

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Abbés Laghrour
- Khenchela-

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département d'Ecologie & Environnement

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Master : Ecologie et Environnement
Spécialité : Protection et Décontamination des Eaux et Sols Pollués

Thème

**Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à
la pollution cas de la nappe d'El Mahmel –Khenchela**

Présenté par :
Khelifi Afaf
Ounissi Oussama

DEVANT LE JURY :

Encadreur : Mr Boulaabiez, M: (MAA, université Khenchela).

Présidente : Dr Halimi.S: (MCB Université Khenchela).

Examineur : Mr daifaallah.T : (MAA, université Khenchela).

Année universitaire : 2016/2017

Dédicaces

A ma mère et mon père, que j'aime beaucoup et que dieu les garde

*Tous les enseignants qui nos ont aidé pendant notre cycle de
Formations (Mr. Boulaabiez.F, madame mezhoud, professeur
b.Houha)*

A mes frères Farouk Mehdi et ma sœur Meriem,

À mon binôme Afaf et toute la famille Khelifi.

A mon promoteur,

A toute la famille ounissi.

*A mes amis intimes : Sana, Oussama, Chemsso, Moufida, iman,
Karima, Awatif, Amina, Raid*

A tous ceux que j'aime.

Ounissi, O

Dédicace

A ma mère et mon père, que j'aime beaucoup et que dieu les garde

A mes frères et sœurs,

A mon promoteur,

A toute la famille.

A tous mes amis

A tous ceux que j'aime.

Khelifi .A

Remerciement

Louange à "DIEU" "DEUS" "ALLAH" "GOD" le tout puissant et le maitre de l'univers, par sa grâce, sa bonté divine et sa miséricorde nous a permis d'avoir la force, le courage, la patience, de réaliser ce travail. Nos remerciements vont à :

*Monsieur **BOULABEIZ. Mahrez** pour avoir accepté de m'encadrer et diriger patiemment de façon exemplaire et pour le temps qu'il m'ait consacré. et mes remerciements également aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.*

*Mes très vifs remerciements vont aussi à **Halimi Samia** doctorat
A à la faculté des de la nature et de la vie,
accepté de participer a ce Jury*

*Je vous voudrais monsieur **Tarek Daifaallah**. Maitre d'assistant A, a la
Faculté des sciences de la nature et de la vie, d'avoir accepté de
Me faire l'honneur de présider ce jury*

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Table de matière

Titre	page
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VI
Liste des abréviations	VII
Introduction générale	01
Chapitre I présentation de la zone	04
I.1 Présentation de la zone d'étude (El Mahmel)	05
I.1.1 Sur le plan administratif:	05
I.1.2 Sur le plan géographique	07
I.1.3. Sur le plan démographique	08
I.2 Milieu physique	09
I.2.1 Les reliefs	09
I.2.2 La lithologie	09
I.2.3 Pédologie	10
I.3 Caractéristiques hydrographiques	11
I.4 Cadre géologique et hydrogéologique de la zone d'étude	12
I.4.1 Cadre géologique de la zone d'étude	12
I.4.2 Stratigraphie	12
I.5 Cadre hydrogéologique	15
I.5.1 Tectonique	16
I-6 Conclusion	17
Chapitre II Hydroclimatologie	18
II.1- Introduction	19
II.2- Etude des caractéristiques climatiques de la région	20
II.2.1-Les précipitations	20
II.2.1.1-Précipitation moyenne mensuelle	20
II.2.1.2 Les précipitations annuelles	21
II.2.2 La température	22
II.2.2.1-Analyse des températures:	23
II.3 Synthèse climatique	24

