Figure 10	Abaque de Verdeil	31
Figure 11	Graphe représentant le bilan hydrique par la méthode de THORNWAITE station de Laghouat (1990-2011)	32
Figure 12	Topographie de la zone d'étude	34
Figure 13	Coupe géomorphologique schématique NW-SE de la cuvette de Dakhla	35
Figure 14	carte des bassins versants de l'Algérie du Nord	36
Figure 15	carte de l'Atlas Saharien dans son cadre régional	38
Figure 16	coupe géologique a travers la région de Laghouat	39
Figure 17	La carte Géologique de la cuvette de Dakhla	40
Figure 18	coupe à travers les montagnes de l'atlas saharien	42
Figure 19	Schéma structurale de la zone d'étude	45
Figure 20	Conditions d'émergence de la source d'Ain Tlélis	47
Figure 21	Aquifère des calcaires du Portlandien Inférieur	48
Figure 22	Conditions d'émergence de la source d'Ain El M'adi	50
Figure 23	Carte piézométrique de la région de Hamda et Dakhla	52
Figure 24	coupe lithologique et technique du forage Fh1 Hamda	53
Figure 25	Schéma représentant les paramètres intervenants dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par la méthode DRASTIC	56
Figure 26	Carte de répartition spatiale de l'indice DRASTIC	65
Figure 27	Carte des classes de la vulnérabilité -DRASTIC	67
Figure 28	Carte de répartition spatiale de l'indice SINTACS	70
Figure 29	Carte des classes de vulnérabilité - SINTACS	71

Abréviations

A.N.R.H : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

DRE : La Direction Des Ressources En Eau.

CI : Continental Intercalaire.

CT : Complexe terminal.

P : Précipitations.

T : Température.

T max : Température maximale.

T min : Température minimale.

T moy : Température moyenne.

SINTACS :Soggiacenza, Infiltrazione, Azione del Non saturo, Tipologia della Copertura, Acclività della Superficie Topographica, Carratteri Idrogeologici dell'Acquifero

DRASTIC : Depth to water, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of the vadose zone, hydraulic Conductivity of the aquifer

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE :

Les eaux souterraines représentent une importante ressource exploitée pour la consommation humaine et pour l'utilisation dans les domaines agricoles et industriels. Ces eaux sont souvent exposées à la contamination par des polluants de différente nature: biologique: les bactéries, virus. Chimique et organiques (chlorures, nitrates, métaux lourds pesticides, solvants divers) ou physique : radioactivité, à travers le sol jusqu'à la zone non saturée.

Et puisque le gouvernement Algérien a tracé ces dernière années des grands projets, surtout dans le domaine agricole vis-à-vis l'austérité (causé par la baisse des prix du pétrole), les scientifiques sont se trouvé devant l'obligation d'un travail prospectif avant d'entamer ces grands projets d'investissent, ce travail est basé au premier lieu sur la protection des ressources en eau. Qui sont estimées les principales ressources du développement socio-économique, cette protection qui sera contre la contamination due aux activités anthropiques (de nature agricole prévue) génératrices des polluants dans la région de Edakhla - Laghouat - dont la majorité des eaux souterraines circulent sous le système alluviale.

Pour faire face à ce danger, une prévision du comportement des systèmes aquifères suite à une contamination est recommandée afin d'assurer un aménagement et une gestion des territoires qui permettent la préservation de la qualité de cette ressource. Il est donc logique d'avoir recours à l'information géographique, sous forme de cartes thématiques numériques, afin d'éclairer la prise de décision en matière de gestion intégrée.

Le présent travail est réalisé dans le but d'établir un lien entre les domaines de recherche liés à l'estimation de la vulnérabilité et des risques de pollution des eaux souterraines couplée aux SIG en proposant une réflexion méthodologique sur l'adaptation de l'estimation et de la cartographie de la vulnérabilité afin de déduire la méthode la plus appropriée aux conditions régionales. Les cartes éditées sont destinées à assister les agents de l'état et des collectivités territoriales chargés de l'application de la politique environnementale, et notamment les inspecteurs des installations classées. Elles s'adressent aussi à tous les lecteurs des études d'impact ou revues environnementales de sols potentiellement pollués, afin d'évaluer la possibilité d'un risque touchant les ressources en eau. Plusieurs méthodes ont été développées pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères. Il s'agit des méthodes DRASTIC, SINTACS , GOD , EPIK,...dans notre travail seules les deux premières méthodes ont été adoptées.

Ce mémoire s'articule sur les chapitres: la pollution des eaux souterraines, les SIG pour l'évaluation de la vulnérabilité, la présentation de la région d'étude, matériel et méthodes et résultats et discussions.

Chapitre I : Pollution Des Eaux Souterraines

I.1- Introduction :

L'eau douce ne représente que 03% des ressources en eau mondiale. 97% des eaux douces contenues sur terre, hormis les glaces qui ne sont pas directement utilisables, sont représentées par les eaux souterraines. La croissance des pays en voie de développement et le confort des pays développés créent une demande toujours plus forte d'eau douce à des fins domestiques, agricoles ou industrielles. Cette demande est assurée pour 20 % par les eaux souterraines dans le monde. Les eaux souterraines revêtent donc un caractère économique très fort. Cette proportion est appelée à croître en raison de la pollution des eaux superficielles (L'Vorich, 1974; Guillemain & Roux, 1994; Margat, 1996; Renarda, 2002; Datry, 2003).

I.2- Classification des nappes aquifères :

On appelle aquifère un corps (couche, massif) de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantité d'eau appréciable (Castany, 1998; Beauchamp, 2006).

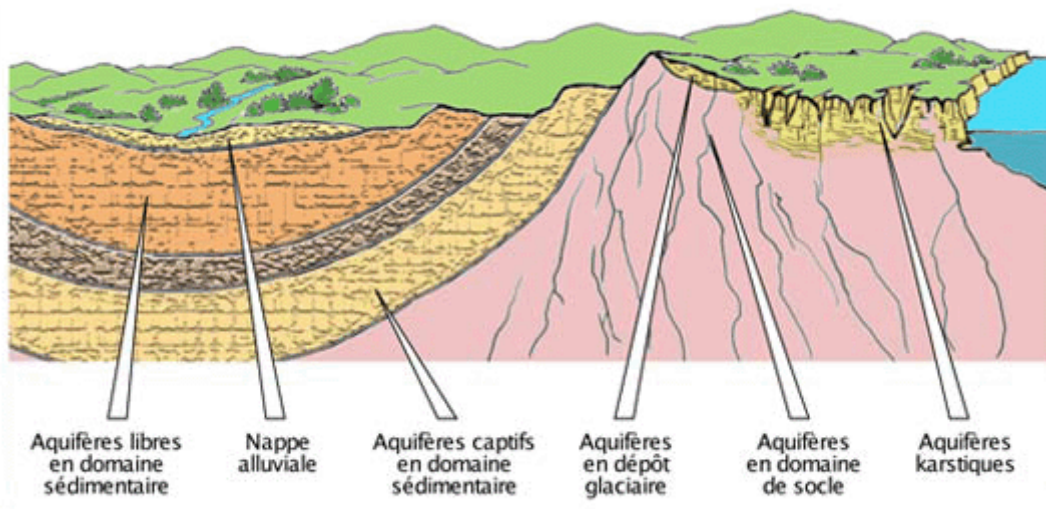


Figure 1 : Les différentes nappes d'eau souterraines
Nappe – Agence de L'eau Rhône méditerranée

Certaines formations géologiques sont suffisamment poreuses ou fissurées pour contenir de l'eau. On parle alors de formations aquifères (éthymologiquement « roche qui contient de l'eau »). Selon la nature géologique des terrains, on peut distinguer différents types aquifères :

1. Les aquifères en domaine sédimentaire :

Ces systèmes sont caractéristiques des bassins sédimentaires, il s'agit de roches sédimentaires poreuses ou fracturées (sables, grès, calcaires, craie) jadis déposées en vastes couches. Ces aquifères peuvent être libres ou captifs selon qu'ils sont ou non recouverts par une couche imperméable.

Dans un aquifère libre, la surface supérieure de l'eau fluctue sans contrainte et la pluie efficace peut les alimenter par toute la surface.

Dans un aquifère captif, une couche géologique imperméable confine l'eau. L'eau est alors sous pression et peut jaillir dans des forages dits artésiens lorsque la configuration s'y prête. L'alimentation ne peut se faire que par des zones d'affleurement limitées ou par des communications souterraines. Les nappes captives sont souvent profondes.

2. Les aquifères en domaine de socle :

Ils correspondent aux roches cristallines ou cristallophylliennes (granites, gneiss et autres roches métamorphiques...) bien représentées dans le massif central et certaines zones des Alpes, Pyrénées et Corse, l'eau est contenue et circule dans les franges d'altération et les fissures et fracture de la roche. Il s'agit donc généralement de petits systèmes discontinus.

3. Les aquifères karstiques :

Les aquifères karstiques se rencontrent dans les formations calcaires (par exemple les plateaux de Bourgogne, du Languedoc, Jura, Préalpes...). Les eaux en dissolvant le calcaire à la faveur des fissures préexistantes constituent des vides dans lesquels peuvent s'écouler les eaux. Ces vides peuvent atteindre de grandes dimensions (gouffres, cavernes). Dans ces conduits les eaux peuvent cheminer rapidement et constituer des cours d'eau souterrains. Aux points de sortie les sources présentent des débits souvent variables dans le temps (leur valeur varie parfois de 1 à 100 au cours de l'année).

4. Les aquifères des dépôts glaciaires :

Ces dépôts à la structure sédimentologique complexe composés de matériaux de granulométrie très variée sont à l'origine de petits aquifères très compartimentés localisés dans les anciens ombilics glaciaires et cirques morainiques. Ils sont par conséquent, en général peu développés en superficie mais peuvent, par contre, être épais, tout particulièrement derrière les verrous glaciaires ou dans d'anciens sillons sous ou péri-glaciaires.

5. La nappe alluviale :

Les systèmes alluviaux sont une partie de l'hydro système fluvial, défini comme un ensemble fonctionnel en interaction avec un cours d'eau, grâce a des flux de matières (eau, solutes, charge solide), d'organismes et d'énergie (AMOROS et PETTS, 1993).

La nappe alluviale est une nappe libre qui circule dans les alluvions de la rivière, et qui se trouve à une profondeur faible, ce qui facilite son exploitation par des puits et forages (LENOBLE, 1995).

Des rythmes hydrologiques différenciés (basses eaux, hautes eaux, crues inondantes) entraînent une structuration d'espaces et de volumes emboités (chenal d'étiage, lit de pleins bords, champ d'inondation, aquifère alluvial). Ils induisent également une dynamique géomorphologique qui assure le renouvellement des biotopes et conditionne pour partie le développement des biocénoses (TREMOLIERES et *al*, 2002).

Les alluvions déposées par les cours d'eau, sont généralement, accompagnées d'une nappe alluviale, dont la qualité de l'eau est meilleure que celle du cours d'eau, du fait qu'elle a été filtrée par le sous-sol. Cette eau est utilisée comme eau potable et en agriculture (BANTON et BANGOY, 1999).

5.1 Caractéristiques de la nappe alluviale :

Elle est caractérisée par la porosité du milieu qui détermine l'espace disponible pour l'eau, ses dimensions, sa hauteur, la vitesse et sens d'écoulement. Cette nappe est délimitée par des alluvions secs en haut (perméables) et un substratum imperméable en bas qui est généralement l'argile (LENOBLE, 1995).

5.2 Alimentation des nappes alluviales :

L'alimentation des nappes alluviale dans les zones arides se fait par les eaux de précipitation, en périodes de crue ; la submersion des alluvions par les eaux de crue permet la pénétration de l'eau dans les couches géologiques de la terre, en assurant une recharge des nappes alluviales.

En effet, l'alimentation en eau des nappes alluviales dans les régions arides est intermittente et résulte des pertes de transmission des eaux de crues dans les lits desselles des Oueds. Le volume d'eau alimentant la nappe dépend principalement de la largeur du périmètre humidifié et la durée de submersion. On note aussi, qu'une partie importante des eaux de crues est perdue suite aux variations de débit en amont (SORMAN et ABDULRAZZAK, 1993).

Néanmoins, en milieu aride et semi-aride, la zone non saturée joue un rôle considérable dans les échanges nappe-cours d'eau (DAGES et *al*, 2008).

La recharge des nappes alluviales se fait par les eaux de crues occasionnelles et ne concerne qu'une partie du réservoir potentiel. L'amplitude du renouvellement de la nappe par rapport aux pertes de transmission des lits dépend du volume de la crue et de la durée pendant laquelle le sol reste humide, ainsi que des caractéristiques physiques du sol (SORMAN et ABDULRAZZAK, 1993).

D'après les mêmes auteurs, il y a toujours une perte d'une partie des eaux de la nappe, soit par les fuites, ou bien par le pompage exagéré. Cependant, une recharge artificielle de la nappe est possible par la confection de barrages d'écrêtement, permettent un contact de l'eau avec les alluvions, suffisamment important pour l'infiltration d'un volume d'eau dans les alluvions en aval.

5.3 Relation nappe alluviale et cours d'eau :

Il y'a toujours une relation entre nappe alluviale et cours d'eau (rivière, oued ...), de sorte que : soit la nappe soutien le cours d'eau ou inversement c'est la rivière qui alimente la nappe.

Cette relation peut être identifiée par l'observation de la variation de charges près de la rivière ; s'il y'a une décroissance des charges vers le cours d'eau, cela signifie qu'on est en situation d'un écoulement de la nappe vers la rivière. Si par contre, les charges sont croissantes, on parle d'un écoulement rivière – nappe (BANTON et BANGOY, 1999).

Le mouvement des eaux d'alimentation est lie a certaines propriétés du sol et de l'eau a savoir ; le coefficient de conductivité hydraulique, la pression et la structure du sol. L'infiltration des eaux de rivières et de lacs peut aussi contribuer de façon significative à la recharge de la nappe. Latéralement, d'autres aquifères peuvent alimenter la nappe. De même, les écoulements de la nappe en aval peuvent alimenter les courants d'eau et les sources (BANTON et BANGOY, 1999).

Ces échanges entre nappe et cours d'eau constituent des conditions aux limites dont la quantification est nécessaire et permet la compréhension de la dynamique du système hydrogéologique. Les gradients de charge hydraulique entre les eaux de surface et les eaux souterraines, conditionnent ces échanges, car la différence de charge hydraulique indique le sens des échanges entre nappe et cours d'eau (BANTON et BANGOY, 1999).

Ainsi, si le plan d'eau de la rivière est supérieur a la surface de la nappe libre, la rivière alimente la nappe (saison sèche), et dans le cas inverse, elle draine la nappe (saison humide). Ce phénomène d'échange entre eaux superficielles et eaux souterraines est illustre par la figure 02.

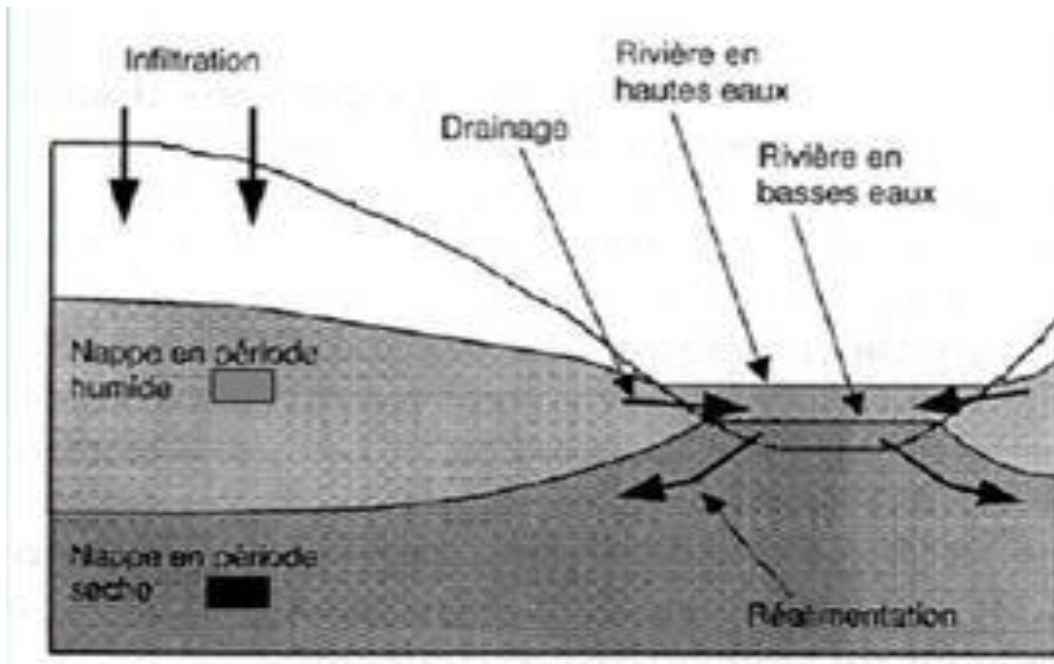


Figure 02: Echange entre eaux de surface et souterraines (BANTON et BANGOY, 1999).

Les relations entre un cours d'eau et sa nappe alluviale sont identifiées par les cartes de la surface de la nappe (cartes isopièzes ou courbes d'égale altitude de la surface de la nappe), qui sont tracées à partir de mesures du niveau de la nappe dans les puits et forages. Les figures 03 et 04 montrent les deux situations qui peuvent avoir lieu entre la nappe alluviale et la rivière :

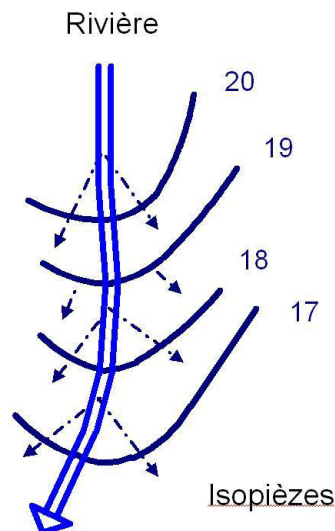


Figure 03 : Courbes isopièzes incurvées vers l'amont, la rivière alimente la nappe (LENOBLE, 1995).

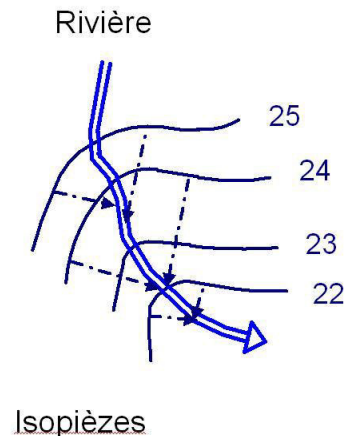


Figure 04 : Courbes isopièzes vers l'aval, la nappe alimente la rivière (LENOBLE, 1995).

I.3- Sources et origines de la pollution:

La qualité naturelle des eaux souterraines peut être altérée par l'activité humaine et inhérente au développement de ces activités. Les sources potentielles de pollution des eaux souterraines (Figure 01) se sont multipliées au cours du siècle dernier (Added et Hamza, 1999; Renarda, 2002; Danielopol et al., 2003 in Datry, 2003).

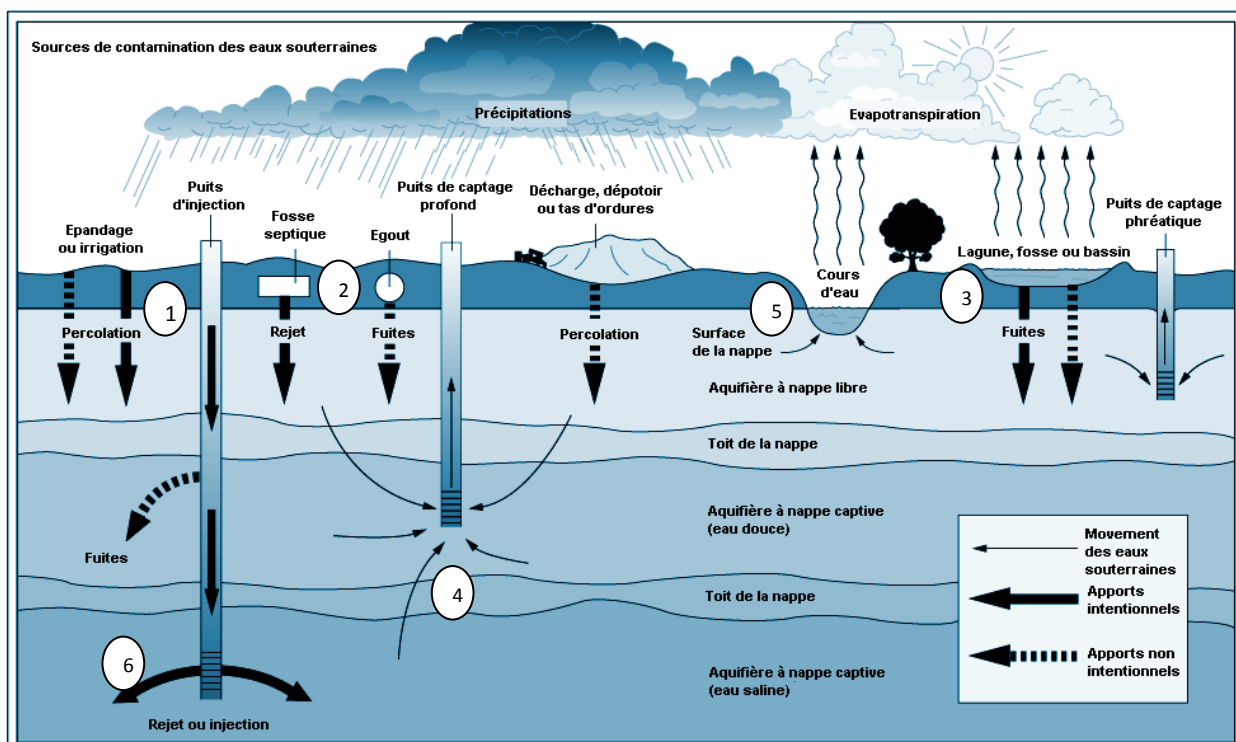
On parle d'une eau polluée lorsqu'elle perd au moins une de ses fonctions ou un de ses usages et elle devient impropre à répondre à la demande d'utilisation comme elle peut aussi présenter un danger pour l'environnement. Leur degré de pollution est apprécié par la mesure de l'écart entre le "bruit de fond" qui est la teneur en substances minérales dissoutes d'origine naturelle (géologique) caractérisant les eaux souterraines et leurs caractéristiques physico-chimiques (Mardhel, 2001 in Bézèlgues et al. , 2002). D'après Lecomte (1998), Renarda (2002), De Villers et al. (2005), El Tabach et al. (2005) et Baali et al. (2007), la pollution des eaux peut être:

- **temporaire ou chronique:** l'émission exceptionnelle de matière polluante à la suite d'un incident peut entraîner un transfert à la nappe et sa pollution dont la durée dépend de son pouvoir d'auto épuration et de sa vitesse de percolation. Les pollutions chroniques sont plus insidieuses et dommageables; moins spectaculaires, elles peuvent passer inaperçues.
- **Pollution ponctuelle et pollution diffuse:** Le polluant émis sur une faible surface n'affectera qu'un secteur limité de la nappe, qui pourra s'étendre par diffusion. Seuls les captages à proximité de la zone polluée et en aval seront affectés. Selon la densité et la solubilité du polluant, la zone polluée sera circonscrite ou diffuse, à la surface ou à l'intérieur de la nappe.