II.3.1 Diagramme Ombrothermique de Gaussen	24
II.3.2 L'indice d'aridité	25
II.3.3 Climagramme d'Emberger	26
II.3.4 L'humidité	27
II.3.4 L'évaporation	28
II.4 Bilan hydrique	29
II.4.1 Estimation de l'évapotranspiration	30
II.4.1.1 Évapotranspiration réelle (ETR) "C.W.Thornthwaite	30
II.4.1.2 Évapotranspiration potentielle (ETP)	30
II.4.1.3 Ruissellement (R)	31
II.4.2 Interprétation du bilan de C.W.Thornthwaite	32
II.5 .Conclusion	34
Chapitre III revue de littérature	35
III-1- Introduction	36
III.2. Concept de vulnérabilité des eaux souterraine à la pollution	36
III.2 .1 historique	36
III.2.2. Le concept de la vulnérabilité	37
III.3 Types de vulnérabilité	38
III.3.1 La vulnérabilité intrinsèque	38
III.3.2 La vulnérabilité spécifique	39
III.4 Les critères de vulnérabilité	39
III.4.1 Critères de vulnérabilité intrinsèque	39
III.4.2 Critères de vulnérabilité spécifique	40
III.5 Cartographie de vulnérabilité à la pollution	41
III.5.1 Objet de cartographie	41
III.5.2 Techniques d'estimation de la vulnérabilité	41
III.5.2.1 Les méthodes paramétriques	42
III.5.2.2 Approches statistiques et par modélisation physique	44
III.6 Les méthodes d'évaluation de vulnérabilité intrinsèque les plus utilisées dans les milieux poreux et karstique	45
III.6.1 Aquifer vulnerability index (AVI)	45
III.6.2 SINTACS	46
III.6.3 DRASTIC	46
III.6.4 La méthode SI (Susceptibility Index)	47

III.6.5 La Méthode GOD	48
III.6.6 La Méthode GALDIT	48
III.6.7 La méthode GLA	49
III.6.8 La méthode RISK et RISK2	49
III.7 L'apport des systèmes d'information géographique	49
III.7.1 Les définitions et fonction d'un S.I.G	49
III.7.2 Composants d'un SIG	50
III.7.2.1 Le Systeme de saisie numérique	52
III.7.2.2 Le Systeme de traitement d'images	52
III.7.2.3 Le Systeme de gestion et de la base de données	52
III.7.2.4 Le Systeme d'analyse statistique	52
III.7.2.5 Le Systeme d'analyse spatiale	53
III.7.2.6 Le Systeme de représentation cartographique	53
III.7.3 Mode de représentation d'un SIG	54
III.7.3.1 Mode raster	55
III.7.3.2 Le Mode vecteur	55
III.7.3.3 Combinaison des modes vecteur et raster	56
III.8 Acquisition de donnée	57
III.8.1 Introduction	57
III.8.2 Saisie des données spatiales	57
III.8.3 Saisie les attributs	58
III.8.4 Lien entre données spatiales et attributs	58
III.8.5 Fonction d'analyse d'un SIG	60
III.9 Les principaux SIG les plus utilisés dans le domaine de l'hydrogéologie	61
III.9.1 Logiciel MapInfo	61

III.9.2 Logiciel ArcView	62
Chapitre IV : Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines a la contamination	65
IV .Matériel et méthode	66
IV .1.Introduction	66
IV-2 .1.Présentation de la méthode GOD	66
IV.2 .2.Acquisition des données et mode de traitement	67
II.2.3. Préparation des données	68
IV.3. Résultat et discussion	70
IV.3.1.Paramètre de type de nappe G	70
IV.3.2.Paramètre type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques O	71
IV.3.3. Paramètre « profondeur a la nappe » D	72
IV.3.4.Cartographie de la vulnérabilité a la pollution de la nappe d'el mahmel	73
IV.4. Conclusion	76
Conclusion générale	77
Recommandations	78
References bibliographique	79
ANNEXE	87

LISTE DES FIGURES

Figures	Titre	Page
Figure 01	Carte administrative de la wilaya de kenchela, représente la commune d'el mahmel.	06
Figure 02	Carte de situation géographique et administrative de la zone d'étude	07
Figure 03	carte géologique de la plain D'el mahmel	13
Figure 04	Coupe lithologique de quelque forage implanté dans la plaine d'el mahmel	16
Figure 05	Histogramme de précipitations moyennes mensuelles d'el hamma (2005-2015).	21
Figure 06	Précipitation moyenne annuelle d'el hamma (2005-2015).	22
Figure 07	Histogramme de températures moyennes mensuelles.	23
Figure 08	La répartition des températures moyennes (max, min, et moye) de la station d'el hamma	24
Figure 09	Diagramme Ombrothermique de Gaussen de la zone d'étude	25
Figure 10	Climagramme d'Emberger d'el hamma (2005-2015)	27
Figure 11	Histogramme Humidité relative mensuelle moyenne d'el hamma (2005-2015)	28
Figure 12	Diagramme des moyennes mensuelles de l'évaporation de la période (2005-2015).	29
Figure 13	Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station el hamma (2005-2015).	33
Figure 14	Diagramme de la variation de la RFU, du déficit et de l'excédent à la station d'el hamma	33
Figure 15	Schéma d'un SIG	50
Figure 16	les composantes d'un système d'information géographique	51
Figure 17	Données manipulées par un SIG	52
Figure 18	Principales fonctions d'un SIG	54
Figure 19	La représentation en mode vecteur et en mode raster,	56
Figure 20	Acquisition des données pour un SIG	59
Figure 21	Structure d'une couche d'information	59
Figure 22	système empirique GOD : pour estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.	67
Figure 23	Outils de conversion des shapfile en raster	69
Figure 24	Outils de calcul de l'indice GOD	69
Figure 25	méthode utilisé pour la réalisation de la carte de vulnérabilité	70
Figure 26	carte type de nappe (critère G)	71
Figure 27	carte impacte de la zone vadose critère « O ».	72
Figure 28	carte profondeur de la nappe critère	73
Figure 29	carte de l'indice de vulnérabilité GOD	74
Figure 30	Répartition d'indice de vulnérabilité GOD du secteur d'étude.	75

LISTE DES TABLEAUX

tableaux	titre	page
Tableau01	La répartition de la population d'el mahmel	08
Tableau02	Précipitation moyenne mensuelle d'al hamma (2005-2015)	20
Tableau03	Précipitation moyenne annule d'el hamma (2005-2015)	21
Tableau04	Température moyenne mensuelle d'el hamma (2005-2015)	22
Tableau05	Température enregistrée à la station d'el hamma (2005-2015)	23
Tableau06	Pluviothermique d'el hamma	25
Tableau07	L'Humidité d'el hamma	28
Tableau08	Les moyennes mensuelles de l'évaporation de la période (2005-2015)	29
Tableau09	Bilan de C.W Thornthwaite (mm) de la station d'el hamma (2005 /2015)	31
Tableau10	Critère intrinsèque et spécifique de la vulnérabilité des eaux souterraines et leurs paramètres	40
Tableau11	Avantages, Inconvénients et type d'utilisateurs cibles pour les trois types principaux de méthodes d'estimation de la vulnérabilité	43
Tableau12	Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode GOD	74

Liste des abréviations

RFU : Réserve facilement utilisable

ETP : Evapotranspiration potentiel (mm),

ETR : Evapotranspiration réelle (mm),

Pr : Précipitation (mm),

T : Température (C°),

N : Nord

E : Est

C° : Degré Celsius

m³ : mètre cube

DHWK : Direction de l'hydraulique wilaya de kenchela

DPAT : la direction de la planification et l'aménagement de territoire de kenchela

RGPH : Recensement Générale de la population et de L'habitat

SMEH : Station Météorologique d'el-hamma

DENV : Direction de l'environnement

GOD: Groundwater occurrence, Overall aquifer class and Depth of water table.

H : Humidité

S.I.G : Système d'Information Géographique.

T max : Température maximale.

T min : Température minimale.

T moy : Température moyenne.

ZN : Zone saturée

ZNS : Zone non saturé

Introduction générale

L'Algérie se situe, à l'instar des 17 pays Africains touchés par le stress hydrique, dans la catégorie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³ par habitant et par an. Cette situation pourrait être amplifiée par les effets du changement climatique qui sont susceptibles d'être plus prononcés dans le bassin méditerranéen que dans d'autres régions du monde (Ipemed 2009).

La problématique de l'eau est indissociable du développement durable dans la mesure où l'eau doit permettre de répondre aux besoins des générations actuelles sans hypothéquer, la capacité des générations futures à satisfaire les leurs.

La principale source de satisfaction de la demande en eau est l'eau souterraine, du fait de son exploitation relativement facile. La croissance démographique et la modernisation de l'agriculture entraînent un grand problème de détérioration de la qualité de cette source souterraine, déjà en quantité limitée. Actuellement, les cours d'eau reçoivent en permanence les rejets urbains et industriels chargés d'éléments chimiques et organiques, souvent toxiques. Ces substances polluantes peuvent affecter de façon dangereuse la santé publique, si elle continue à être déversée dans la nature sans traitement préalable.