La pollution des eaux a quatre origines différentes (Melloul et Collin, 1994; Castany, 1998; Feuillette, 2001; Datry, 2003; Renarda, 2002; Babiker et al., 2005), qui sont:

CHAPITRE I : Pollution des eaux souterraines

- **Origine domestique:** C'est le cas par exemple des puits perdus, d'assainissement individuel avec infiltration dans le sol mal conçu ou mal dimensionné, des stations d'épuration urbaines surchargées,...etc.
- **Origine industrielle:** Les polluants d'origine industrielle sont très variés selon le type d'activité: substances organiques banales, produits organiques de synthèse, hydrocarbures, sels minéraux, métaux lourds,...etc. Les pollutions sont exceptionnelles (incident dans un procédé industriel) mais encore trop souvent chroniques (fuite de réservoirs, de canalisations,...etc.).
- **Origine agricole:** La pollution est étendue dans l'espace et dans le temps; elle est chronique et concerne de grandes surfaces. En effet, les pratiques actuelles des cultures et de l'élevage influencent fortement le régime et la qualité des eaux.
- **Origine urbaine et routière:** Les risques de pollution apparaissent à la construction des réseaux routiers puis à leur exploitation. En ville, on trouve, en plus des polluants de la voirie, la contamination possible des nappes par les eaux usées, les fuites de cuves de carburants, les cimetières,...etc.



1) Dépôts en surface; 2) Dépôts dans la zone non saturée; 3) Recharge artificielle par des effluents de STEP ou d'origine pluviale; 4) Contamination croisée entre les différentes aquifères; 5) Recharge par un cours d'eau pollué; 6) Injection de contaminants dans les aquifères profonds.

Figure 05: Les différentes sources de contamination des eaux souterraines en milieu urbain
(American publique Health-APHA-1995)

I.4- Epuration naturelle des eaux contre la pollution:

- **Rôle épurateur du couvert végétal:** Le couvert végétal agricole ou forestier agit par ses prélèvements cycliques dans la couche occupée par les racines: stockage dans la biomasse puis restitution au sol par dégradation. La déforestation, le retournement des prairies libèrent une quantité importante d'azote. Les cultures d'hiver permettent de stocker l'excès d'azote, donc à éviter son transfert à la nappe (Beraud, 2001; Beauchamp, 2002; Renarda, 2002).
- **Rôle du sol:** Les sols constituent un puissant moyen d'épuration et de recyclage des eaux. Les argiles, les hydroxydes et la matière organique adsorbent les cations (Ca, Mg, K, Na, métaux lourds) et certaines molécules organiques. Le sol constitue un système accumulateur de substances très diverses. L'adsorption moléculaire et la rétention des micro-polluants organiques dans les sols sont plus ou moins forte et plus ou moins réversible. La nature de la molécule détermine son pouvoir de rétention. Le contenu microbiologique de sol peut l'épurer de ses substances indésirables: minéralisation des composés azotés, dénitrification, dégradation des micropolluants organiques (pesticides). Les germes pathogènes introduits dans le sol sont éliminés quand les conditions de survie sont défavorables (Beauchamp, 2002; Renarda, 2002).
- **Rôle protecteur des berges des cours d'eau:** Les dépôts vaseux situés au fond des cours d'eau et latéralement à proximité de la berge, riches en bactéries, sont le siège du processus de biodégradation des hydrocarbures, par exemple, et de l'accumulation des métaux lourds (Zn, Pb, Cd, Mn) qui se fixent sur les particules argileuses des alluvions (Beauchamp, 2002; Cazaux, 2007).
- **Autoépuration biologique des eaux souterraines:** Les organismes vivants et non toxiques (bactéries, petits invertébrés) sont présents dans les eaux souterraines même à grande profondeur. Ils peuvent métaboliser les polluants introduits dans la nappe. Les polluants organiques toxiques comme les polychlorobiphénols (PCB) sont lentement transformés. Les nitrates sont détruits en milieu anaérobie (cas des nappes captives) (Beauchamp, 2002; Renarda, 2002; Renardb, 2002).

I.5- Conclusion :

Les sols alluviaux sont des sols peu évolués d'apport fluvial (fluvisols), dont l'appellation diffère selon la classification. Ces sols sont fertiles, riches en éléments minéraux et caractérisés par la présence d'une nappe alluviale, ce qui explique la concentration de l'activité agricole dans ces sols.

En zones arides, la recharge de la nappe alluviale se fait essentiellement par des eaux de crues occasionnelles. C'est une nappe libre et peu profonde qui est en contact permanent avec un cours d'eau non permanent. Cela permet des échanges entre les deux.

Le sens d'écoulement de la nappe peut être identifié par le tracé de la carte piézométrique. Il s'agit des mesures du niveau de la nappe dans des puits et forages. La présence d'eau dans les zones arides a permis l'installation d'oasis, qui sont des écosystèmes particuliers, convenables pour la survie des populations, des espèces végétales et animales. Les ressources hydriques dans ces oasis sont les eaux souterraines, présentes sous formes de nappes profondes ou superficielles telle que la nappe alluviale. Elle caractérise les régions sahariennes à cours d'eau. La présence d'un cours d'eau a permis l'existence de cette nappe, constituant la principale source d'eau potable et d'irrigation, d'où la nécessité de la protéger de toute contamination, parce que avec toutes les défenses naturelles et les conditions hydrogéologiques qui semblent protéger les aquifères contre la pollution, les nappes souterraines ne sont pas à l'abri d'une contamination éventuelle. De ce fait est né le concept de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution.

Chapitre II : Les SIG Pour L'évaluation De La Vulnérabilité Des Nappes

II.1- Introduction:

La prévention contre la pollution des nappes constitue une étape importante dans la gestion des aquifères, à laquelle les scientifiques consentent de plus en plus d'efforts, notamment l'étude de la vulnérabilité des nappes d'eaux souterraines à la pollution. Cette étude permet une meilleure gestion de ces ressources et des interventions convenables dans le cas de contamination. Elle permet aussi de préciser les zones susceptibles d'être contaminées suite à des activités anthropiques. Une fois identifiées, ces régions peuvent être visées avec prudence par les planificateurs et les utilisateurs de la terre (Graillat et al., 1994; Babiker et al., 2004; Hamza et al., 2007).

II.2-Notions Générales de vulnérabilité ;

Afin de comprendre la notion de vulnérabilité il apparaît important de rappeler quelques définitions:

- **Le risque de pollution :** résulte de croisement d'un ou plusieurs Aléas et d'un ou de plusieurs enjeux:

$$\mathbf{R}_{(\text{isque})} = \mathbf{A}_{(\text{léa})} \times \mathbf{E}_{(\text{njeux})}$$

- **Un aléa :** Suppose une approche probabiliste, il s'agit de l'application d'un stress, (une action polluante par exemple) sur un point, un axe ou un espace plus ou moins vulnérable du milieu naturel aux regards des eaux souterraines dans le cadre de cette étude.
- **La vulnérabilité :** Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères; d'autres estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la qualité agro-pédologique des terrains de surface. On résume que la vulnérabilité est une évaluation qualitative des mécanismes de transfert d'un polluant qui repose sur une conceptualisation multicouche du milieu traversé (Margat, 1968; Foster, 1987; Lallemand Barres et Roux, 1989; Civita, 1994; Lallemand Barres, 1994; Robins et al., 1994; Verba et Zaporozec, 1994; Gogu et Dassargues, 1998; Schnebelen et al., 2002; Amharref et al., 2006, 2007; Amharref et Bernoussi, 2007; Cazaux, 2007).

II.3- Origine de la vulnérabilité des eaux souterraines:

D'après Cazaux (2007), le concept de vulnérabilité des eaux souterraines est basé sur un modèle « origine – écoulements – cible ». Ce modèle est repris et détaillé en particulier dans un projet européen traitant de la protection des aquifères, l'action COST620 (Zwahlen, 2003) (Figure 02).

- **L'origine de la contamination:** c'est le lieu d'infiltration du polluant au niveau de la surface du sol. Cette approche ne tient pas compte des pertes ou fuites de réseaux d'eau usée.
- **L'écoulement :** c'est le trajet du contaminant à travers le milieu naturel, c'est à dire sa composante verticale au sein de la zone non saturée. Si l'objet de la protection est le point de captage d'eau (puits, forage, exutoire), il faut également prendre en compte l'écoulement au sein de l'aquifère.
- **La cible:** est l'eau souterraine faisant l'objet d'une protection. Il peut s'agir soit du toit de la nappe, soit du captage d'eau.

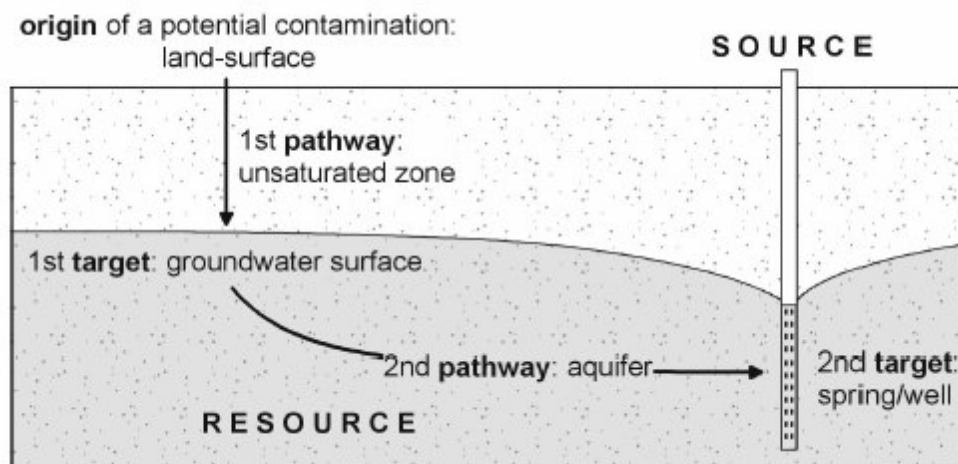


Figure 6 : Modèle « origine – écoulements – cible » (action COST 620, 2004)

II.4- Différents types de la vulnérabilité:

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité : la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (Hamza et al. ,2007).

- **La vulnérabilité intrinsèque:**

C'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. Elle ne tient compte que des facteurs physiques influençant le mouvement d'un polluant vers la nappe (Landreau, 1996 in Cazaux, 2007; Schnebelen et al., 2002).

- **La vulnérabilité spécifique:**

c'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 (Schnebelen et al., 2002 in Bézèlgues et al. ,2002).

Il s'avère judicieux de faire la distinction entre les caractéristiques du milieu et l'existence de sources de pollution. En effet, les premières sont intemporelles, alors que les secondes sont évolutives. Il est donc préférable de distinguer la vulnérabilité intrinsèque, caractérisant la plus ou moins grande facilité de propagation des polluants à travers le milieu naturel, de la vulnérabilité spécifique (Landreau, 1996 in Cazaux, 2007).

II.5- Critères de la vulnérabilité:

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenant soit sur la nature et/ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert. Elle est évaluée en prenant en compte les caractéristiques du sol, de la zone non saturée et de la zone saturée qui contrôlent le comportement des polluants (Bézèlgues et al. ,2002; Cazaux, 2007). Les critères utilisés dans la littérature sont les suivants:

- ✓ **Critères relatifs au sol:**

- ❖ **La topographie :** donne une idée de la partie ruisselée et de la partie infiltrée de l'eau de pluie sur le sol. Plus la pente de la surface du sol est forte et longue, plus le polluant s'éloignera de son point d'émission.

- ❖ **La couverture pédologique :** de par sa nature, sa texture, sa teneur en argile et en matière organique, elle contient les principaux procédés susceptibles d'atténuer une contamination.

✓ **Critères relatifs à la zone non saturée (ZNS):**

- ❖ **L'épaisseur de la ZNS** conditionne le temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe à cause des phénomènes de rétention, de stockage et d'interactions physico-chimiques avec l'encaissant.
- ❖ **L'amplitude de battement de la nappe** joue sur l'épaisseur du recouvrement de la nappe si elle est significative. Dans ce cas, elle devient donc un critère de vulnérabilité.
- ❖ **La perméabilité verticale de la ZNS** influe directement sur le temps de transfert d'un polluant vers la nappe.
- ❖ **La structure de la ZNS** est un critère important de par le faciès, les discontinuités, la texture et la teneur en argile et en matière organique de la ZNS.

✓ **Critères relatifs à la zone saturée:**

- ❖ **Le type de nappe** : une nappe libre s'avère beaucoup plus vulnérable qu'une nappe captive.
- ❖ **Les paramètres hydrodynamiques** : (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emménagement, gradient hydraulique) déterminent le temps de résidence d'un contaminant dans la nappe.
- ❖ **La piézométrie** : conditionne l'évolution des processus hydrodynamiques.
- ❖ **La direction et le sens d'écoulement** : déterminent les cibles atteintes par un polluant dans la nappe.
- ❖ **Le type de système hydrogéologique** à partir de son caractère transmissif, la vulnérabilité du système peut être évaluée.
- ❖ **Les relations nappe - cours d'eau** : peuvent être de deux types, de type drainage ou de type alimentation, donnant ainsi des informations sur la possibilité de contamination.
- ❖ **L'épaisseur de l'aquifère** : détermine le stock d'eau et la dilution du polluant.

✓ **Critères communs à la zone non saturée et à la zone saturée:**

- ❖ **La fracturation** : des discontinuités peuvent jouer le rôle de drains et augmenter la vitesse d'infiltration du polluant dans la nappe.
- ❖ **La recharge** conditionne la quantité d'eau atteignant la zone saturée et dépend de la pluie efficace s'infiltrant dans le sol puis dans la ZNS.

II.6- Cartographie de la vulnérabilité:

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

Elle apparaît nécessaire et incontournable car ce type de carte permet d'identifier très facilement les zones à risques de pollutions potentielles. Elle servira comme un outil d'aide à la décision aux gestionnaires des ressources en eau et permettra également d'orienter l'aménagement du territoire. Les premières cartes ont été réalisées en Europe et aux Etats-Unis au début des années 1970. La rapidité et la précision de la cartographie augmente en utilisant les systèmes d'information géographique (SIG) (Amharref et Bernoussi, 2007; Cazaux, 2007; Duchaine, 1998).

II.6.1- Utilisation des SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité des nappes:

Dans le contexte actuel de la politique de gestion durable des ressources en eau, la prédiction du risque de pollution est d'une importance capitale. La protection à moyen et à long terme de ces ressources s'est donc imposée comme priorité universelle. Cette protection passe d'abord par la délimitation des zones dites *vulnérables* ou à *risque*. La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines est basée sur une analyse multicritère intégrant des données d'origine diverse. Pour cela on a fait appel à l'usage des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG).qui représentent le meilleur outil pour répondre à ce type de problématique. Car ils permettent, par ailleurs, de gérer une multitude d'informations et de générer de nouvelles couches d'informations par le biais de leurs croisements. Ils facilitent également l'analyse et la mise à jour des différentes cartes thématiques. La vulnérabilité des eaux souterraines est utilisée pour traduire la facilité d'accès d'une pollution depuis la surface sol vers les eaux de la nappe (Margat, 1968 ; Albinet et Moniton, 1970 ; Foster, 1987; Robins et al, 1994 ; Civita, 1994 ; Vrba et Zaporozec, 1994 ; Gogu et Dassargues, 1998 et Schnebelen, 2002). Elle dépend en l'occurrence des caractéristiques de la couche de couverture surmontant la nappe. A travers le monde, plusieurs méthodes ont été proposées pour l'évaluation de la vulnérabilité dont la complexité varie d'une approche à l'autre. Le risque de pollution a été considéré comme un croisement entre la vulnérabilité de la zone, la gravité de la pollution et la fréquence de son occurrence (l'aléa).

Par ailleurs, pour élaborer des cartes de vulnérabilité et du risque de pollution des eaux souterraines, il est nécessaire d'estimer un certains nombres de paramètres dépendants de plusieurs facteurs liés aussi bien à la zone d'étude qu'à la nature des polluants. Cela montre la diversité et le nombre important de données à gérer et à manipuler ; afin d'analyser leur répartition spatiale. Pour cela l'apport des SIG est indéniable car leurs souplesses et leurs performances permettent de réaliser aisément de telles opérations. L'utilisation conjointe d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité et d'un SIG permet de tirer partie de leurs avantages respectifs par la complémentarité des deux approches. La méthode permet d'estimer les paramètres déterminant de la vulnérabilité au niveau des points de données et le SIG permet d'extrapoler les résultats à l'ensemble de la zone étudiée et pour ensuite approcher la vulnérabilité et le risque. Le SIG permet de zoner le territoire et de dégager la variabilité spatiale du degré de vulnérabilité et du risque à l'échelle de la zone d'étude.

II.6.2- Utilité des cartes de vulnérabilité:

L'objectif visé par les études de vulnérabilité est l'élaboration d'une carte de vulnérabilité et de développer une approche de caractérisation des aquifères en fournissant des données de base nécessaires à une gestion durable des ressources en eaux souterraines et à la mise en place de plans adéquats de gestion du territoire. De ce fait, la cartographie de vulnérabilité des eaux souterraines est considérée comme un outil d'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire.

En effet, la cartographie permettant d'identifier la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination correspond à un type de carte hydrogéologique spécialisée répondant à un besoin particulier et visant un public varié. Ces cartes peuvent combler des besoins d'inventaire et guider les organismes de réglementation à assurer une gestion globale de l'ensemble de la ressource en eau souterraine d'un territoire. Elles sont utilisées par les organisations intéressées pour se donner les moyens de mieux comprendre les dynamiques écologiques et par conséquent d'assurer la protection des nappes phréatiques. Il est évident que cet outil doit trouver un intérêt au près des aménageurs pour mieux gérer les territoires et réviser leurs schémas d'aménagement.

Il faut noter que la cartographie de la vulnérabilité à la pollution permet d'identifier les zones à haut risque de contamination, indépendamment du type du polluant. Elle devrait en principe conditionner les plans d'occupation des sols ou du moins permettre de cibler les zones où des mesures rigoureuses de protections devraient être adoptées et ceci dans le cadre de la prévision des propagations des polluants à partir d'aménagements ou d'exploitations existantes ou projetées.

II.6.3- Méthodes de cartographie de la vulnérabilité:

Actuellement, il existe plus que 24 méthodes d'évaluation de la vulnérabilité qui pourraient être subdivisé en 3 groupes (Civita, 1994; Vrba et Zaporozec, 1995), In Civita et De Maio, (2004)

1. Méthodes comparatives

Pour les aires d'études étendues et homogènes, elles prennent en considération 2 à 3 paramètres.(complexes hydrogéologiques et création d'évaluation - HCS); Homogeneous area zoning (hydrogeologic complex and setting assessment).

2. Méthodes des relations analogiques (AR) et modèles numériques

(*Analogical* relation (AR) and numerical model assessment) Elles sont basées sur des lois mathématiques simples ou complexes.

3. Méthodes des systèmes paramétriques

Évaluation du système paramétrique: Systèmes Matrix [MS]; Matrix Systems, Evaluation Systems [RS] Rating T Systems et Point modèles du système comte [PCSM] Point Count System Models Parametric system assessment.

Tableau 01 : Méthode d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution et informations de base relative

Méthodologie	Type	Informations de Base													
		Taux de précipitations et composition chimique	Topographie	Débit de flux et densité de réseau	Texture d'épaisseur et minéralogie	Humidité efficace	Perméabilité	Propriété physico-chimiques	Relation aquifère eaux superficielles	Recharge efficace	Caractéristiques hydrologiques de la zone vadose	profondeur de l'eau	variation de niveau piézométriques	Caractéristiques hydroéologiques de l'aquifère	conductivité hydraulique
Albinet & Margat (1970) BRGM (1970)	HCS								X		X	X		X	X
Vrana (1968) Olmer & Rezac (1974)	HCS										X			X	
Fenge (1976)	RS				X					X	X	X	X	X	X
Josopait & Swerdtfeger (1976)	HCS									X	X	X		X	X
Vierhuff, Wagner & Aust (1980)	HCS										X	X		X	X
Zampetti (1983) Fried (1987)	AR										X	X			
Villumsen, Jacobsen & Sonderskov (1983)	RS				X						X	X	X	X	X
Haertle' (1983)	MS										X	X			
Vrana (1984)	HCS		X			X					X	X		X	
Subirana, Asturias & Casas Ponsati (1984)	HCS								X		X	X		X	X
Engelen (1985)	MS								X		X	X		X	
Zaporozec (edit., 1985)	RS					X	X	X	X		X	X		X	
Breeuwsma et al. (1986)	HCS				X	X	X	X	X	X	X	X			X

(Civita et De Maio, 2004)/ Methods of assessing vulnerability to pollution and the relative basic information

1) **les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères** (Point Count Systems Models, PCSM) sont les plus pertinentes vis-à-vis des réalités de terrain du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et Dassargues 2000 ; Zaporozec et Vrba 1994).

Différentes méthodes développées et normalisées sont présentées ci après. Les deux premières méthodes présentées sont spécifiques du milieu Karstique. elles sont citées pour mémoire car le milieu qui nous concerne est de type poreux fracturé.

2) **EPIK**: c'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques sensu-stricto (Doerfliger, 1996 ; Doerfliger et Zwahlen, 1997). elle est basée sur quatre critères : Epikarst; Protective Cover (couverture protectrice: sol) ; Infiltration conditions (conditions d'infiltration); Karst network development (développement du réseau karstique).

3) **RISKE** : cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique. RISKE est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte : Roche Aquifère, Infiltration, Sol, karstification, Epikast (Petelet-Giraud et al. 2000).

4) **DISCO**: la méthode "DISCO" (discontinuités - couverture protectrice) à pour but de définir les zones de protection en tenant compte de l'hétérogénéité du milieu. trois paramètres sont nécessaires et suffisants pour évaluer le transport d'un polluant du point quel conque du bassin d'alimentation jusqu'à son arrivé au captage: le paramètre " discontinuités" ; le paramètre " couverture protectrice" ; le paramètre " ruissellement" englobe les phénomènes d'écoulement de l'eau en surface avant son infiltration (ruissellement de pente, cours d'eau permanents ou temporaires).

5) **GOD**: ce système à été développé par Foster en 1987.il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale à travers la zone non saturée et ne traite pas 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.

6) **La méthode DRASTIC:**

La méthode DRASTIC est l'une des méthodes du sous-groupe PCSM (Point Count System Model) qui a été mise au point par Aller et al. (1987) dans l'objectif d'évaluer les risques de pollution des eaux souterraines (Verba et Zaporozec, 1994; Mardhel et al., 2005; Knox et al.; 1993). Les lettres DRASTIC désignent respectivement les facteurs: profondeur du plan d'eau (**D**ePTH to water), recharge naturelle (net **R**echarge), lithologie

de l'aquifère (**A**quifer media), sol de couverture (**S**oil media), topographie (**T**opography), lithologie de la zone non saturée (**I**mpact of the vadose zone) et perméabilité de l'aquifère (**C**onductivity of the aquifer). La méthode proposée repose sur les hypothèses de base suivantes : les sources de contamination potentielles se trouvent à la surface du sol ; les contaminants potentiels atteignent l'aquifère par le mécanisme d'infiltration efficace ; le contaminant a la même mobilité que l'eau souterraine ; l'unité hydrogéologique en question est de superficie supérieure à 0,4 Km² (Murat *et al*, 2003).

7) La méthode SINTACS:

La méthode SINTACS, développée par Civita en 1994 (*in* Hamza *et al.*, 2007), est la version italienne de la méthode DRASTIC : c'est une adaptation de cette méthode aux conditions méditerranéennes et la cartographie à grande échelle (Pételet-Giraud, 2000). Cette méthode de vulnérabilité verticale intrinsèque prend en considération les mêmes paramètres que la méthode DRASTIC (Hamza *et al.*, 2007), soit en Italien: (**S**) Soggiacenza (profondeur de la nappe); (**I**) Infiltrazione (recharge efficace); (**N**) Azione del Non saturo (lithologie de la zone non saturée); (**T**) Tipologia della Copertura (type de sol); (**A**) Carratteri Idrogeologici dell'Acquifero (type de l'aquifère); (**C**) Conducibilità Idraulica (conductivité hydraulique) et (**S**) Acclività della Superficie Topografica (topographie) (Civita, 1994).

8) La méthode de vulnérabilité spécifique SI:

La méthode SI (Susceptibility Index) ou méthode d'indice de susceptibilité est une méthode de vulnérabilité verticale spécifique, développée au Portugal par Ribeiro (2000) (*In* Hamza *et al*, 2007) pour tenir compte du comportement des polluants d'origine agricole, principalement les nitrates. Cette méthode prend en considération cinq paramètres. Les quatre premiers paramètres sont identiques à quatre paramètres déjà pris en compte dans la méthode DRASTIC : *Depth to water* (**D**) : profondeur du plan d'eau ; *net Recharge* (**R**) : recharge efficace de l'aquifère ; *Aquifer media* (**A**) : lithologie de l'aquifère et *topography* (**T**) : la pente topographique du terrain (**T**). Les cotes attribuées aux différentes classes de ces paramètres dans la méthode DRASTIC ont été conservées. Le cinquième nouveau paramètre introduit est le paramètre « *occupation des sols* » (**OS**). La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Land Cover (1993) (*In* Hamza *et al* ., 2007). Une valeur appelée facteur d'occupation des sols et notée LU, variant de 0 à 100, est attribuée à chaque classe d'occupation des sols. Il est à signaler que les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres ont été multipliées par 10 pour faciliter la lecture des résultats obtenus. Les valeurs des cotes varient par conséquent de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable. Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité. La méthode SI présente quatre degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices de vulnérabilité. Il est à signaler que les paramètres qui ne sont pas pris en compte dans la méthode SI par rapport aux méthodes DRASTIC et SINTACS sont les paramètres : conductivité hydraulique de l'aquifère, impact de la zone vadose, et type de sol.

En effet, Ribeiro(2000) (In Hamza et al ., 2007) considère que le paramètre conductivité hydraulique de l'aquifère est difficile à évaluer dans l'espace. De plus, ce dernier paramètre a été déjà pris en compte indirectement dans le paramètre lithologie de l'aquifère (A), et cela par la considération des caractéristiques granulométriques de l'aquifère. Ribeiro (2000) (In Hamza et al., 2007) minimise également le rôle de la zone vadose, en se basant sur les travaux de Foster et al., (1987) (In Hamza et al 2007) et ceux de Vrba et Zoporozec (1994) (In Hamza et al., 2007), qui considèrent que les processus d'atténuation relatifs au paramètre « type de sol » sont sans grand effet sur la vulnérabilité, bien que ce paramètre soit indirectement pris en considération dans le méthode SI à travers le paramètre « occupation des sols ».

9) La méthode AVI

AVI est un rapport analogique ou une méthode numérique qui utilise deux paramètres: l'épaisseur de chaque couche sédimentaire supérieure au-dessus du aquifère saturé (d) et la conductivité hydraulique estimée (K) de chacune de ces couches sédimentaires (tableau 21) (Van Stempoot et al. 1993) (In Draoui et al ., 2007). AVI ne pas utiliser le principe de l'évaluation et le poids, mais détermine l'indice de vulnérabilité moyenne de la relation entre les deux paramètres, selon les L'équation suivante :

$$AVI = d/k$$

Les valeurs de l'indice AVI sont divisées en cinq intervalles de vulnérabilité qui représentent les différents degrés de réduction de la contamination.

II.7- Conclusion

En comparant les risques associés à des unités hydrogéologiques des superficies supérieures à 400 000 m², la méthode DRASTIC fournit des informations utiles pour l'aménagement d'un territoire, ainsi que pour l'examen préliminaire des nouveaux projets à indice environnemental. Les méthodes de modélisation sont beaucoup plus spécifiques que DRASTIC.

Elles conviennent aux études d'impact d'un projet précis, pour un certain type de contaminant, qui pose des risques pour un aquifère de géométrie et propriétés bien définies, sur une carte qui généralement ne présente qu'un faible pourcentage de la surface minimale considérée par DRASTIC.

A la limite, une méthode de modélisation peut servir à une étude très partielle n'ayant qu'un faible rapport avec la notion de vulnérabilité au sens large de l'aquifère comme l'entend DRASTIC.

Par exemple, le logiciel PRZM (Robert et al., 1992), est conçu pour la migration et les diverses transformations d'un pesticide, et uniquement dans la zone vadose. Dans ce cas le destin du pesticide (trajectoire, dilution,.....) après qu'il ait atteint la surface de la nappe est inconnu de PRZM. Il en résulte que ni le risque réel de contamination des eaux souterraines, ni celui des eaux de surface (par les systèmes de drainage des champs qui reçoivent le pesticide) ne sont connus.

En effet, pour qu'une méthode de modélisation puisse servir à une étude de risque, il faut qu'elle considère les écoulements dans la zone non saturée et la zone saturée (Banton et al., 1992). Dans ce cas, la méthode de modélisation devient l'outil qui permet d'étudier en détail un site bien délimité, vulnérable à un contaminant spécifique dont le mouvement peut être différencié de celui des eaux d'infiltration et des eaux souterraines.

Dans tous les cas, les méthodes de vulnérabilités intrinsèques permettent de se faire une idée assez précise sur les zones sensibles d'une région donnée en vue de prendre des dispositions de protection nécessaires.

Mais vu l'importance de la ressource mise en jeu qui est l'eau et pour plus de précision, on est toujours à la recherche des méthodes les plus performantes et les plus praticables parmi elles :

Pour un aquifère détritique situé sous climat méditerranéen, la méthode DRASTIC et la méthode SINTACS sont les plus souhaités.

Chapitre III: Présentation De La Région D'étude

III.1- Situation Géographique

La zone d'étude choisie est la Dakhla dans la wilaya de Laghouat, qui se situe au nord du Sahara de l'Algérie à 400 km de la capitale, et elle occupe une superficie de 147 km², elle est limitée par Oued M'zi au Sud, au nord par la commune de Sidi Makhoulf et El Assafia, à l'Est par la zone agricole Bordj Senouci, et à l'Ouest par la zone agricole Hamda.

Géographiquement elle est repérée par l'altitude 33°50'00" au Sud, et 34°00' au Nord, et entre la longitude 2°50'00" à l'Ouest et 3°10'00" à l'Est. L'application des méthodes d'estimation de la vulnérabilité s'effectue sur la superficie globale de cette zone.

Le choix de cette zone d'étude a été basé sur: (1) l'intérêt géologique et hydrogéologique de la région qui est représentative des aquifères le long de la rive droite d'Oued M'zi; (2) l'utilisation du sol variée avec la présence de zones agricoles, forestières et peu urbaines, ce qui rend possible la validation des résultats obtenus avec la méthode utilisée; (3) l'exploitation importante de l'eau souterraine pour l'élevage et les activités agricole prévois.

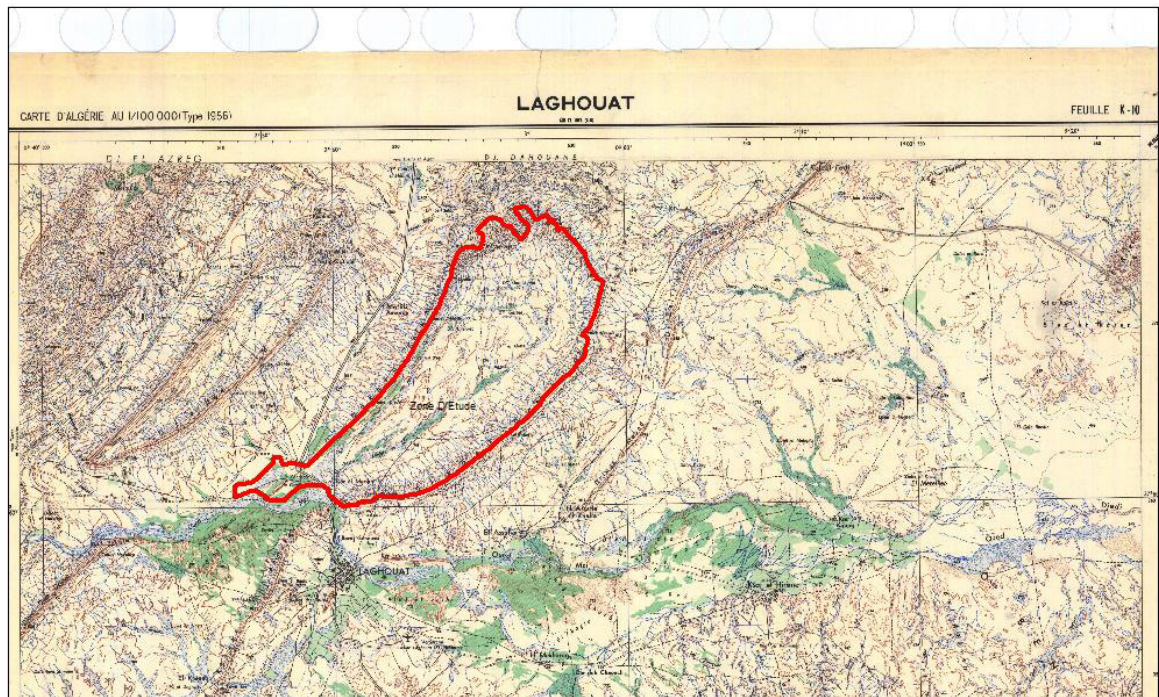


Figure 7 : Situation géographique de la zone d'étude
(Carte D'état major)

III.2- Contexte climatique :

Du point de vue du climat, la commune est de type désertique, les températures les plus élevées sont enregistrées pendant la période estivale. Il est à signaler, que la période chaude dans cette zone est assez longue. L'été y débute au mois de Mai et persiste jusqu'au mois d'Octobre. Les plus basses températures sont signalées au niveau des synclinaux, elles atteignent des valeurs au-dessous du zéro (pendant la nuit).

Les précipitations varient graduellement, de 200 mm au nord jusqu'à 80 mm vers le sud avec une remarquable diminution d'Est-Ouest, la région d'Edakhla présente une altitude de 775 m moyenne et donne à sa région un climat contrasté, froid en hiver avec de nombreux jours de gelée (17 jours moyenne) mais également une pluviométrie plus abondante (170mm). Les étés sont chauds, mais connaissent pas le niveau des Oasis du Sud (45° c maximum). Avec 1700 mm l'ETP est le moins de tout le territoire saharien.

III. 3- Température:

Le Tableau 02 représente la température moyenne annuelle est de 17,20 °C, la température la plus élevée est notée au mois de juillet avec 47,50 °C, et la température la plus basse est enregistrée au mois de janvier est de -01,00 °C.

Tableau 02 : la température moyenne annuelle de la zone d'étude

Mois	sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mar.	avril	Mai	juin	Juil	Août	Moy Annuelle
Min	16.8	16.6	5.9	3.1	2.3	3.6	6.5	9.4	13.2	18.1	21.2	20.4	11.0
Moy	23.4	17.2	11.4	8.05	7.40	9.35	12.4	16.1	19.7	24.9	28.6	17.2	17.2
Max	30.0	24.0	16.9	13.0	12.5	15.1	18.4	22.8	26.2	31.8	36.0	23.5	23.5

III.4 -Précipitation :

Les zones arides se caractérisent par des précipitations réduites, et un degré d'aridité d'autant plus élevé que les pluies y sont plus rares et irrégulières (Ramade, 2003). Les valeurs des précipitations mensuelles de la région de Laghouat dans le tableau 03 montrent que la pluviométrie est réduite et irrégulière à travers les mois, les saisons et les années. Les précipitations annuelles sont de 173 mm où le mois le plus pluvieux est septembre avec 27,02 mm et le mois le moins pluvieux est juillet avec 3,78 mm.

Tableau 03 : précipitations mensuelles de la région de Laghouat

Mois	Sept	Oct.	Nov	Déc	Janv	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	N
Stations													
Laghouat	27.02	19.83	17.05	14.97	11.53	12.02	15.50	12.17	17.90	10.06	3.78	10.72	31

III.5- Le Vent :

Dans le secteur étudié les enregistrements n'intéressent que les vitesses supérieures à 05 Km/h.

➤ **Force du vent :**

L'échelle télégraphique, situe le maximum de la force du vent, aux mois de janvier, février et le minimum aux mois de juillet et août.

Tableau 04 : force du vent à la station de Laghouat période (1990 -1996)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avri l	Ma i	Juin	Juil.	Août	Moy Annuelle
Force du vent	2.7	2.5	2.3	2.4	2.8	3	3.2	3.7	3.4	3.5	2.6	2.1	2.9

D'après P.SELTZER

➤ **Fréquences des Directions du vent :**

Les moyennes annuelles des fréquences relatives à la direction du vent obtenues à la station de Laghouat pour la période 1913 – 1938 (tableau 05) montrent que les vents dominants sont ceux du NW,W , N,NE à 7 Heures.

Tableau 05 : Fréquence des directions du vent à la station de Laghouat période (1913-1938)

H	7heures								13 heures								18 heures							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Fre	14	13	6	6	4	7	21	29	11	14	9	9	6	11	16	24	11	14	8	10	6	11	16	21

P.SELTZER

➤ **Le sirocco :**

Le sirocco est un vent chaud et sec qui souffle du sud, SW ou SE. Il accroît la température et diminue fortement l'humidité en favorisant considérablement l'évaporation. Le tableau 06 montre que le sirocco est inexistant en hiver, Il est au contraire assez fréquent en été avec un maximum au mois de juillet (1.8 jours par mois).

Le sirocco constitue un des facteurs déterminants dans les variations de températures d'une période à l'autre (cas des températures pour les périodes (1913 – 1938) et (1969- 1991).Il se manifeste particulièrement aux mois de juin, juillet et août.

Tableau 06: Nombre moyen de jours de Sirroco (1913-1938)

Mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Moy Annuelle
Nombre de Jours	0.2	0.1	0	0	0	0.1	0.4	0.6	0.6	1.3	1.8	1.2	6.3

d'après P.SELTZER

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

➤ HUMIDITE :

L'humidité relative correspond au rapport exprimé en % de la tension de vapeur d'eau à la tension de la vapeur saturante :

$$U_r = (e/e_w) \times 100$$

U_r : humidité relative en %.

Les données d'humidité relative disponibles uniquement au niveau de la station de Laghouat concernent les périodes, de 1913 à 1938 et 1990 à 1993.

Le tableau 07 montre que l'humidité relative à la station de Laghouat dépasse les 50% d'octobre à avril pour ensuite diminuer jusqu'à septembre en atteignant un minimum au mois de juillet. Cette diminution est due aux influences sahariennes se traduisant plus particulièrement en été en vents chauds favorisant l'assèchement de la zone.

Les différences au niveau de l'humidité relative moyenne pour la période (1913 – 1938) et celle de (1969 – 1991) peuvent être expliquées essentiellement par l'environnement des stations et les conditions de leur exposition.

Tableau 07 : Humidité relative moyenne aux stations de Laghouat (1913- 1938) et (1990-1993)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avl	Mai	Juin	Juil	Août	Moy An
Periode (1913-1938) U%	44	49	56.00	63.66	64	53.66	50	41.3	40.3	34	31	30	46.46
Periode (1990-1993) U%	35.5	40.0	58.5	60.0	64.0	65.0	57.0	39	45.5	33.5	36.0	27.5	48.0

BET AL RAFIDAYNE

III.6- Synthèse bioclimatique:

La classification écologique des climats est effectuée par deux facteurs les plus importants à savoir, la température et la pluviosité (Dajoz, 1971). Ces deux facteurs sont utilisés pour établir le diagramme ombrothermique de GAUSSEN et le climagramme d'EMBERGER.

III.6.1-Diagramme ombrothermique de GAUSSEN:

Le diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (1953) met en évidence les périodes sèches et humides d'une région. GAUSSEN considère que le climat d'un mois est sec quant le total mensuel des précipitations exprimé en (mm) est inférieur à deux fois la moyenne thermique mensuelle exprimée en °C, soit $P \text{ mm} < 2T$. A partir de la figure 04, on constate que $P < 2T$ durant toute l'année ce qui indique la présence d'une seule période sèche qui s'étale sur toute l'année.

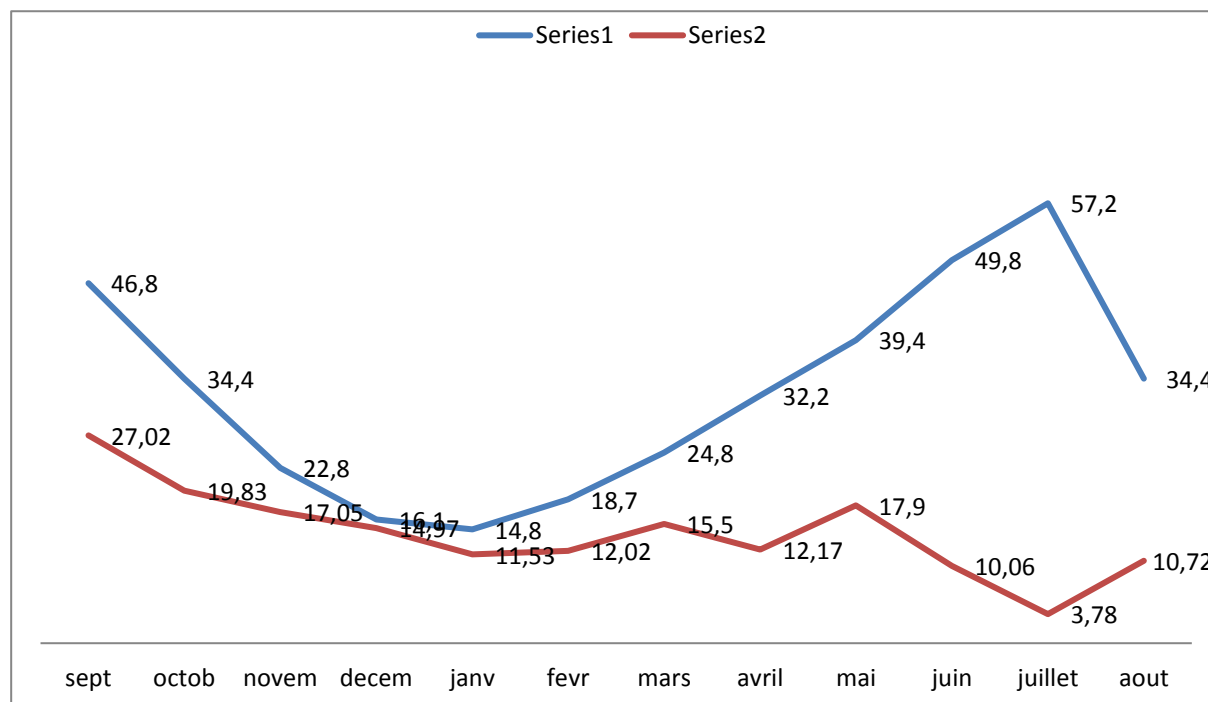


Figure 08: Diagramme ombrothermique de GAUSSEN de la région de Laghouat
BET AL RAFIDAYNE

III.6.2- Climagramme d'EMBERGER:

Pour la détermination de la gamme des climats de la méditerranéenne, L. EMBERGER propose la détermination d'un quotient pluviothermique.

$$Q = 1 \frac{P}{(M + m)/2} * 1000$$

Avec

Q le quotient pluviothermique;

P précipitation totale annuelle (173,00mm)

M la moyenne des maximas du mois le plus chaud (en °kelvin)

m la moyenne des minimas du mois le plus froid (en °kelvin).

Il établi ainsi un climatogramme ou chaque station intéressé figure suivant ces coordonnées. ce climatogramme permet la détermination des compartiments régionaux bioclimatiques. il s'agit également d'unités morphoclimatiques et pédologiques. Pour Laghouat, nous obtenons un quotient $Q= 18$, le régime climatique est aride.

III.6.3-Evaporation:

Les seules mesurées en notre possession sont des relevés d'évaporation mesurés sous abri à l'aide d'évaporomètre PICHE à la station de Laghouat concernant la période 1973-1980.

Tableau 08 : Evaporation mensuelle et annuelle à la station de Laghouat (1973-1980)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	AN
Moy (mm)	61	57	52	52	37	41	52	60	85	98	96	95	786

BET AL RAFIDAYNE

III.6.4-Evapotranspiration:

L'évapotranspiration est sans doute l'une des données climatologiques la plus difficile à approcher.

On distingue:

- une évapotranspiration potentielle ETP qui correspond à l'évapotranspiration d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques.
- une évapotranspiration réelle ETR qui correspond à l'évapotranspiration se produisant dans les conditions réelles de teneurs en eau de sol.

III.6.5-Evapotranspiration potentielle (ETP):

Elle à été estimée par les formules de Thornthwaite et Serra.

- **formule de tornthwaite :**

$$ETP = 1,6 \cdot \frac{(10 \cdot T)^a}{I}$$

ETP: Evapotranspiration potentielle (cm).

T: Température moyenne annuelle en °c.

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{avec } I = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

$$a = 0.492 + 1.79 \cdot 10^{-2} I - 7.71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1.65 \cdot 10^{-7} I^3$$

Pour la station de Laghouat, nous obtenons les résultats résumés dans le tableau n°09.

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

- Formule de Serra:**

$$ETP = 16 \left(\frac{10 \cdot T}{I} \right)^a$$

Avec:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{ou } i = 0.09^{3/2}$$

T: température moyenne mensuelle

$$a = 1.6 \frac{1}{100} + 0.5$$

Tableau n°09: Evapotranspiration potentielle en mm (Période 1913 - 1937)

Mois	ETP Thornthwaite	ETP Serra
	Laghouat	
/S54.524	110.00	110,00
O	58.7	59.2
N	24.7	25.1
D	12.8	13.2
J	11.2	11.6
F	16.7	17.1
M	34.4	34.9
A	58.4	59,00
M	93.3	93.7
J	144.2	143.9
J	188.5	169.4
A	170.1	169.4
	Σ = 923.5	Σ = 925.0

BET AL RAFIDAYNE

III.6.6-Evapotranspiration Réelle (ETR):

L'estimation de la lame d'eau évaporée est accessible grâce aux formules et diagrammes que des auteurs comme Turc, Coutagne, Wundt et Verdeil ont élaborés.

- **Formule de Serra:**

L. Turc a établi une relation tenant compte des précipitations et de la température.

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

avec:

P: Pluviométrie moyenne annuelle en m;

T: Température moyenne annuelle en °c;

$$L = 300 + 25.T + 0.05T^9$$

- **Formule de Coutagne:**

L'évapotranspiration réelle est calculée à partir de la relation :

$$ETR = P - \lambda P^2$$

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T}$$

avec :

P: précipitation moyenne annuelle en m

T: température moyenne annuelle en °c

la formule est valable quand les précipitations sont comprises entre $1/8 \lambda$ et $1/2\lambda$.

le tableau 10 regroupe les différents résultats.

- **Méthode de Wundt:**

Le diagramme (figure n°09) donne le déficit d'écoulement que l'on assimiler à ETR. pour la station de Laghouat, nous obtenons les déficits résumés dans le tableau n°10.

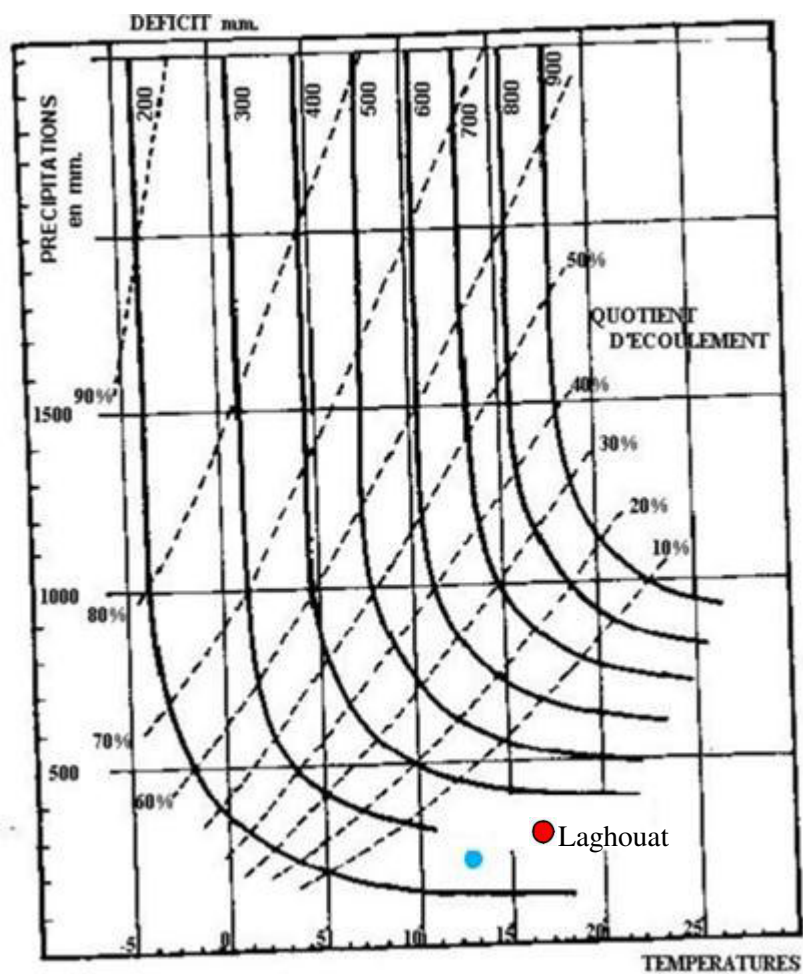


Figure 09: le diagramme de Wundt pour la station de Laghouat

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

- **Méthode de P. Verdeil:**

P. Verdeil (septembre 1988) a établi un abaque pour le calcul de déficit d'écoulement en fonction des précipitations (figure10).

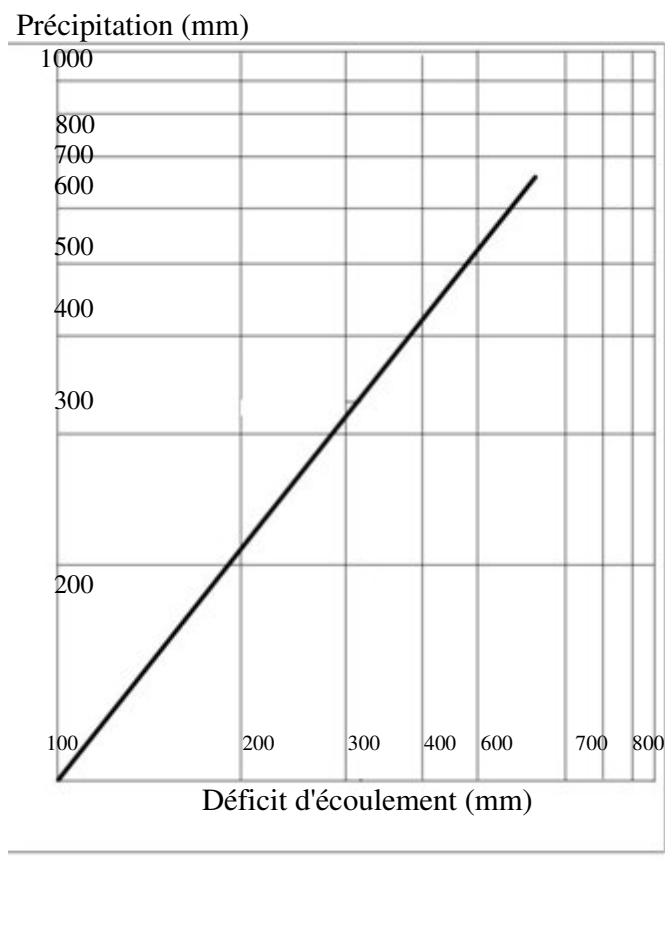


Figure 10 :.Abaque de Verdeil

Cette méthode est mieux adaptée pour l'estimation de ETR des régions arides. Le tableau 10 présente les résultats pour la station de Laghouat.

Tableau 10: ETR annuelle en mm

Méthodes	Laghouat	
	1913 - 1937	1960 - 1990
Turc	173	156
Coutagne	158	143
Wundt	221	215
Vrdeil	162	147

Archive DRE Laghouat

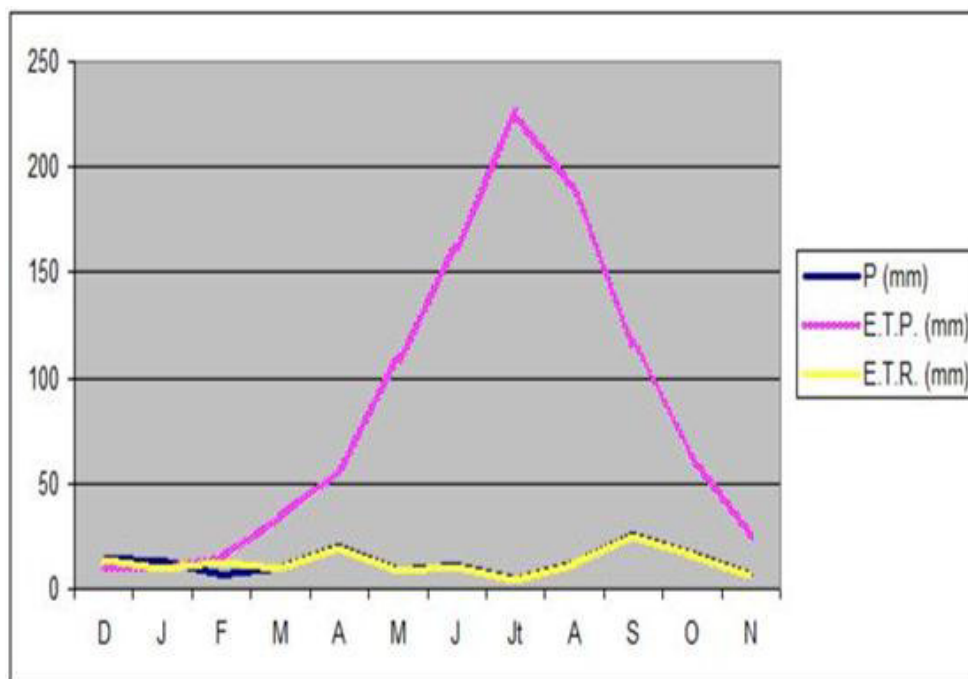


Figure 11 : Graphe représentant le bilan hydrique par la méthode de THORNWAITE station de Laghouat (1990-2011)

L'observation du bilan hydrologique nous amène à dire que l'ETP est importante du mois de Juin jusqu'au mois d'août, avec des valeurs atteignant les 225,59 mm au mois de Juillet. A partir du mois de Mai, on assiste à une reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU, qui atteint son maximum entre les Juin-Aout. Au-delà de cette période, on a une baisse de la RFU, traduisant un épuisement du stock.

III.7- Discussion des résultats:

Les valeurs de ETR obtenues par les différentes méthodes sont résumées dans le tableau 10. Nous remarquons que les méthodes de Turc et Wundt donnent des valeurs de l'ETR supérieures aux précipitations.

Les conditions d'application de la méthode de Coutagne n'étant pas satisfaites, il est donc difficile de se fier aux valeurs de ETR estimées par la formule de Coutagne.

Ces méthodes sont difficilement applicables aux régions arides, qui reçoivent des précipitations quantitativement insuffisantes, très localisées, trop irrégulières.

Cependant, la méthode de P. Verdeil basée sur l'étude du climat des régions arides et semi arides algériennes présente des résultats assez compatibles qui serviront pour le calcul du bilan.

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

Essai de Bilan Hydrologique:

La formule classique du bilan est la suivante:

$$P = E + R + I$$

P: Précipitation moyenne annuelle en mm;

E: Evapotranspiration moyenne annuelle en mm;

R: Ruissellement moyenne annuelle;

I: Infiltration moyenne annuelle en mm

Pour l'ensemble du bassin versant, en remplaçant chaque terme par sa valeur dans l'équation, nous avons:

- Pluviométrie = 181 mm
- Ruissellement = 2.4 mm (P. Verdeil)
- Evapotranspiration réelle = 175 mm (Tixeront- Berkaloff).

$$181 = 175 + 2.4 + I \quad , \quad \text{soit } I = 3.6 \text{ mm}$$

III.8- Conclusion

La zone d'étude restreinte aux contreforts de l'Atlas saharien est soumise à des influences sahariennes caractérisant ainsi un climat aride aux hivers froids et aux étés chauds et secs.

La répartition des précipitations est sous une influence d'une zonalité verticale, ces précipitations sont caractérisées par une irrégularité et une torrentialité importante.

La pluviosité mensuelle est bimodale conditionnée par un régime subtropical.

Les formules empiriques d'estimation de l'évapotranspiration sont difficilement applicables en régions arides, qui reçoivent des précipitations quantitativement faibles, très localisées et trop irrégulière; de même pour le ruissellement, en effet son estimation ne tient compte ni de la nature des formations géologiques traversés ni de l'intensité de précipitations, seules la pente et des mesures d'infiltration in situ réparties sur les différents types du faciès du bassin et en parallèle une étude statistique de l'intensité pluviale permettraient une meilleure approche de ce paramètre.

Par ailleurs, lors d'un essai de bilan hydrologique en milieu aride et semi-aride, il faut prendre en considération d'autres phénomènes climatologiques (rosée, brouillard.....) qui jouent un rôle important non pris en compte par les méthodes empiriques d'estimation.

III. 9-Géomorphologie :

La zone d'étude (Dakhla) : d'altitude moyenne de 800 met d'orientation Nord-Ouest / Sud-est .

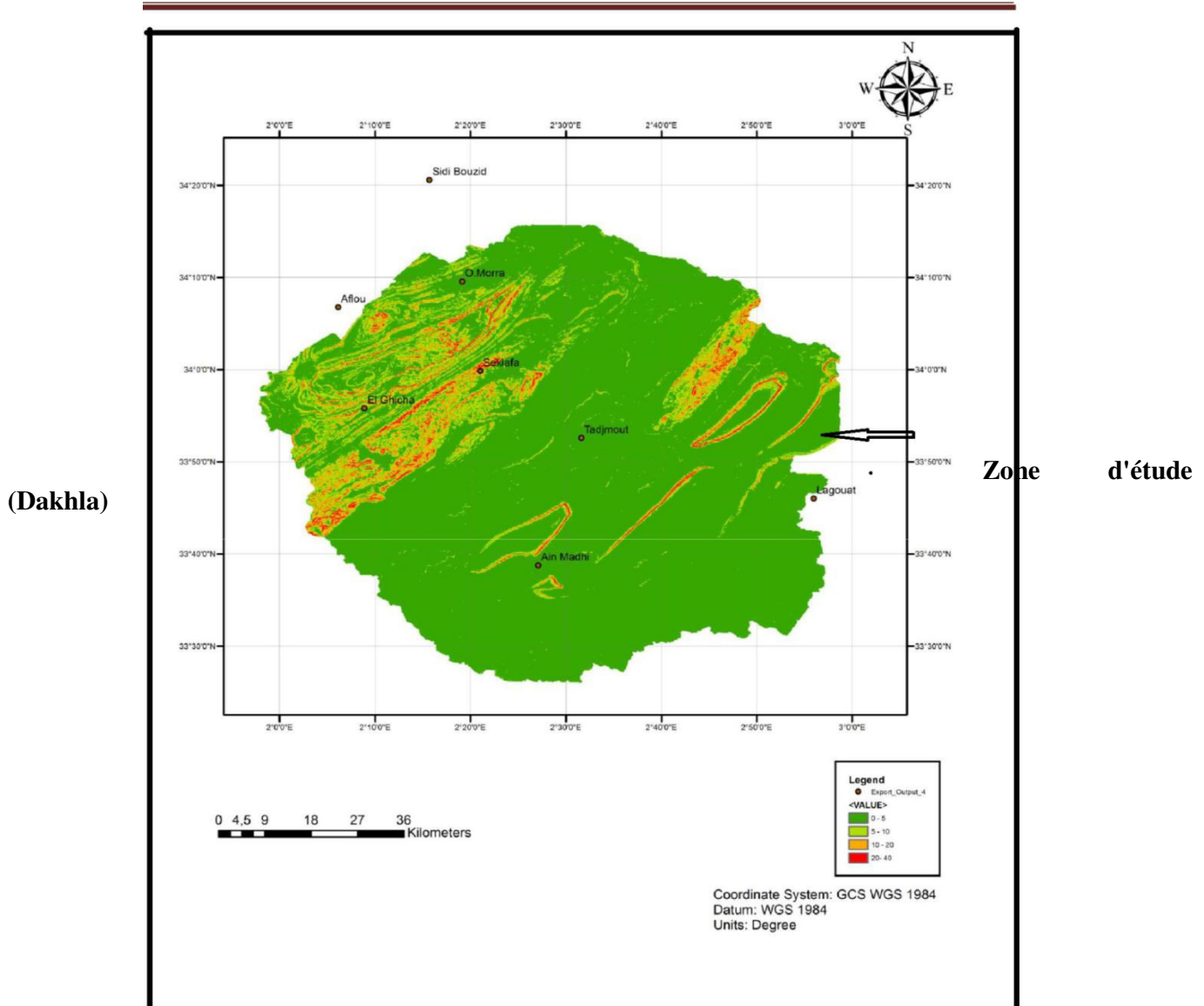


Figure 12 : Topographie de la zone d'étude

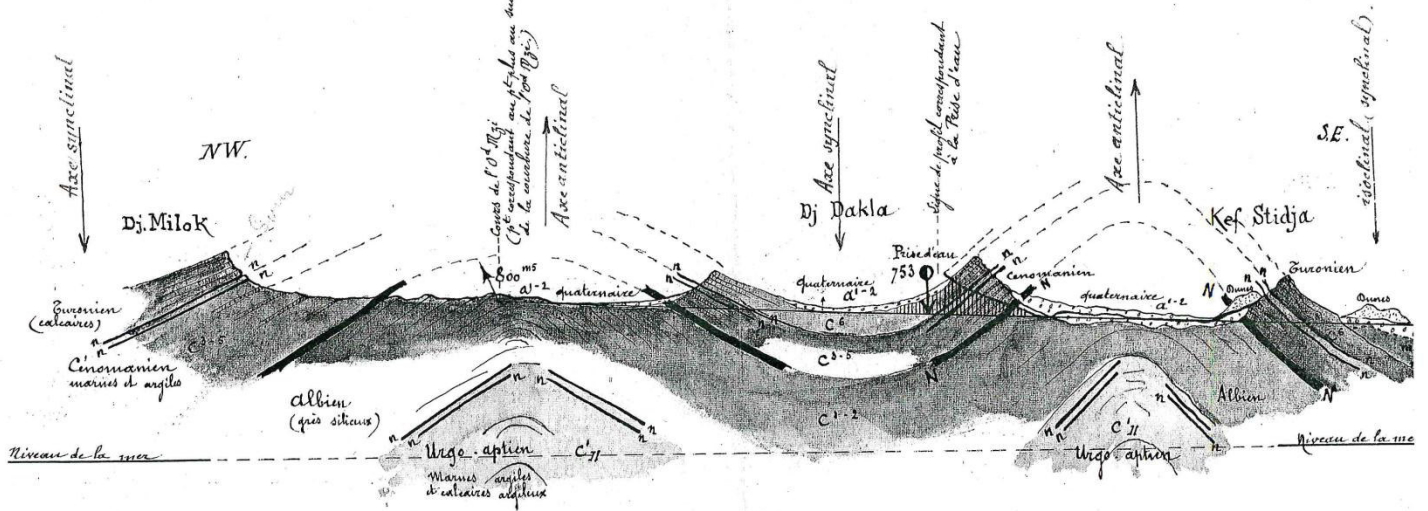
La topographie de la cuvette de Dakhla est relativement plane car les classes de pentes inferieures à 5 % occupent plus de 65 % de la superficie totale du sous bassin versant Le reste de la superficie :

- 15 % ont une pente intermédiaire de 5-10 %
- 10 % de 10-20%

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

- 10 % de 20-40%

La morphologie de la zone et à travers une coupe du NW au SE de la cuvette (Figure 13) montrent la présence des formations suivantes:



Croquis coupe. NW-SE. puis à l'Est de la Prise d'eau. (Environ de Saghoiat).

Echelle : $\frac{1}{100\,000}$ (longueurs) = $\frac{1}{200\,000}$ environ (hauteurs) — Niveau aquifère. — Partie du profil correspondant à la Prise d'eau.

Les couleurs correspondent à celles des cartes

- C⁶ Euxonien — terrain perméable (impermeable dans les bandes inférieures)
- C³⁻⁵ Cénomaniens — (terrain perméable dans les bandes inf. supérieures.) imperméable dans toute sa masse.
- C¹⁻² Albien — terrain très perméable
- C^I Urgo. aptien — partie perméable et imperméable suivant les assises considérées.
- m.p. Mio. pliocène — partiellement imperméable.
- a¹⁻² Quaternaire ancien et récent — perméable.

Aliou Mustapha.
Le 25 Décembre 1905
Signé : Flamand

Figure 13 : Coupe géomorphologique schématique NW-SE de la cuvette de Dakhla

III. 10- Hydrographie :

Les Oueds coulent uniquement lors des pluies importantes. L'oued principal (Oued M'Zi), qui passe a coté du site joue le rôle de drain principal et coule vers l'exutoire de Chott Melghir au sud de Biskra. L'oued Djedi, avec ces deux importants affluents oued M'zi et oued El Fedj draine les eaux du piémont sud de l'Atlas. Les débits et la vitesse d'écoulement sont généralement fort, lors des périodes des pluies. Les écoulements se produisent rarement en dehors de la saison humide.

III. 10.1-les oueds

❖ Oued M'zi:

F.SoleilHavoup dans son étude sur les crues de l'oued M'zi (oct. 1972 à fév. 1974) présente l'oued M'zi comme suit : " l'Oued M'zi (Ph.3) constitue un des plus importants cours d'eau du Sahara septentrional. Il prend sa source au djebel Zlagh, à 1593 m d'altitude, dans le massif du Djebel Amour (Atlas Saharien Central), au sud d'Aflou, il va se jeter dans le Chott Melhrir, au sud de Biskra, après un parcours d'environ 450 km. Il s'agit donc d'un oued endoréique. Dans son cours inférieur, à l'aval de Laghouat, il change de nom et prend le nom de l'Oued Djedi. Entre sa source et Laghouat, vers le sud-est, l'Oued M'zi recoupe les chainons sud du Djebel Amour et il s'engage dans la dépression Sud-Atlasique grâce à une cluse entre le Djebel Kheneg et le Djebel Dakhla : Kef Metlili. A cet endroit situé immédiatement au nord de l'oasis de Laghouat, à Ras-El-Aioun, le lit s'élargit en une vaste zone d'épandage d'alluvions (cailloutis, sables, limons) ".

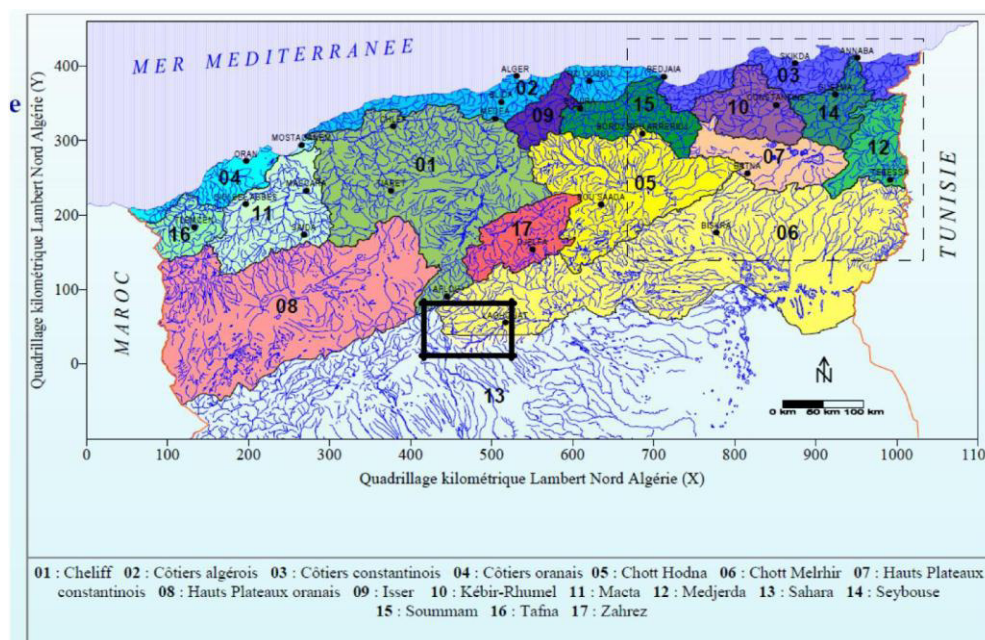


Figure 14: carte des bassins versants de l'Algérie du Nord (ABH, 2012)

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

L'Oued M'zi est régulièrement alimentés par le déversement des nappes souterraines et draine un bassin de 6153 km², la longueur de l'oued principale est de 106 km. Les deux principaux sous bassins sont l'Oued Seklafa et celui de Tadjemout.



Photo n°01 : Oued M'zi, Laghouat (Source : Agence de Bassin Hydrographique Sahara)

III. 11-Géologie et Hydrogéologie de la zone d'étude

III. 11.1-La Géologie :

➤ **Cadre géographique générale :**

L'Atlas Saharien constitue une chaîne montagneuse dont les caractéristiques sont fondamentalement semblables sur toute l'étendue du Maroc au Nemmemcha.

L'Atlas Saharien se décompose en Algérie de cinq faisceaux qui se relaient d'Ouest en Est :

- Les Monts des Ksour.
- Le Djebel Amour.
- Les Monts des Ouled Nail.
- Les Aurès
- Les Nemmemcha

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

Ces faisceaux sont décalés les uns par rapport aux autres, mais rattachés entre eux par une série de plis secondaires légèrement obliques à la direction principale.

L'Atlas Saharien est limité au Nord par un accident moyen qui est la faille Nord Atlasique et au Sud par un autre accident celui de la faille Sud Atlasique. En se dirigeant de l'Est vers l'Ouest, les formations géologiques de l'Atlas Saharien deviennent de plus en plus anciennes et en même temps on assiste à un passage progressif du milieu marin au milieu continental pour les mêmes terrains. Les séries mésozoïques et cénozoïques présentent un ensemble plissé à sédimentation marine et continentale d'âge Jurassique et Crétacé. Les formations du Mésozoïque, de même âge deviennent de plus en plus carbonatées vers l'Atlas Saharien Oriental et détritiques vers l'Atlas Saharien Occidental.

Géographiquement l'Atlas Saharien est considéré comme le domaine de transition entre le domaine des Hauts Plateaux au Nord et le domaine saharien au Sud. Il est constitué est par une chaîne montagneuse dont les caractéristiques sont fondamentalement semblables sur toute l'étendue du Maroc au Nemmemcha.

Orographiquement, la chaîne de l'Atlas Saharien Central est caractérisée par des crêtes qui atteignent en moyenne 1400 à 1500m; les altitudes maximum près d'Aflou s'élèvent à 1721m (Djebel Guern Arif), 1707m (Djebel Sid Okba) et 1583m (Djebel Zlag).

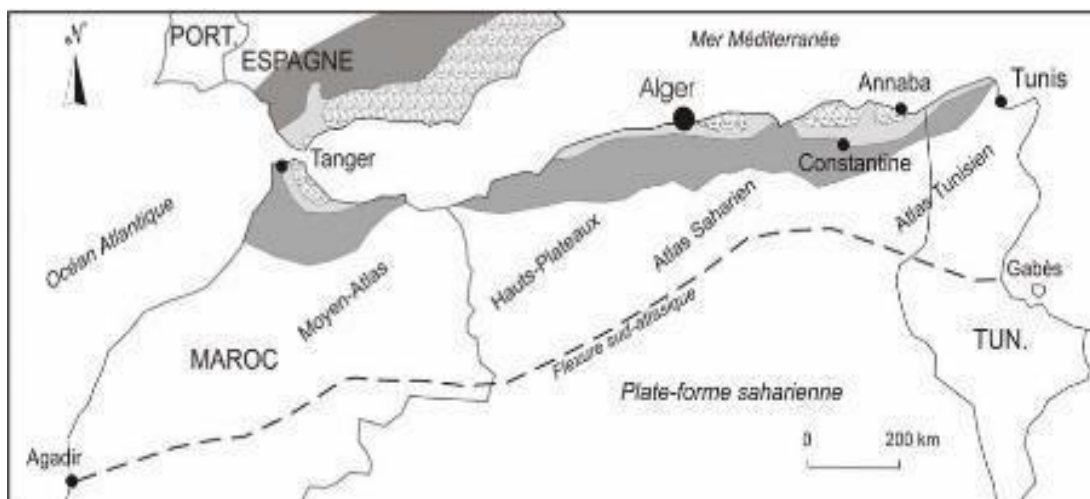


Figure 15: carte de l'Atlas Saharien dans son cadre régional.

➤ Cadre géographique local :

La cuvette de Dakhla à axe synclinal située à la limite de la chaîne de l'Atlas Saharien sur la flexure sub atlasique encadre par deux accidents majeurs appelés communément accident Nord Atlasique et accident Sud Atlasique (Flexure Sud Atlasique). Le style de déformation souple est de type jurassien caractérisé par des plis de grande rayon de courbure avec des flancs sub-verticale, elle divise la région en deux domaines connus par le domaine atlasique et le domaine saharien.

Se compose par un mélange d'accumulation sableuse, des dépôts actuels qui forment le lit oued et Dayas et un grand dépôt quaternaire (soltanien-rharbien) ces formations sont entourées par Djebel Dakhla qui est de formation d'âge crétacé avec des couches cénoomanien, sénonien, turonien et albien supérieur.

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

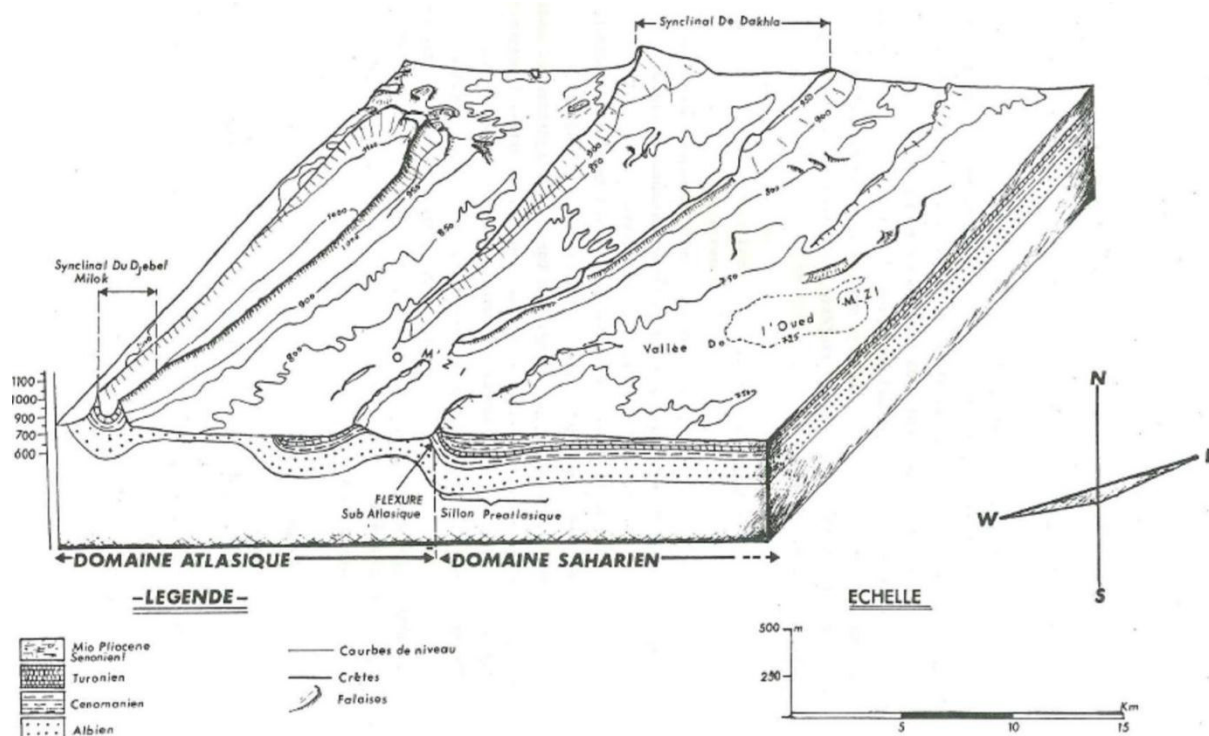


Figure 16: coupe géologique a travers la région de Laghouat (in Hannachi, 1981)

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

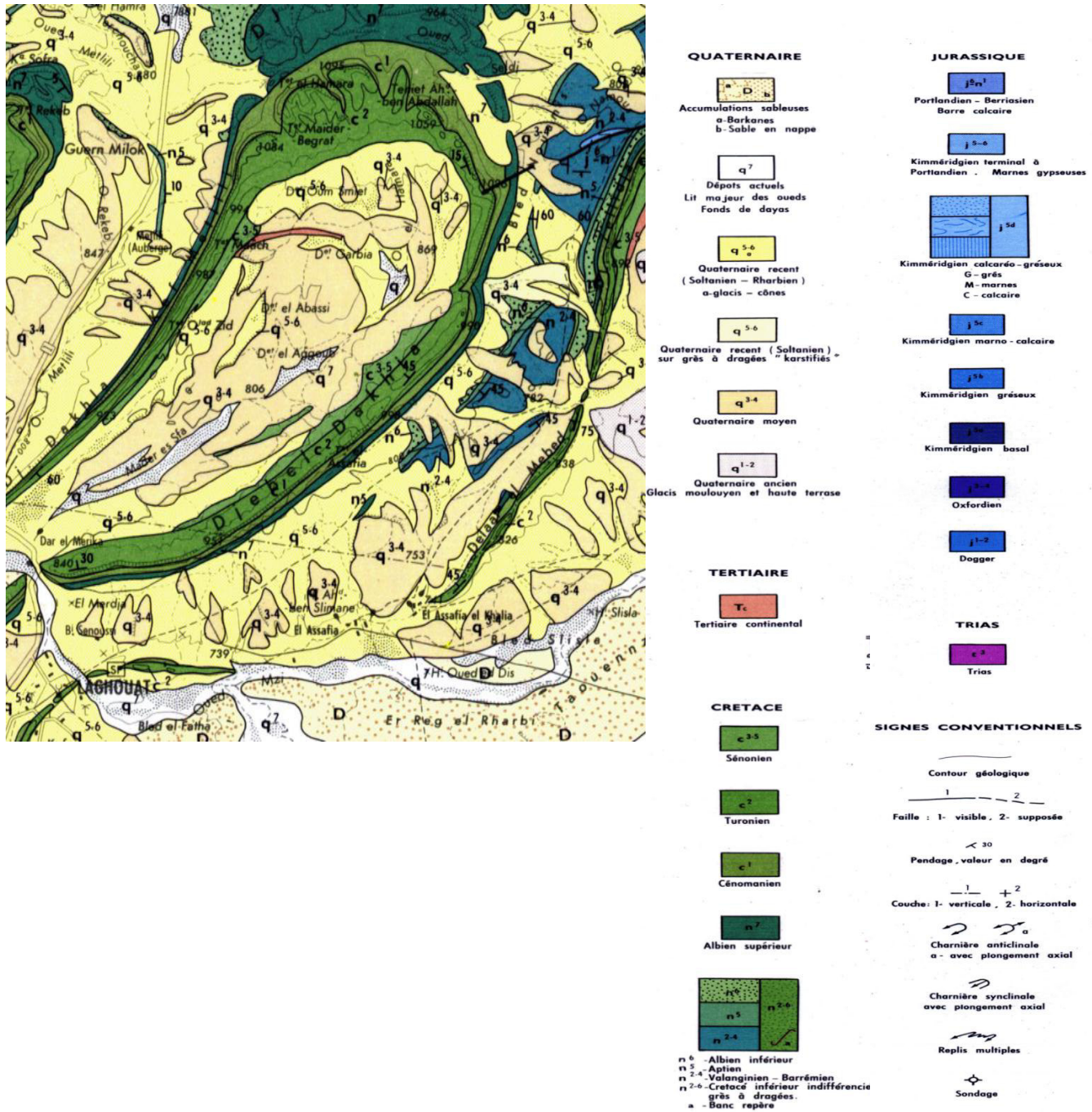


Figure 17 :La carte Géologique de la cuvette de Dakhla - Laghouat -
(carte géologique de l'Algérie)

III. 11.2- La stratigraphie

Nous nous trouvons en domaine essentiellement crétacé

a) Aptien

On l'observe sur les flancs et le prolongement du djebel L'Azreg. Le M'Zi le traverse dans la région Tadjmout

b) Albien

Il forme des terrasses autour des divers reliefs (Djebel Milok, **Djebel Dakhla**, Djebel El Haouita)

Il est constitué de grés à dragées très aquifères avec intercalation de marnes violacées

c) Cénomanién

Il compose les flancs des brachysynclinaux des Djebel Milok, Djebel Dakhla, Djebel El Haouita, Djebel Oum Deloua Et Djebel L'kheneg

Il comprend des marnes, gypses, calcaire et dolomie. Il est réputé **imperméable**.

d) Le Turonien

Il couronne les reliefs, des couches de calcaires à rudistes plus ou moins dolomitiques et de dolomies. Excessivement fissuré, il est l'objet de phénomènes Karstiques et donc perméable en grand.

e) Le Crétacé supérieur

Analogue au cénomanién il apparaît dans le fond des brachysynclinaux. Les plissements de l'époque éocène suivis d'une période d'importantes érosions expliquent l'absence de terrain appartenant à la base du tertiaire.

Ces terrains secondaires sont recouverts d'atterrissements continentaux (Néogène à quaternaire).

III. 11.3-Tectonique

La grande transgression cénomaniénne qui envahit l'Afrique du nord et de Sahara, fut suivie des grands mouvements orogéniques du lutétien qui donnèrent naissance au relief actuel.

Une érosion intense suivit ces plissements et engendra un relief inversé, caractérisé par une tectonique éjective. Les brachysynclinaux perchés ainsi formés sont des formes typiques de la région de Laghouat. Citons sur un même axe synclinal Le Djebel Milok et Le djebel El Haouita, et sur un autre axe parallèle **Djebel Edakhla** et la formation des Djebels Oum-Deloua et Kheneg.

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

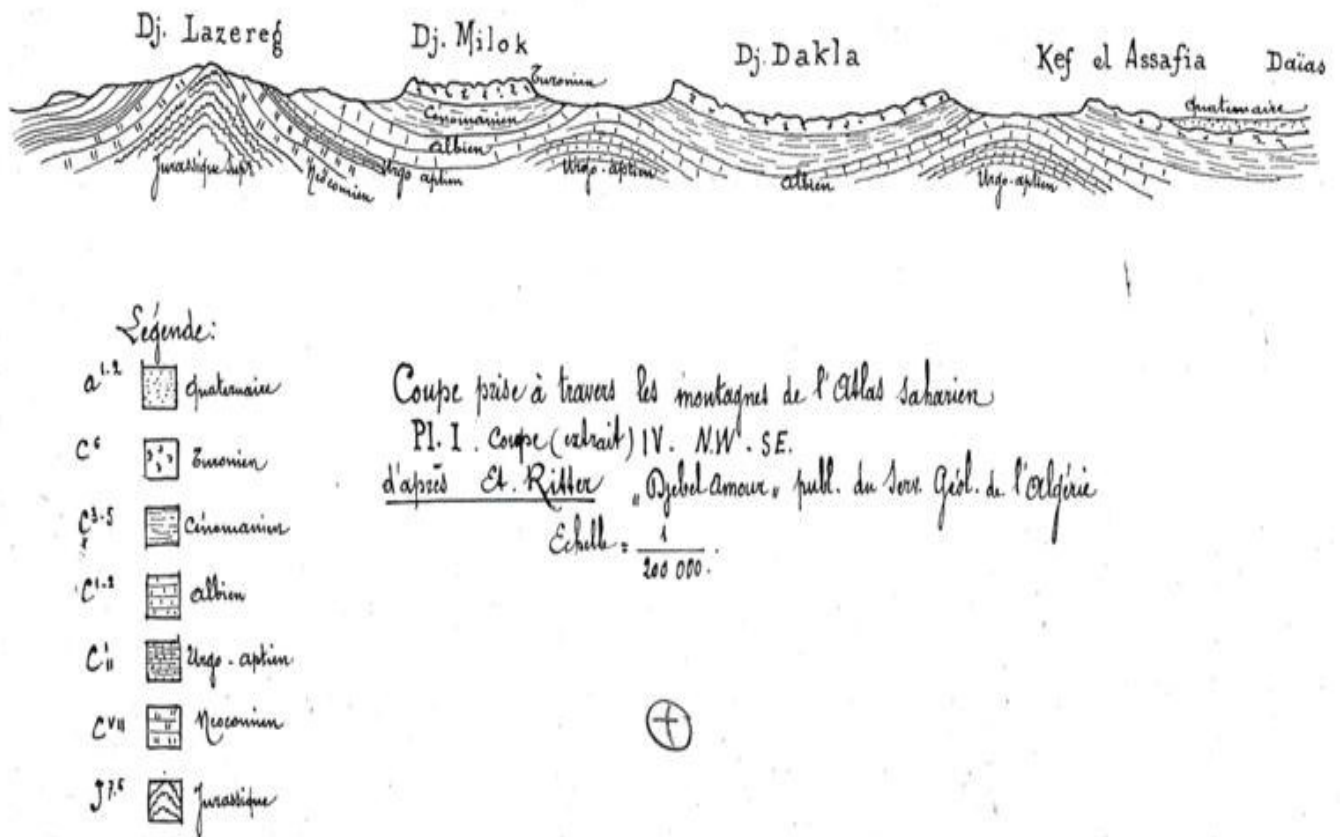


Figure 18: coupe à travers les montagnes de l'atlas saharien

III.11.4 - Conclusion :

Du point de vue stratigraphique le secteur d'étude est formé essentiellement par des terrains attribués au Secondaire, Tertiaire et Quaternaire.

Le Jurassique constitue l'essentiel des grandes structures anticlinales, le Crétacé l'essentiel des synclinaux : Les formations gréseuses du Barrémien-Albien forment des synclinaux coffré à fond plat. Les formations marno-carbonatées du Cénomaniens, Turonien et Sénonien : les synclinaux perchés.

Du point de vue structural notre secteur est à cheval entre deux domaines structuraux ; un domaine atlasique caractérisé par la succession d'anticlinaux et des synclinaux perchée dont le centre est occupé par le crétacé supérieur et un domaine sahariens.

Du point de vue lithologique les terrains affleurant ont une nature silico-clastique ce qui favorise le développement des systèmes phréatique à plusieurs niveau : superficiel pour les importantes alluvions Quaternaire, et profond pour les terrains du continental intercalaire.

III. 11.5- Hydrogéologie :

L'hydrogéologie est une discipline qui recoupe l'hydrologie et la géologie. Il en résulte deux approches différentes mais complémentaires permettant de définir l'hydrogéologie :

Une spécialisation de la géologie qui traite des propriétés des milieux portant notamment sur leur capacité à contenir et à laisser l'eau souterraine s'écouler.

Une spécialisation d'hydrologie qui traite l'eau souterraine en tenant compte des conditions géologiques.

❖ Les phénomènes structuraux

La structure a un grand impact sur l'hydrogéologie de la région, les grands synclinaux des grés fissurés du Barrémien-Albien constituent les aquifères les plus importants du Djebel Amour séparés par les anticlinaux coiffés du Jurassique d'orientation générale NE - SW. Ces anticlinaux du Jurassique sont affectés par des failles de direction N 60° à N 80° et N 160° à N 170° qui jouent un rôle de drain.

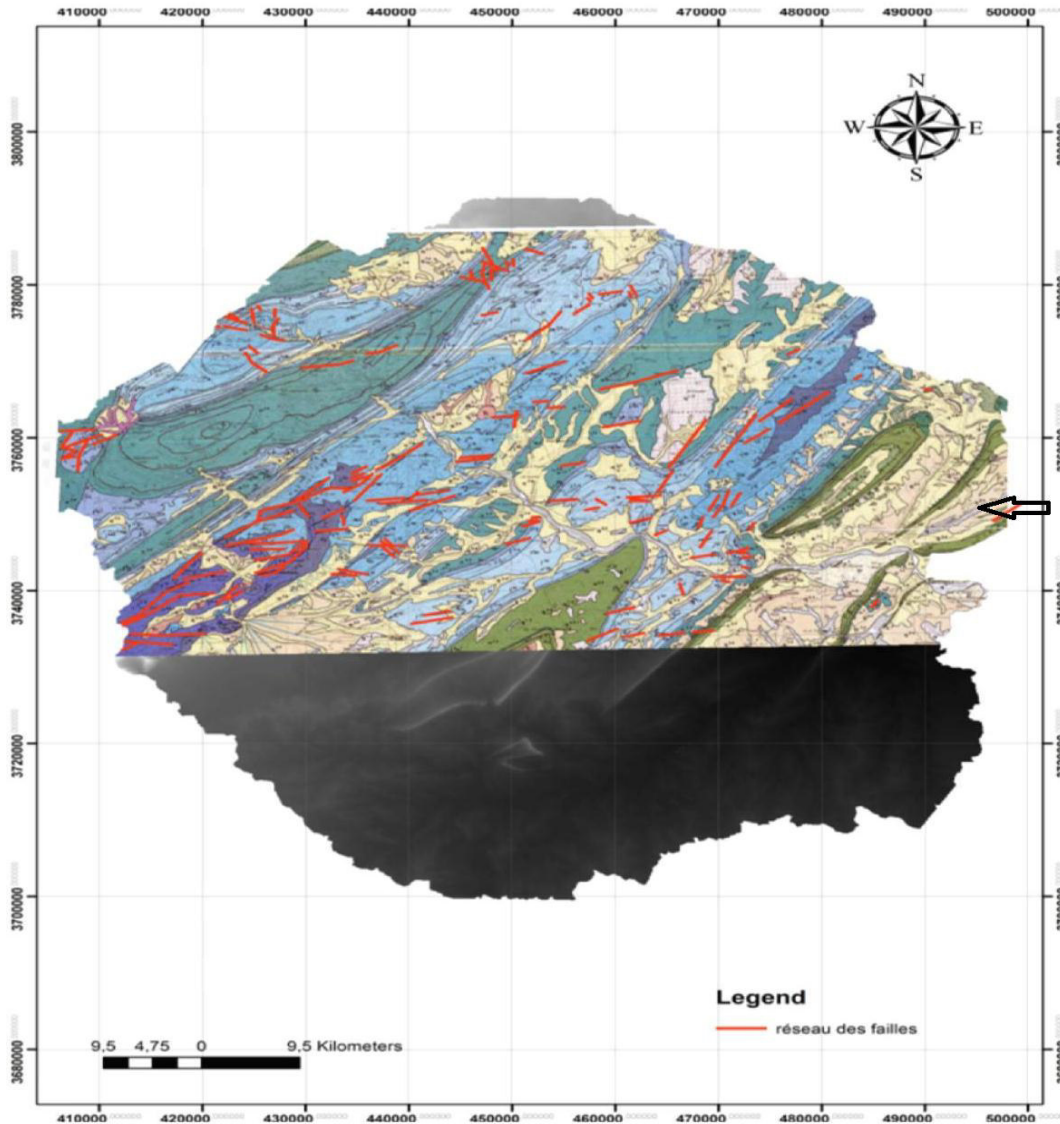


Figure 19 : Schéma structurale de la zone d'étude.

On site aussi le décrochement de Tadjmout de direction NNW-SSE, selon J. Guillemot (1972) pense qu'il s'agit d'un accident touchant le socle. Le long de son trajet, on rencontre les formations sommitales du Quaternaire, généralement constituées de sables rouges dont l'épaisseur

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

permet l'existence d'un inféro – flux. L'importance de l'écoulement souterrain au niveau de Tadjmout avait poussé les autorités françaises à édifier un barrage souterrain captant l'inféro - flux de l'Oued M'zi (in Stamboul.2012).

❖ Description des aquifères:

Le tableau si dessous représente un log hydrogéologique synthétique des différents aquifères

Tableau 11:loghydrogéologique synthétique

LOG	ÉPAISSEUR (m)	ÉTAGE	LITHOLOGIE	CARACTÉRISTIQUES HYDROGÉOLOGIQUES	
	0 - 1	Quaternaire	Albien, sable	Peu perméable	Interstices
	80	Turonien	Calcaire	Perméabilité de fissure	Fissure, Karstique
	150	Cénomani en	Marnes gypseuses	impermeable	Substratum
	100	Albien supérieur	Calcaire gréseux	Perméabilité mixte	Interstices et fissures
	100	Albien inférieur	gréseux	Perméable	Aquifère multicouche Circulation d'interstices et de formes de chenaux
	50 à 60	Aptien			
	1100 à 1200	Valanginien Barrémien			
	120	Portlandien	Calcaire	fissures	Circulation de fissures
	170	Kimméridgien	Marne gypseux	impermeable	Substratum
	150	Kimméridgien	Gréseux	impermeable	Circulation d'interstices
	350	Kimméridgien supérieure	Marno-calcaire Marne gypseux Marno-calcaire	impermeable	Substratum
	500	Kimméridgien supérieure	Gréseux	perméable	Aquifère profond Circulation d'interstices et de fissures

(Chenafi 2013)

❖ **Aquifère du Kimméridgien Supérieur gréseux et argilo-gréseux (formation deKhaloua):**

L'aquifère est installé dans les grés moyen rouges parfois blanchâtres fissurés (N 160°) avec des intercalations d'argile verte bleutée à jaunâtre, d'une épaisseur de 500 m c'est parmi les aquifères les plus important pour la localité d'Ain Madhi, ces grés sont caractérisés par l'émergence de quelques sources (Ain Tlélis, Ain Madhi et Ain Kourdane).

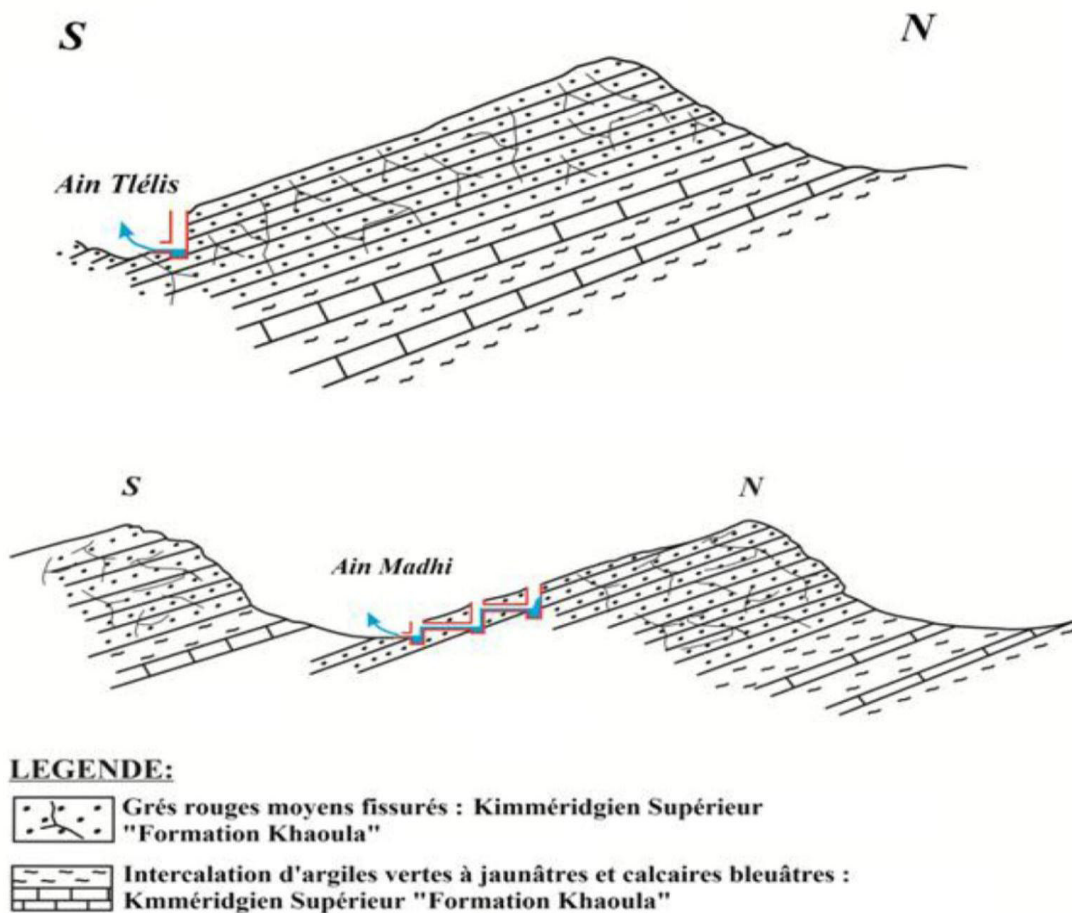


Figure 20: Conditions d'émergence de la source d'Ain Tlélis (0,5 l/s) et d'Ain Madhi (4 à 5 l/s) (Med. Stamboul, 2012).

❖ **Aquifère du Portlandien**

a. **Aquifère des calcaires du Portlandien Inférieur (La base de la formation calcaire de Zeireg) :**

Il est formé essentiellement par des calcaires gris à bleuâtres. Les forages exécutés au sud du djebel Mouesta pour des profondeurs de 150 m montrent une intercalation de calcaires bleuâtres et de marnes vertes à grisâtre avec présence souvent de bancs centimétrique de gypse, le niveau

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

statique est 15 à 20 m, le niveau dynamique est 35 à 40 m pour un débit compris entre 5 et 8 l/s. La minéralisation est supérieure à 2g/l donc l'eau est de mauvaise qualité chimique.

Etage	Description	Coupe	Equipement
P O R T L A N D I E N I N F E R I E U R	De 0 à 24 m : Calcaires bleuâtres avec quelques passages d'argiles verdâtres.		Tube guide 20" (500 mm) de 0 à 05 m et cimentation. <u>12"3/8</u> Tubage plein de 0 à 20 m.
	De 25 à 42 m : Calcaires bleuâtres avec quelques passages de grès rougeâtres.		Tubage crépiné de 20 à 44 m.
	De 43 à 66 m : Calcaires bleuâtres.		Tubage plein de 44 à 52 m. Tubage crépiné de 52 à 68 m.
	De 67 à 100 m : Grès rouges grossiers.		Tubage plein de 68 à 72 m.
			Tubage crépiné de 72 à 84 m.
			Tubage plein de 84 à 88 m.
Tubage crépiné de 88 à 96 m.			
De 101 à 120 m : Calcaires bleuâtres.		Tubage plein de 96 à 100 m. <u>Réduction de 13"3/8 à 9"5/8</u> Tubage plein de 100 à 104 m.	
De 121 à 150 m : Intercalations de calcaires bleuâtres et grès rouges avec de rares passages d'argiles rouges.		Tubage crépiné de 104 à 116 m.	
		Tubage plein de 116 à 120 m.	
		Tubage crépiné de 120 à 132 m. Tubage plein de 132 à 136 m. Tubage crépiné de 136 à 142 m. Tubage plein de 142 à 150 m avec cône de décantation.	

Figure 21: Aquifère des calcaires du Portlandien Inférieur

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

(La base de la formation calcaire de Zeireg)



Photo n°02 : affleurement des calcaires à niveaux marneux du Portlandien (in Chenafi, 2013).

❖ **Aquifère des grès du Barrémien-Albien :**

C'est l'aquifère le plus important de la région du point de vue épaisseur qui dépassent les 1200 m formé par des grès moyens blanchâtres et rougeâtres assez fracturés formant les grands synclinaux de l'Atlas Saharien Central avec des intercalations argileuses.

La plus part des forages se situent au niveau du Barrémien qui se présente comme une seule unité bien individualisée. C'est un aquifère multicouche avec un système supérieur libre est un système inférieur captif et présente une perméabilité mixte.

C'est un aquifère multicouche avec un système supérieur libre est un système inférieur captif et présente une perméabilité mixte.

❖ A Ain Madhi : c'est un synclinale est allongée des dizaine de kms suivant une direction SW – NE pour une largeur moyenne de 10 km Cette structure est limitée par :

❖ Au Sud par l'anticlinal de Tadjmout et sa continuité vers Ain Madhi (les formations du Néocomien supérieur (Le sommet de la formation de Tadmit supérieur).

❖ Au Nord par la grande structure anticlinale qui forme Djebel Azreg : Les anticlinaux allant de Djebel Merkeb à l'ouest (Kourdane) jusqu'à l'anticlinal du Djebel Mdaouar à l'est.

❖ A l'Ouest par la fermeture périclinale des formations allant du Kimméridgien Supérieur au Portlandien Supérieur.

❖ A l'Est par les formations du Jurassiques et du Mio – Plio – Quaternaire.

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

Le réservoir est constitué par l'épaisse série des grés. Les variations de granulométrie et la présence des quelques niveaux argileux rompent la monotonie de la série et ont permis la mise en place d'un aquifère multicouches. Son alimentation se fait directement par les précipitations et il peut fournir un débit important.

A Laghouat au niveau de Hamda Le Barrémien-Aptien-Albien forme un structure anticlinale ou la nappe parfois est en charge surtout à proximité de la charnière, de nombreux forages captent l'aquifère au niveau de cette localité dont le forage de Milok (eau minérale).

❖ **Aquifère du Mio-Pliocène**

On peut en déduire son importance hydrogéologique à partir des forages établis au niveau du sillon prés atlasique, formé par des argiles sables grés et calcaires.

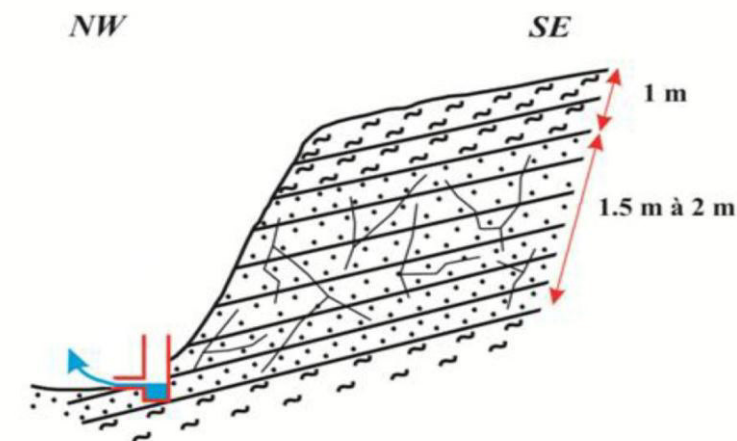
❖ **Aquifère des alluvions quaternaires**

Depuis 1978 on a effectué un nombre très important de puits captant cet aquifère ce que met en valeur son intérêt hydrogéologique. il est formés par des galets, sable et graviers.

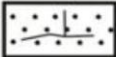
• **Etude de l'aquifère du Barrémien-Albien**

A. **Au Sud à Ain Madhi :** (Figure 22)

A quelques kilomètres au nord-est de Tadjmout et au sud de la route reliant les deux localités Tadjmout et Ain Madhi, émerge la source Ain El M'Zabi au niveau du contact des grés et argiles rouges du Barrémien. Le débit est de 1,5 l/s, cette source est mal captée car l'écoulement est contrecarré par de différents obstacles (constructions d'un abri à son niveau).



LÉGENDE:

 **Grés rouges fissurés**

 **Argiles verdâtres**

Figure 22 : Conditions d'émergence de la source d'Ain El M'adi.

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

B La région de Hamda : Cette plaine est à une quinzaine de kilomètres au nord-est de notre secteur d'étude, c'est un anticlinal occupé par les formations du Mio-Plio-Quaternaire à proximité de l'Oued M'zi qui recouvrent en discordance les grès du Barrémien-Albien. Un forage de 150 m de profondeur a été implanté à proximité de la charnière de l'anticlinal, le forage (Fig. 70) a traversé 50 m de Mio-Pliocène comportant 17 m de sable avec quelques éléments calcaires, puis 100 m de grès à dragées du Barrémien avec quelques intercalations marneuses vers le bas.

B 1. Piézométrie : L'allure générale de la surface piézométrique de la région, présente un écoulement d'ensemble vers le Sud-est donc tous l'écoulement convergent vers l'affluent principale de l'Oued M'zi. Au niveau du pont de Laghouat on a des écoulements superficiels sur 500m de longueur c'est un écoulement permanent qui correspond à une réapparition des eaux de l'inféro-flux Le gradient hydraulique est compris entre 0,28 au pont de Laghouat et 0,03 à l'est du bassin versant au niveau de Ksar El Hirane donc il diminue en allant vers l'Est.

Au niveau de la zone fracturé du chapeau de Gendarme l'écoulement se fait de l'Oued M'zi vers les grès, le gradient hydraulique varie de 0.19 à 0.39

En générale l'écoulement se fait suivant une direction NE-SW avec variation du niveau piézométrique.

Chapitre III: Présentation de la région d'étude

B 2. Hydrodynamique : Une étude de la granulométrie des formations productrices : Mio-Plio-Quaternaire et Barrémien et suite à l'application de la formule de Hazen a donné : une perméabilité de 1,69 cm / s (0,0169 m/s) pour les formations du Mio-Plio-Quaternaire et 7,8 cm/s (0,078 m/s) pour les grés Barrémien.

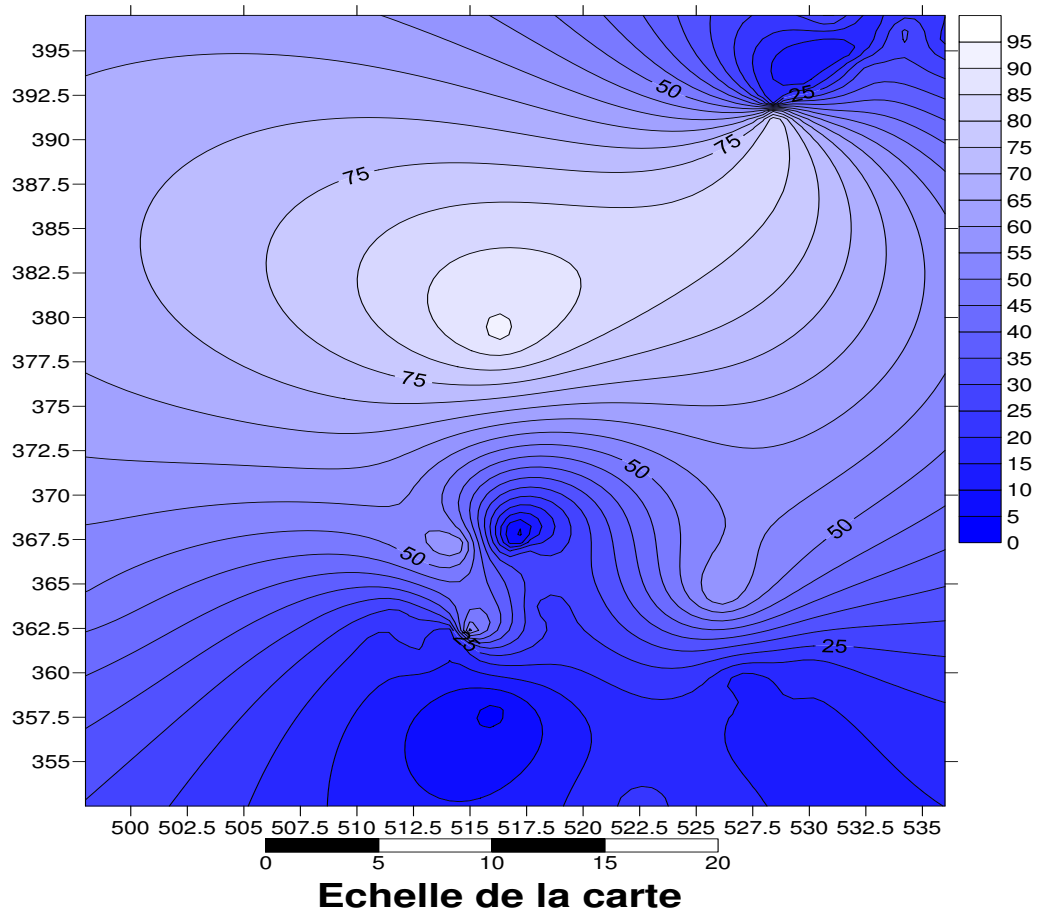


Figure 23: Carte piézométrique de la région de Hamda et Dakhla

(in, Chenafi 2013)

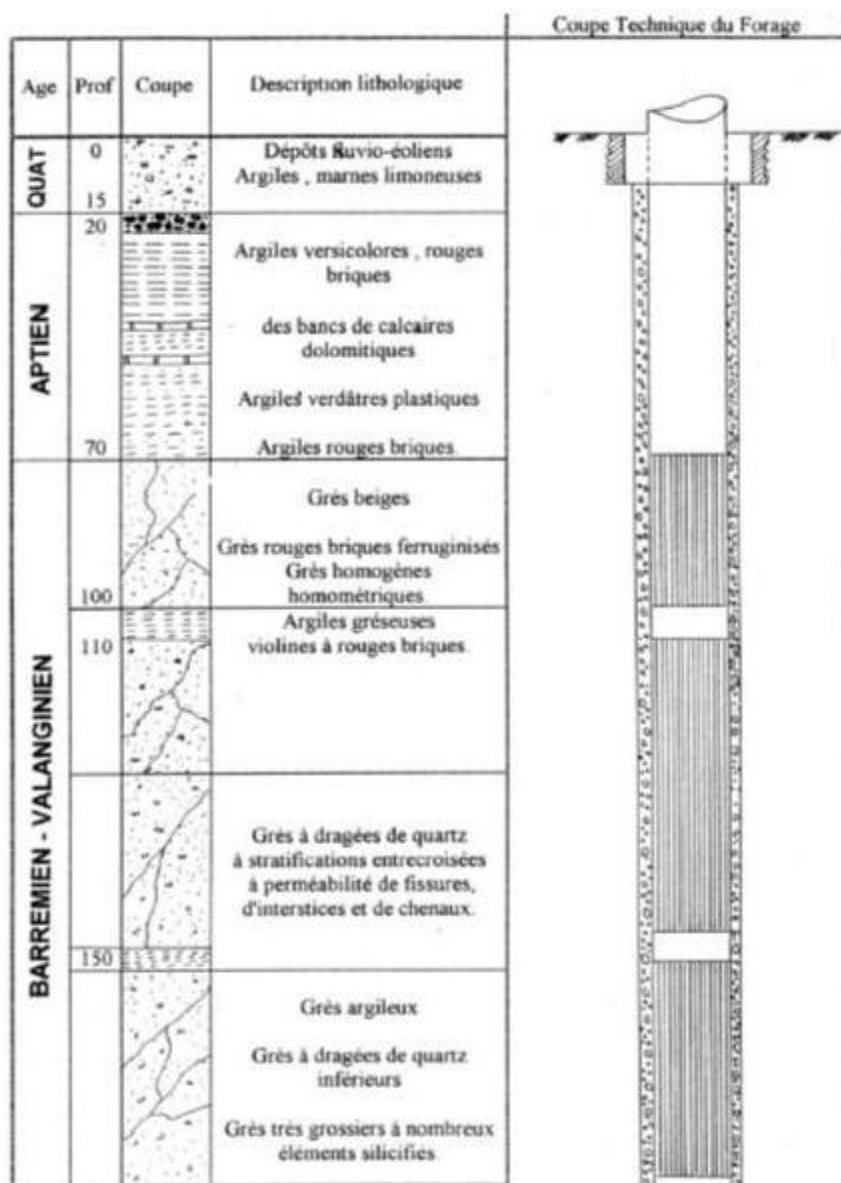


Figure 24: coupe lithologique et technique du forage Fh1 Hamda

III.11.6- CONCLUSION :

L'hydrogéologie de la région est influencée par la structure, les grands synclinaux des grés fissurés du Barrémien-Albien constituent les aquifères les plus importants du Djebel Dakhla et les flexures de jurassique forment les lieux de séparation de ces aquifères.

L'étude piézométrique montre un écoulement principal de direction vers le sud et sud-est pour les du Barrémien-Albien, la transmissivité varie de $8,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ à $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et un coefficient d'emmagasinement (estimé) de $0,33 \cdot 10^{-8}$ à $0,4 \cdot 10^{-6}$ indiquant un système captif en profondeur.

Pour les aquifères liés aux formations du Mio-Plio-Quaternaires l'écoulement se fait généralement vers le Sud-est, ils convergent vers l'affluent principal de l'Oued M'zi. Le gradient hydraulique de 0,28 au pont de Laghouat.

Chapitre IV: Matériel et Méthodes

IV.1- Méthodes de vulnérabilité intrinsèque utilisées dans la région d'étude:

Les méthodes DRASTIC et SINTACS sont les méthodes utilisées lors de ce travail pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque à la pollution de la nappe phréatique de la région d'étude.

IV.1.1- La méthode DRASTIC:

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

L'acronyme DRASTIC correspond aux initiales des sept facteurs déterminant la valeur de l'indice de vulnérabilité (Figure25):

- **D): Depth to water** ou profondeur du plan d'eau ;
- **(R): net Recharge** ou recharge efficace ;
- **(A): Aquifer media** ou milieu aquifère ;
- **(S): Soil media** ou type de sol ;
- **(T): Topography** ou pente du terrain ;
- **(I): Impact of vadose zone** ou impact de la zone vadose (zone non saturée) ;
- **(C): hydraulic Conductivity of the aquifer** ou conductivité hydraulique de l'aquifère.

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

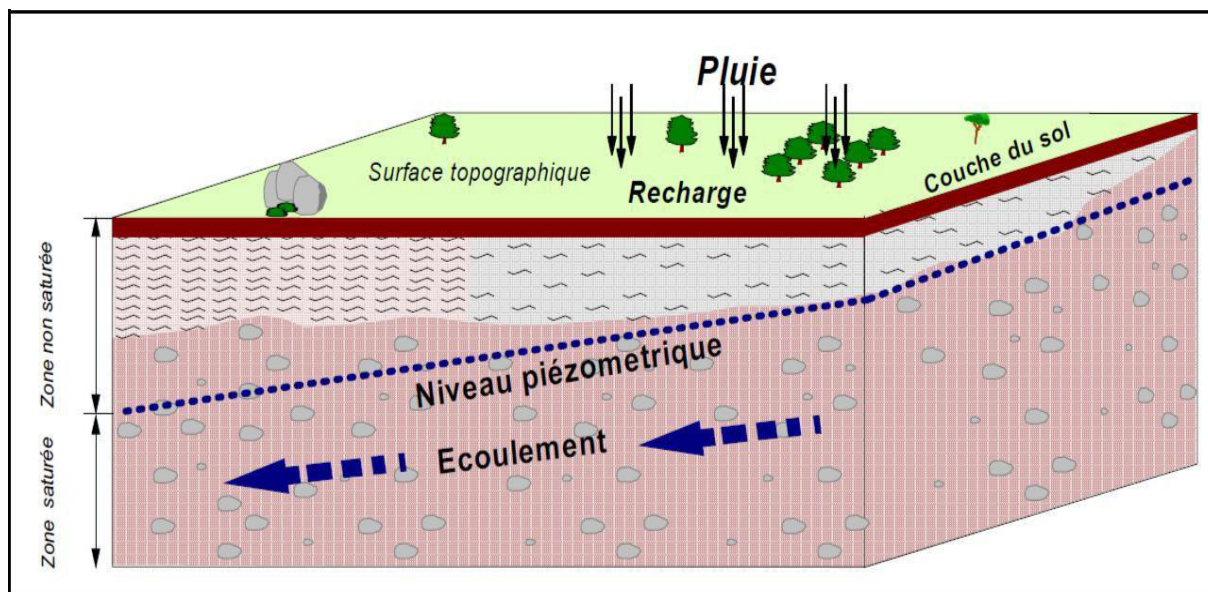


Figure 25: Schéma représentant les paramètres intervenants dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par la méthode DRASTIC

(Sinan et Bouibrine, 2007)

Les sept paramètres découpent, de façon schématique, une unité hydrogéologique locale en ses principales composantes, lesquelles influencent à différents degrés les processus de transport et d'atténuation des contaminants dans le sol, et leur temps de transit. Une valeur numérique (poids paramétrique) comprise entre 1 et 5, reflète le degré d'influence de chacun d'eux (Tableau 12).

Tableau 12: Poids des paramètres dans la version DRASTIC standard.

Paramètres	Poids
D : profondeur du plan d'eau	5
R : recharge efficace	4
A : matériaux de l'aquifère	3
S : type de sol	2
T : pente du terrain	1
I : matériaux de la zone non saturée	5
C: conductivité hydraulique de l'aquifère	3

Source: Aller et *al.*, 1987.

A chacun des paramètres est associée une cote variant de 1 à 10, définie en fonction des intervalles des valeurs. La plus petite cote représente les conditions de plus faible vulnérabilité à la contamination.

Chapitre IV: Matériel et Méthodes

Pour les paramètres quantitatifs : la profondeur du plan d'eau, la recharge efficace de l'aquifère, la pente du terrain et la conductivité hydraulique de l'aquifère, les classes se présentent sous forme d'intervalles de valeurs numériques, et ne posent pas de ce fait de problèmes dans la classification et dans l'attribution des cotes correspondantes à chaque classe. En effet, les cotes sont directement attribuées aux différentes classes déterminées dans chaque paramètre selon la classification proposée pour ces paramètres dans la méthode DRASTIC par Engel *et al.* (1996).

Concernant les paramètres qualitatifs (lithologie des matériaux de l'aquifère, types de sol, et lithologie des matériaux de la zone non saturée), ils peuvent ne pas correspondre exactement aux classes proposées par les tableaux du guide pratique de la méthode DRASTIC, et à ce moment là, il faut suivre un raisonnement logique, pour pouvoir déterminer les classes adéquates, et attribuer par la suite à chaque classe la cote correspondante.

Valeur numérique appelée indice de vulnérabilité DRASTIC et notée ID est déterminée, elle décrit le degré de vulnérabilité de chaque unité hydrogéologique. L'indice de vulnérabilité est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants:

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

Où

D, R, A, S, T, I, et C sont les sept paramètres de la méthode DRASTIC, p étant le poids du paramètre et c, la cote associée (Fortin *et al.*, 1997; Fritch *et al.*, 2000; Knox *et al.*, 1993). Les valeurs de l'indice DRASTIC obtenues, représentent la mesure de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère (Hamza *et al.*, 2004). Ces valeurs varient de 23 à 226 (Engel *et al.*, 1996). Elles sont subdivisées en huit intervalles (Murat *et al.*, 2003). Ces valeurs représentent la mesure de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère et se situent dans la gamme des valeurs théoriques selon la classification de Engel *et al.* (1996) qui a permis de fixer les limites des intervalles des indices calculés et de faire correspondre des classes de vulnérabilité à ces indices.

Tableau 13: Cotes accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC

Profondeur du plan d'eau (D) (m)		Recharge efficace (R) (mm/an)	
0 – 1,5	10	0-50	1
1,5 – 4 ,5	9	50-100	3
4,5 – 9	7	100-180	6
9 – 15	5	180-250	8
15 – 23	3	> 250	9
23– 31	2		
>31	1		
Lithologie de l'aquifère (A)		Nature du sol (S)	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sable,	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats ou pentes	7
Grès massif	6	Limon sableux	6
Shales en séquence	6	Limon	5
Métamorphique altéré, grès lités, calcaires	4	Limon silteux	4
Métamorphique	4	Limon argileux	3
Shale massif	3	Argile non agrégée et non fissurée	1
	2		
Pente du terrain (T) (%)		Lithologie de la zone non saturée (I)	
0-2	10	Calcaire karstique	10
2-6	9	Basalte	9
6-12	5	Sable et gravier	8
12-18	3	Sable et gravier avec silt et argile	6
>18	1	Calcaire lité, grès, shale	6
		Grès	6
		Calcaire	6
		Shale	3
		Silt/argile	1
Conductivité hydraulique (C) (m/j)			
	0,04-4		1
	4-12		2
	12-29		4
	29-41		6
	41-82		8
	>82		10

Source: Engel *et al.*, 1996.

IV.1.2- La méthode SINTACS:

La méthode SINTACS c'est une adaptation de la méthode DRASTIC à la cartographie à grande échelle en utilisant les mêmes paramètres (Petelet *et al.*, 2000; Hamza *et al.*, 2007).

D'après Hamza *et al.* (2007), la spécificité de la méthode SINTACS par rapport à la méthode DRASTIC est qu'elle propose cinq scénarios différents de vulnérabilité :

- **Le scénario "impact normal"** correspond aux régions où les transformations sont rares, avec existence ou non de terres cultivées et une utilisation très faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et aux périmètres urbains très disperses.
- **Le scénario "impact sévère"** correspond aux régions où l'occupation des sols est intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, aux implantations industrielles et urbaines denses, et aux dépôts liquides et solides de déchets.
Ces deux scénarios sont relatifs aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés, localisés dans des aires à sols épais, avec une profondeur du plan d'eau qui n'est pas très élevée.
- **Le scénario " drainage important à partir d'un réseau superficiel "**, relatif aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau.
- **Le scénario " terrain très karstifié "**, concernant les aires caractérisées par une forte karstification.
- **Le scénario " terrain fissuré "**, correspondant aux zones caractérisées par une forte fracturation.
Un poids compris entre 1 et 5 est attribué à chaque paramètre, et chaque paramètre est classé en plusieurs classes, dont chacune est associée à une cote variante de 1 à 10 (Tableau n°13). Contrairement à la méthode DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et dans des différentes cellules, des poids variables selon les situations (Schnebelen *et al.*, 2002).
- L'indice de vulnérabilité SINTACS est calculé de la même façon que la méthode DRASTIC. Selon les valeurs de cet indice quatre classes de vulnérabilité peuvent être extraites.

Tableau 14: Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode.

Scénario	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

Source: Civita, 1994 in Hamza *et al.*, 2007

Chapitre V:

Résultats et Discussion

V.1-Introduction :

L'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque à la pollution de la nappe phréatique de la cuvette de Dakhla s'est faite à partir de deux méthodes DRASTIC et SINTACS. Ces méthodes ont été couplées au SIG à fin de cartographier la vulnérabilité.

Les résultats obtenus par ces méthodes sont présentées dans ce chapitre.

V.2- Evaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC :

La méthode DRASTIC c'est une moyenne pour évaluer le degré de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. Elle prend en considération les facteurs suivants: la profondeur de l'eau (D) ; la recharge efficace (R) ; les matériaux de l'aquifère (A) ; le type de sol (S) ; la topographie ou la pente (T) ; l'impact de la zone non saturée (I) et la perméabilité ou la conductivité hydraulique de l'aquifère (C).

V.2.1-Traitement des paramètres DRASTIC:

1.1 Profondeur de plan d'eau (D):

La profondeur de plan d'eau dans notre région augmente en allant de l'Est vers l'Ouest. Selon la classification DRASTIC, trois classes de profondeur ont été déterminées à savoir:

- 15m < D < 23m couvre 12.16% de la nappe étudiée où la cote est 3;
- 23m < D < 31m avec une cote égale à 2, couvre 15.02% de la région;
- D > 31 m avec une cote égale à 1, et cette partie couvre 72.82%;

1.2. Recharge efficace (R):

Il s'agit de la quantité d'eau atteignant la zone saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette). Elle dépend de l'infiltration efficace et de sa répartition dans l'espace et dans le temps, donc du climat (ETP, précipitations), mais également de la topographie et de la nature des formations. Elle constitue un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines (Bézègues et *al.*, 2002; Haouchine et *al.*, 2010).

Dans ce travail, la recharge a été calculée à travers l'équation de Williams et Kissel (1991) qui est mentionnée dans le tableau 15

Tableau 15 : équation de Williams et Kissel (1991)

Groupe hydrologique	Type de sol	Equation de Williams et Kissel
A	Sols graveleux profonds	$R = (P - 10,28)^2 / (P + 15,43)$
B	sols sableux, sols forestiers gréseux et sols sablo-limoneux.	$R = (P - 15,05)^2 / (P + 22,57)$
C	sols limono-sableux, sols sablo- argileux, sols argilo-sableux et encroûtement nodulaires.	$R = (P - 19,53)^2 / (P + 29,29)$
D	sols hydromorphes argileux et sols de périmètres urbains	$R = (P - 22,67)^2 / (P + 34,00)$

Où:

R: est la recharge efficace (mm/an)

P: est la pluviométrie annuelle (mm/an)

D'après la carte géologique et lithologique de la région d'étude éditée par la Direction des mines et de la géologie Algérienne, et la coupe prise a travers les montagnes de l'Atlas Saharien, réalisée par les services de la géologie durant l'ère coloniale français; le sols de la zone d'étude appartiennent aux groupes hydrologiques:

- A- Sols graveleux profonds
- C- sols limono-sableux, sols sablo-argileux, sols argilo-sableux et encroûtement nodulaires.

La précipitation annuelle calculée à partir des données de L'ANRH et La DRE Laghouat, pendant une durée de plus de 20 ans est de l'ordre de 176 mm, ce qui donne deux valeurs recharge hydraulique:

✚ $R_{\text{hyd-A}} = 143.5 \text{ mm/an}$

✚ $R_{\text{hyd-c}} = 119 \text{ mm/an}$

1.3. Lithologie de l'aquifère (A)

Deux classes lithologiques ont été déterminées:

- ❖ le sable et gravier dans la majorité de la cuvette (la plaine de Dakhla) et sa couvre 84% de la région d'étude dans la cote est égale à 8
- ❖ des couches de calcaire Karstique massif intercalées par des argiles fissurés sur les cotés de Djebel Dakhla et couvre le reste 16%, donc sa est 10.

1.4. Type de sol (S):

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

La pédologie a été extraite de la carte et des études pédologiques effectuées par DSA de Laghouat entre 2004 et 2010. En se basant sur la classification pédologique de la méthode DRASTIC, trois classes ont été extraites, celle de gravier avec une cote 10 qui couvre la plaine de la région étudiée et celle de sable avec une cote 9 dans une superficie atteindre presque 20% de la cuvette et une troisième classe sur les cotées de Djebel (Argile et Agrégats) couvre 12% de la surface totale.

1.5. Topographie (T):

La pente est un élément déterminant dans l'orientation et l'organisation des cours d'eau. Plus la pente est faible, plus l'écoulement lente et donc la vulnérabilité est forte.

D'après carte topographique de la zone tracée par le logiciel Mapinfo 6.5 et le logiciel Vertical-mapper on classe la topographie en trois intervalle.

Le tableaux ci-dessous montre les classes de la pente et les cotes associées a chaque intervalle

Tableaux 16 : les classes de la pente et les cotes

Intervalle de pente%	% de la surface occupée	Cote attribuée
0-2	72 %	10
2-6	15 %	9
12-18	13 %	3

1.6. Lithologie de la ZNS (I):

La lithologie est déterminée par l'interpolation des couches, en utilisant comme données de base, la lithologie des forages réalisés par la DRE et la DSA et la coupe lithologique de la cuvette de Dakhla et la carte piézométriques tracée.

trois classe de la zone non saturée ont été identifiées:

- ❖ gravier sa cote est 10
- ❖ sable avec une cote de 9
- ❖ argile et agrégats sa cote est égale à 7.

1.7. Conductivité hydraulique de l'aquifère (C):

La conductivité hydraulique est la facilité qu'a un fluide pour se déplacer dans une formation. Elle est reliée de manière étroite à la perméabilité dont une roche plus perméable possède une conductivité hydraulique plus élevée (Renard_a, 2002). elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe (Bézègues et *al.*, 2002).

Les valeurs de conductivité hydraulique utilisées sont déterminées a partir des couches traversées par les eaux infiltrées en utilisant le tableau des valeurs indicatives de la conductivité hydraulique (Ecole polytechnique fédérale de Lausanne).

Tableau 17 : la conductivité hydraulique et les cotes attribuées dans la zone d'étude

Nature de sol	Ks en m/s	Ks en m/j	Cote "DRASTIC"
Sol argileux de surface	10^{-7} à 10^{-6}	0,01 à 0,1	-----
Sols limoneux de surface	10^{-6} à 10^{-5}	0,1 à 1	-----
Sable fin	10^{-5} à 5.10^{-5}	1 à 5	-----
Sable moyen	5.10^{-5} à $2,5.10^{-4}$	5 à 20	6
Sable grossier	$2,5.10^{-4}$ à 10^{-3}	20 à 100	8
Gravier	$> 10^{-3}$	> 100	10

V.2.2-Carte de vulnérabilité DRASTIC:

L'indice DRASTIC de notre région d'étude varie entre 106 et 162. La Figure 26 montre que les basses valeurs de cet indice sont enregistrées au Nord Est de la région et elles augmentent en allant au Sud Ouest de la cuvette.

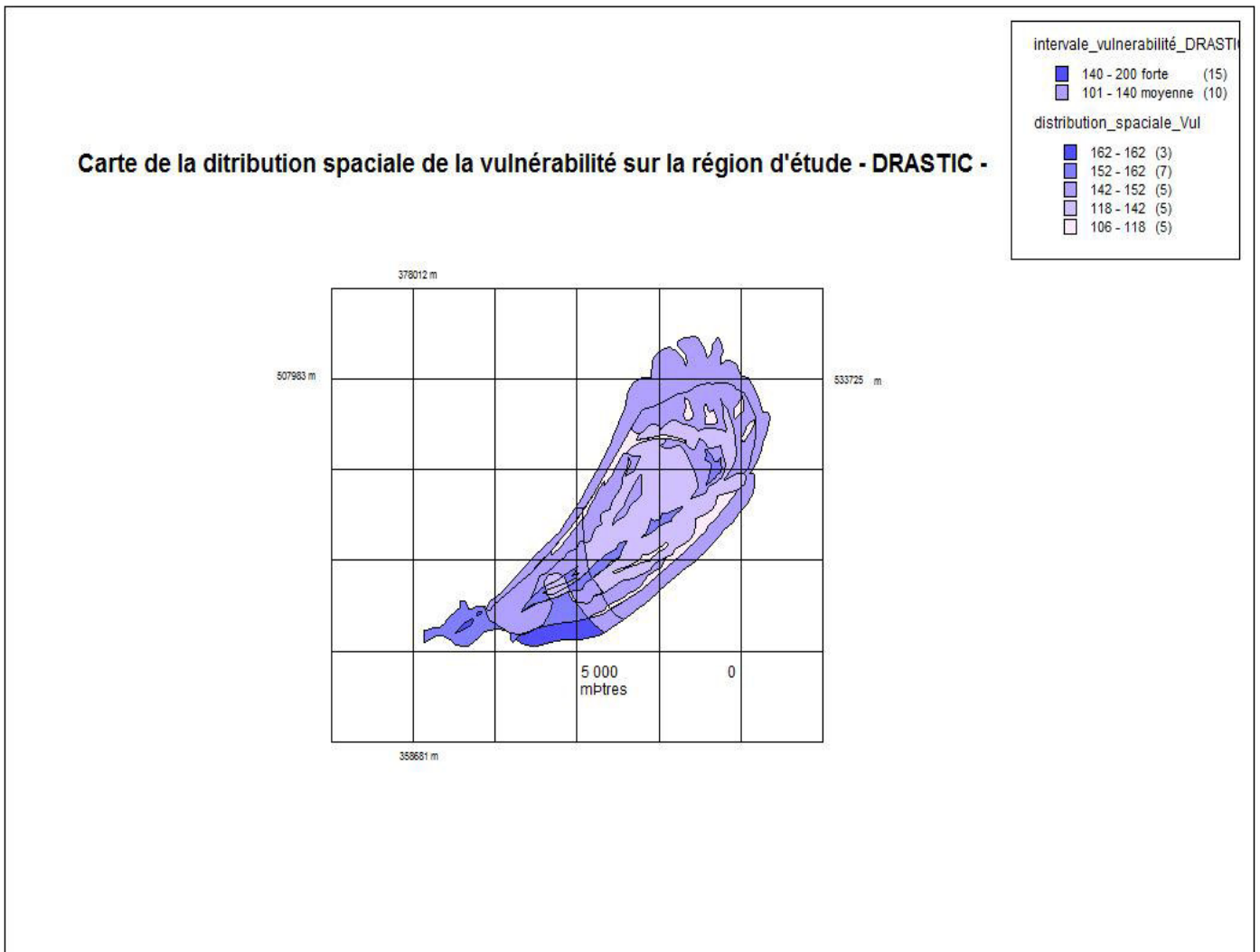


Figure 26: Carte de répartition spatiale de l'indice DRASTIC

Après le regroupement des valeurs obtenues des indices en fonction des classes de la méthode DRASTIC tableau 18, on obtient la carte suivante qui permet de visualiser le degré relatif de vulnérabilité de chaque secteur de la zone étudiée.

Tableau 18 : le classement des indices de vulnérabilité de la méthode DRASTIC

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité (ID)
Faible	< 101
Moyen	101 – 140
Fort	141 – 200
Très fort	> 200

L'observation de la carte de vulnérabilité (figure 27) montre que la répartition spatiale des degrés de vulnérabilité de la nappe au niveau de la cuvette de Dakhla est généralement de moyenne à forte vulnérabilité.

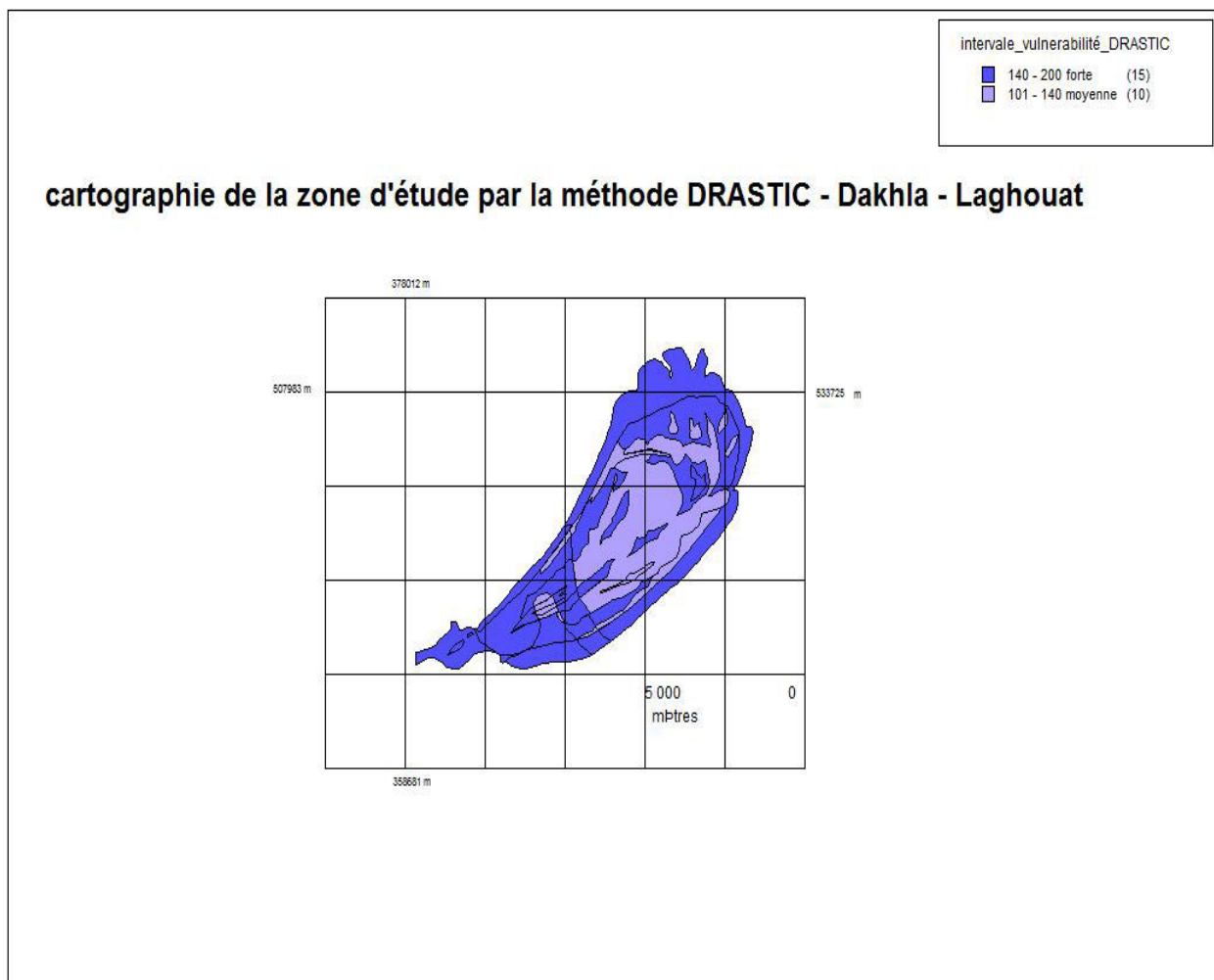


Figure 27: Carte des classes de la vulnérabilité -DRASTIC-

V.2.3- Discussion :

Les classes de vulnérabilité forte sont localisées le long de contour de zone d'étude et peuvent s'expliquer par la faible profondeur du plan d'eau, la forte recharge efficace et la perméabilité des formations lithologiques de la zone vadose (perméabilisé en grand -fissures -) , Ces conditions favorisent l'infiltration des contaminants et ces secteurs sont sensibles à la pollution et doivent donc être surveillés.

La classe à vulnérabilité moyenne proportionnellement est essentiellement située au début de la plaine de la région des deux cotés de Djebel Dakhla. La vulnérabilité moy peut s'expliquer par la faible perméabilité des formations lithologiques de la zone non saturée, la profondeur de la nappe qui est assez importante 31 m >H> 60 m et la faible recharge.

Les zones à vulnérabilité faible occupent le reste du territoire étudié. Elle est due essentiellement à la profondeur de la nappe importante et la texture de la zone vadose qui ne favorise pas l'infiltration.

L'analyse de la figure 27 révèle que la région est couverte par deux classes de vulnérabilité à la pollution, Il s'agit d'une classe de vulnérabilité forte qui occupe une grande partie de la zone d'étude (61 %) et la classe de vulnérabilité moyenne qui couvre 39 % du territoire étudié.

V.2.4- Sensibilité Du Modèle DRASTIC :

Les statistiques descriptives des paramètres DRASTIC (tableau 4) montrent que les paramètres ; Le type de sol S , la conductivité hydraulique C et la lithologie de l'aquifère A dont les notes moyennes sont respectivement : 10,2; 10,3; et 10,3 favorisent davantage le risque de contamination de la nappe étudiée. Cependant les paramètres ; recharge R et profondeur de la nappe D, contribuent de manière plus significative aux variations de l'indice de vulnérabilité.

V.3- Evaluation de la vulnérabilité par la méthode SINTACS:

La méthode SINTACS traite les mêmes paramètres que la méthode DRASTIC sauf qu'elle prend en considération la situation de l'aquifère dont elle propose cinq scénarios de vulnérabilité de l'aquifère qui sont en fonction de l'occupation de sol.

1. Traitement des paramètres SINTACS:

Pour ce qui concerne les paramètres profondeur du plan d'eau (S), recharge efficace (I), lithologie de la zone non saturée (N), type de sol (T), type de l'aquifère (A), conductivité hydraulique (C), et topographie (S) on garde les mêmes cotes que celles de la méthode DRASTIC avec des poids qui varient en fonctions des scénarios.

Le découpage de la région d'étude en fonction des scénarios a été réalisé sur la base de la carte géologique, la carte topographique et de la carte géographique dont l'échelle de ces cartes est 1/200000 et 1/100000.

2. Carte de vulnérabilité SINTACS:

L'élaboration de la carte de vulnérabilité SINTACS se fait de la même manière que la méthode DRASTIC après le calcul de l'indice de vulnérabilité (SINTACS).

Tableau 19 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SINTACS

Indice de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité
< 106	Faible
106–186	Moyen
187–210	Elevé
> 210	Très élevé

Source: Civita, 1994 in Hamza *et al.*, 2007

Les valeurs de l'indice SINTACS dans la région d'étude s'étalent entre 106 et 183, déterminant un seul degré de vulnérabilité le degré moyen (Figure 28, tableau 19).

Les scénarios utilisés dans notre région d'étude sont:

➤ **Le scénario "impact normal"**

Correspond aux régions où les transformations sont rares, avec existence ou non de terres cultivées et une utilisation très faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et aux périmètres urbains très dispersés.

➤ **Le scénario " terrain très karstifié ", concernant les aires caractérisées par une forte karstification**

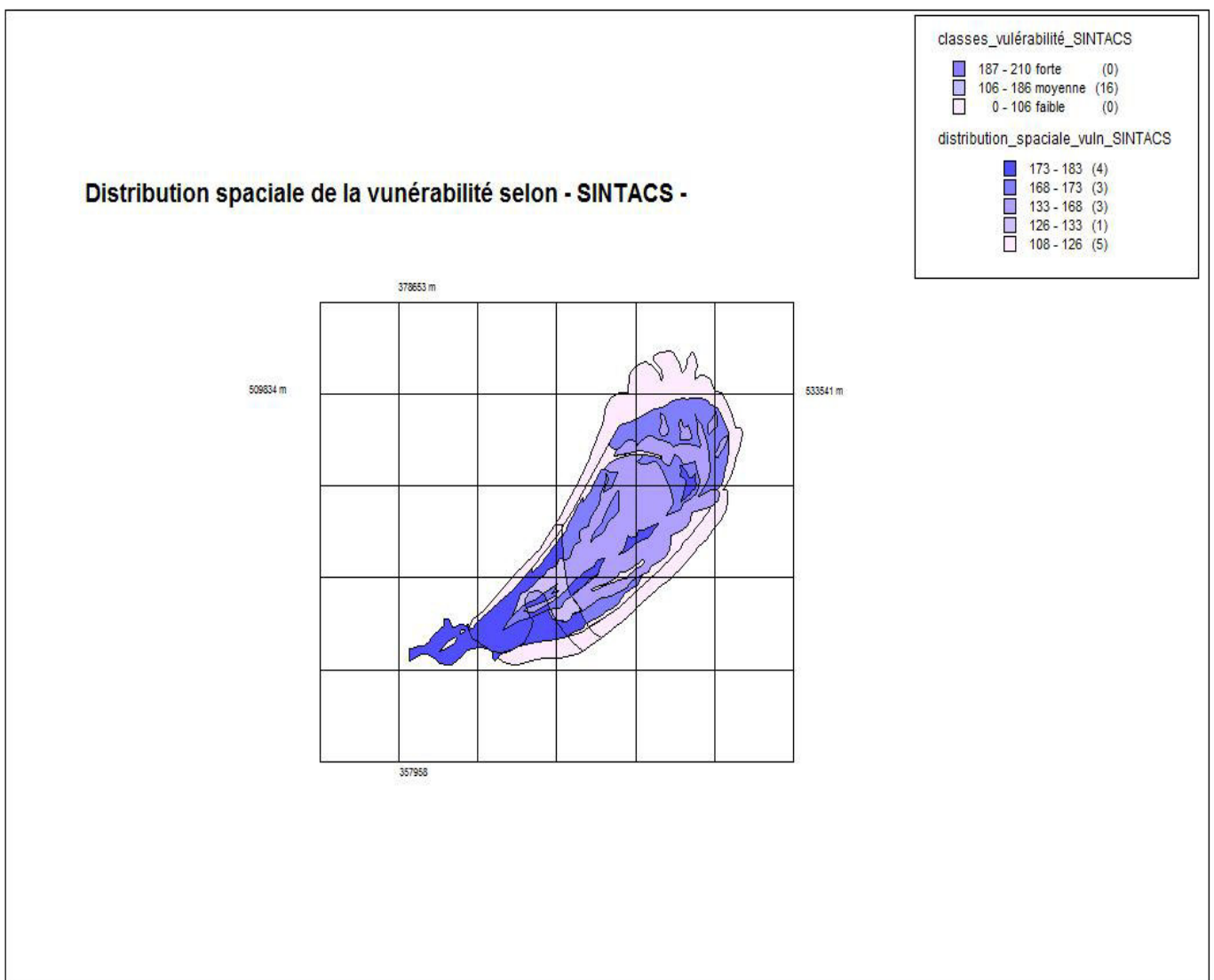


Figure 28 : Carte de répartition spatiale de l'indice SINTACS

Chapitre V: Résultats et discussion

Et après le regroupement des valeurs de l'indice de vulnérabilité de SINTACS en fonction des classes cité au tableau ci-dessus on acquiert:

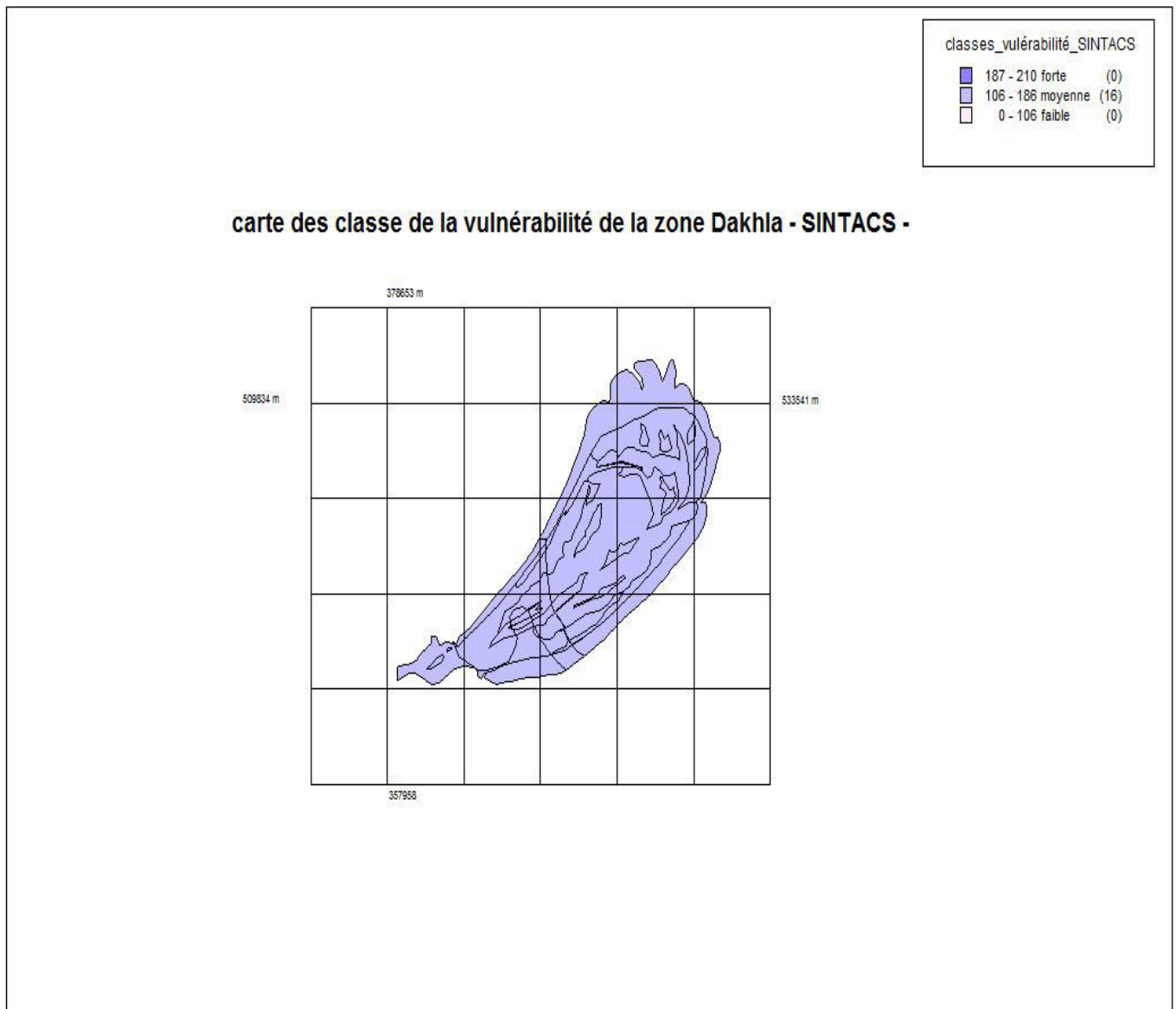


Figure 29 : Carte des classes de vulnérabilité - SINTACS

V.4- Discussion:

La carte de vulnérabilité SINTACS (Figure 29) met en évidence une seule classe de moyen degré de vulnérabilité qui occupe la surface totale de la région étudiée (100%). Il est la même malgré avec l'utilisation des deux scénarios. Le scénario normale pour la plaine de la synclinale et les scénario Karst pour les berges de Djebel Dakhla, la méthode SINTACS a donné la même classe de vulnérabilité ce qui montre que la texture de la zone vadose n'a pas influé sur la classe de la vulnérabilité, mais que sur les valeurs de l'indice de la vulnérabilité.

Ces résultats indiquent que la nappe phréatique de la région de Dakhla, est assez menacée par la pollution, si on basant sur les résultats fournis par la méthode DRASTIC, qui nous a montré deux degrés de vulnérabilité qui sont le degré moyen et le degré élevé mais avec des différentes superficies.

La carte DRASTIC montrent que plus de 60% de la superficie de la nappe étudiée est à vulnérabilité forte et le reste est à vulnérabilité modérée, dont la lithologie de la zone non saturée est le paramètre déterminant de la vulnérabilité parce que les autres paramètres sont presque homogènes dans toute la région étudiée avec une différence remarquable dans la topographie et comme son poids est faible (1) n'a pas affecté la vulnérabilité d'une façon appréciable. Cependant, la carte SINTACS met en évidence que la totalité de la surface est de vulnérabilité moyenne.

Ces résultats montrent l'effet de la profondeur de la nappe sur le degré de la vulnérabilité, ça c'est évident dans les endroits où la profondeur de la nappe est entre 15 et 23 m qui a donné des indices de vulnérabilité étalent entre 173 et 183, idem pour la lithologie de la zone vadose mais avec un degré moins affectant.

En basant a ces résultats on déduit que la méthode DRASTIC est la méthode la plus appropriée aux conditions régionales par ce qu'elle prend en considération le paramètre du sol qui s'avère très important dans l'estimation de la vulnérabilité des eaux de la nappe phréatique et qui est négligé par la méthode SINTACS qui ne prend pas en considération les paramètres qui ont une influence sur la migration d'un polluant du sol vers la nappe.

Cette étude mérite d'être une référence pour les décisions des projets d'investissement au prochaines années et aideras au choix d'investissement et des périmètres de protection.

Conclusion Générale

Notre zone d'étude (la synclinale de Dakhla), située au Nord-Est de la ville de Laghouat. Cette région est caractérisée par une longue période de sècheresse, une température moyenne annuelle assez importante, précipitation faible (175 mm/an), un taux d'évapotranspiration très élevé et un indigence des eaux superficielle, tout ça montre la grande importance des eaux souterraines.

Ces eaux qui se trouvent en trois couches qui sont stratifiées de bas en haut; Le continental intercalaire, Le complexe terminal et la nappe phréatique, cette dernière située sous un sol souvent formé des dépôts actuels.

Vu l'importance de la région de Dakhla du point de vue agricole (la majorité des sols sont des dépôts d'Oued) fertile et riche en matière, qui est très valable pour tout type de culture, élevage, et sa grande superficie, se sont des qualités favorisant dans les prochaines années une accélération continue des activités anthropiques, la multiplication des forage et l'énorme exploitation des eaux souterraines, vont augmenter le risque de contamination de la nappe.

La vulnérabilité intrinsèque à la pollution est notre soucis dans ce travail, pour ça nous avons déterminé le degré de la vulnérabilité du champ d'étude, en utilisant deux méthodes (DRASTIC et SINTACS).

La méthode DRASTIC prend en considération sept paramètres qui sont; la Pente, la recharge hydraulique, le Type de sol, la Lithologie de la zone non saturée, le Niveau piézométrique, la Lithologie de l'aquifère et la Conductivité hydraulique.

Les valeurs de l'indice de la vulnérabilité DRASTIC dans notre zone sont divisées en deux classes; la première est de vulnérabilité moyenne qui s'étend sur 38 % de la région d'étude, il s'agit de la partie a sols sableux, mais avec une profondeur de nappe assez importante. La deuxième couvre 62 % du champ étudié avec une vulnérabilité élevée ce qui impose des mesures (périmètres) de protection particulier.

La méthode SINTACS utilise en plus que les sept paramètre DRASTIC, l'occupation du sol sous forme de scénarios.

Notre cas d'étude supporte deux scénarios; le scénario d'impact normal et le scénario d'impact Karst, le premier scénario concerne les zones ou les transformations sont rares, située dans la plaine de la cuvette de Dakhla, et le deuxième scénario "karst" correspond aux régions de structures karstique (perméabilité en grand). Il occupe les berges de Djebel Dakhla sur son pourtour.

L'estimation de la vulnérabilité par la méthode SINTACS montre une seule classe de vulnérabilité avec un degré moyen malgré l'utilisation des deux scénarios.

Conclusion Général

Les résultats obtenus par la méthode DRASTIC montre que les paramètres déterminants de la vulnérabilité de la zone sont sa profondeur de la nappe et sa lithologie de la zone non saturée.

Par contre, la méthode SINTACS montre une homogénéité dans toute la région avec une légère influence de la structure de la zone non saturée pour le scénario normal.

On conclure que la méthode DRASTIC a été plus prudente du fait qu'elle a pu donner un degré de vulnérabilité fort, et elle englobe tout les paramètres qui déterminent les risques de la pollution.

ملخص

المنطقة موضوع الدراسة تعد حقلا ذو أهمية فلاحية قصوى نظرا لما تتمتع به من خصائص ذات قيمة كبيرة ك نوعية التربة الخصبة, و شساعة المساحة مما يجعلها محل اهتمام في المستقبل القريب لتكون حاوية لمشاريع استثمارية كبرى كزراعة الحبوب, تربية المواشي أو لإنشاء مصانع لإنتاج الأعلاف.

هذه المشاريع قد تساهم و بصفة مستمرة في تدهور نوعية و كمية المياه الباطنية و ترفع من إمكانية تلوثها.

و للحيلولة دون وقوع ذلك إقترحنا ضمن هذه الدراسة طريقتين لتقدير و تحديد حساسية طبقة المياه الجوفية و هما طريقة (L. Aller et al.1987) DRASTIC و طريقة (Civita, 1994) SINTACS مع ربطهما بمنظومة المعومات الجغرافية SIG و هذا سمح لنا بمقارنة نتائج الطريقتين فيما بينهما و تقييمهما.

الخريطة الناتجة بطريقة DRASTIC للحساسية اتجاه التلوث تظهر أكثر دقة مما يمكن مستقبلا من إستخدامها كمرجع لتقدير مدى إمكانية تأثر و تدهور نوعية المياه الباطنية.

Résumé

La région d'étude est une zone agricole en priorité dont la majorité de la surface à un sol fertile (dépôts actuels riche en apport d'Oued), ceci rendre ce champ qualifié pour un grand investissement agricole, élevage et usine d'aliment de bétail....etc.

ces investissements attendus contribue d'une façon continue à la dégradation qualitative et quantitative des eaux souterraines et augmentent leur risque de contamination.

la présente étude propose d'évaluer et de spécialiser la sensibilité de la nappe étudiée. vis-à-vis de la pollution a l'aide de la modélisation couplée au SIG.

l'application de deux modèles, le modèle DRASTIC (L. Aller et al. 1987) et le modèle SINTACS (Civita,1994) a permet de comparer entre eux les résultats des deux méthodes et les évaluer.

la carte de la susceptibilité obtenue pour le modèle DRASTIC s'avère plus performante, elle peut être considéré comme un outil très efficace. quoique perfectible, pour estimer le risque de la dégradation de la qualité des eaux souterraines.

Abstract

The study area is a priority agricultural area, the majority of which is on a fertile soil (presently rich deposits of wadis) this make the field qualified for a large agricultural investment, livestock and livestock feeder.

These expected investement contribute continiously to the degradation of groundwater and increase their risk of contamination. The present study proposes to evaluate and spacialize the enesitivity of the groundwater to pollution by means of modeling to SIG.

The application of two models, the DRASTIC (L. Aller et al. 1987), model and the SINTACS (Civita,1994) a model makes it possible to compare.

The susceptibilty map obtained for the DRASTIC model proves to be more efficient, it can be considered as a very effective tool.

allbeit perfectible, to estimate the risk of degradatoin of the groundwater quality.

Mots clés: Investissement, contamination, modélisation, SIG, Vulnérabilité, DRASTIC, SINTACS, évaluer, dégradation

Références Bibliographique

- Etude Hydrogéologique de la plaine de Nacer Ben Chohra. Dr Mohammed Chettih
- Etude de recalibrage d'Oued M'zi. Al Rafidayne. 2012
- Thèse De Doctorat. Etude Hydrogéologique. Atoui
- Archive DRE Laghouat 1959
- Tutorial MP3 mapinfo. Djamel Chaouan
- Mouhcine Batch, Djamel El Karkouri. 2017. Etude comparative de deux modèles (DRASTIC et SI) pour l'évaluation de la sensibilité de la nappe phréatique de Mnasra (Maroc Nord-Occidental) à la pollution d'origine agricole
 - Abdalla F. 2012. Mapping of groundwater prospective zones using remote sensing and GIS techniques: A case study from the Central Eastern Desert, Egypt Journal of African Earth Sciences 70 (2012) 8–17.
 - Added A. and Hamza M.H. 1999. Evaluation of the vulnerability in Metline aquifer (Northeast of Tunisia). ESRI user conference. San Diego, USA.
 - Amina Altine Samey and Chen Gan. 2008. A GIS based DRASTIC Model for the assesment of groundwater Vylnerability to pollution in West Mitidja: Blida city, Algeria
 - Usman Cheikh Abdullah.2009. Evaluation of models for assessing groundwater vulnerability to pollution in Negeria
 - Kan Jean Kouamé.2013 Mapping of groundwater vulnerability zones to pollution in various hydrogeological environnements of Cote d'Ivoire by DRASTIC method
 - Albinet M. et Margat J., 1970, Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine, Bulletin BRGM 2ème série. p.13-22.
- Aller L., Bennett T., Lehr J.H., Petty R.J., Hackett G.1987: DRASTIC: a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. EPA, AdA, Oklahoma. 622 p.
- Amharref M. Bernoussi A, 2007. Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines. Actes des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007. Publications AUF.10 p.
- Amharref M., Aassine S., Bernoussi A. et Haddouchi B. 2006. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : Application à la plaine du Gharb (Maroc). Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 20, n° 2, 2007, p. 185-199.

- Caquel F., Hurtevent J., Ruperd Y., Eisenlohr L., Esnault P., et Pierrick E., Méthode de hiérarchisation de la vulnérabilité de la ressource en eau. Note d'information du Sétra –Economie Environnement Conception n° 80. Sétra, Décembre 2007, 83p.
- Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais (BRGM/RP – 54238 - FR Décembre 2005). 113p.
- Castany G. 1998. Hydrogéologie principes et méthodes. 2^e Cycle. Ed. DUNOD. Paris. 236 p.
- Castany, G. 1982. Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie Tunisie). Aquifères du continental intercalaire et du complexe terminal. Bull. BRGM 2 III, Vol. 2, 127-167.
- Cazaux M. 2007. Les eaux souterraines en Gironde. Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions des nappes éocènes dans le secteur du Blayais. Rapport de stage Master II. Départ. des sciences de la terre et de l'Environnement de Montpellier. 54 p.
- Chloé G., 2007. Vulnérabilité et transport de matières dangereuses : une méthode d'aide à la décision issue de l'expertise de la Sécurité Civile. Cybergeog : Revue européenne de géographie, N° 361, 12 janvier 2007. 32 p.
- Chowdhury A., Jha M.K., Chowdary V.M., 2010. Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur District, West Bengal using RS, GIS and MCDM techniques. Environmental Earth Sciences 59 (6), 1209–1222.
- Civita M, De Maio M. SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia and Automatizzazione, vol. 60. Bologna: Pitagora Editrice; 1997.
-
- Civita M., 1994. La carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento : Teoria e pratica. Pitagore Editrice, Bologna, 325 p.
- Cornet A. Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Cours ronéoté destinés aux officiers du cours préparatoire aux Affaires sahariennes. S.E.S, Birmandreis, Alger ,

- Cornet, A. et Gouscov, N. 1952. Les eaux de Crétacé inférieur continental dans le Sahara Algérien (nappe dite Albien). In: "la géologie et les problèmes de l'eau en Algérie". 19^{ème}. Congrès géologique international. T. II, 30p.
- Cote M. 1998. Des oasis malades de trop d'eau. *Sécheresse*, 9, 123-130.
- Dajoz, R. 1971. Précis d'écologie. Ed. DUNOD. Paris. 434 p.
- Daly D., Dassargues A., Drew D., Dunne S., Goldscheider N., Neale S., Popescu CH., Zwahlen F., 2002. Main concepts of the —European Approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping, *Hydrogeology Journal*, 10 (2), p. 340-345.
- Danielopol D., Griebler C., Gunatilaka A., & Notenboom J., 2003. Present state and future prospect for groundwater ecosystems. *Environmental Conservation* 30(2), 0-27.
- Datry T. 2003. Urbanisation et qualité des nappes phréatiques - Réponses des écosystèmes aquatiques souterrains aux pratiques d'infiltration d'eau pluviale. Thèse de Doctorat. Univ. Claude Bernard-Lyon 1. 220 p.
- De Villers J., Squilbin M., Yourassowsky Y. 2005. QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE ET CHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE: CADRE GÉNÉRAL. Les données de l'IBGE : "L'eau à Bruxelles". Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement. 16 p.