Sujet de recherche prolifique, actuel et nécessaire, l'évaluation du potentiel de contamination de l'eau souterraine en milieu urbaine et agricole mobilise de nombreux hydrogéologues et experts en environnement, qui ont ainsi proposé différentes approches méthodologiques : par exemple la quantification précise de l'exfiltration des réseaux d'égouts (Rutsch et al. (2008) ou Ellis et al. (2003), Par exemple) ou divers outils de gestion et de modélisation des ressources en eau souterraine urbaine (Wolf et al. (2005), Epting et al. (2008), par exemple). A côté de ces approches généralistes existent également divers types d'études locales : études d'impact (Généralement lors de la construction d'ouvrages), études de contaminants spécifiques (Hydrocarbures, métaux lourds, etc.) et leurs activités associées (problématique des sites Pollués) – méthodes fréquemment utilisées hors des milieux académiques.

Développées à l'origine pour les milieux naturels, les méthodes d'estimation et de cartographie de la vulnérabilité aux contaminations sont également un outil important et largement utilisé pour la protection des eaux souterraines - et les décisions pour l'aménagement du territoire qui en résultent. Ces méthodes identifient et combinent une série de paramètres géomorphologiques, géologiques et hydrogéologiques, permettant au final d'obtenir un indice de vulnérabilité de l'eau souterraine, représentatif de la capacité du milieu

naturel à retarder, disperser, diluer et/ou dégrader un contaminant potentiel en provenance de la surface ou de la subsurface (Gogu et al. (2000), Vrba et al. (1994)).

Problématique et objectifs :

La nappe d'el mahmel (sud de kenchela) actuellement elle se trouve menacé par de nombreux foyers de pollution en particuliers les rejets des eaux domestiques liquides et solides qui se déversées directement dans les eaux superficielles (cours d'eaux et sebkha) sans traitement préalable et en dehors de toute mesure de protection de l'environnement. Ces rejets s'infiltrent directement dans la nappe d'eaux souterraines sous l'effet de l'infiltration des eaux de précipitations. Cette situation est aggravée par la surexploitation des eaux souterraine surtout en période sèche créant un gradient hydraulique fort qui contribue à une large dispersion des polluants et la situation devient difficilement contrôlable.

La protection de la nappe d'el mahmel contre la pollution, doit faire l'objet de toute l'attention voulue. C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente étude, dont l'objectif est d'élaborer un outil permettant de caractériser de façon simple mais précise, les zones où la nappe est particulièrement vulnérable, afin de circonscrire les zones à haut risque de contamination, pour pouvoir agir de façon préventive. En effet la protection de cette ressource requiert la bonne connaissance de la géologie, hydrogéologie et hydroclimatologie de la nappe.

Parmi les diverses méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraine à la pollution, la méthode GOD a été choisis en raison de la disponibilité limité des données dans la zone d'étude.

Les détails des résultats sont présentés dans cette mémoire à travers quatre chapitres :

- **Chapitre I** : Description de la zone d'étude (cadre géographique et géologique). la situation géographique de la zone d'étude, les caractéristiques hydrologiques sont incluses dans le chapitre.
- **Chapitre II** : consacré à l'analyse des paramètres hydroclimatiques de la zone d'étude pour aboutir à l'établissement du bilan hydrique.
- **Chapitre III** : Expose un examen complet de la littérature avec les antécédents théoriques des concepts principaux qui apparaissent dans cette mémoire.

- **Chapitre IV** : L'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de la nappe d'El Mahmel par la méthode GOD en utilisant un Système d'information géographique SIG.

Enfin des perspectives seront évoquées en conclusion en termes d'utilisation des résultats (carte de vulnérabilité) comme un outil d'aide à la décision et d'analyse spatiale pour tous projets futurs dans la région

Chapitre I

Présentation de la zone d'étude

I.1 Présentation de la zone d'étude (El Mahmel) :

I.1.1 Sur le plan administratif:

Sur le plan administratif la commune a des nouvelles genèses, car elle n'a vu le jour qu'en 1984 la date à laquelle est fut créée.

La commune d'e-mahmel occupe une superficie totale de 37100 ha avec 3.8 % par rapport à la wilaya et 56 % par rapport a la daïra.

Elle est limitée :

- Au nord** : par la commune (Ain Touila).
- Au nord-ouest** : par la commune de (N' Sigha)
- Aux ouest et sud-ouest** : par la commune (de Babare)
- A l'est** : par la commune (d'Ouled Rechache)
- Au sud** : de la commune la wilaya de (Tebessa)

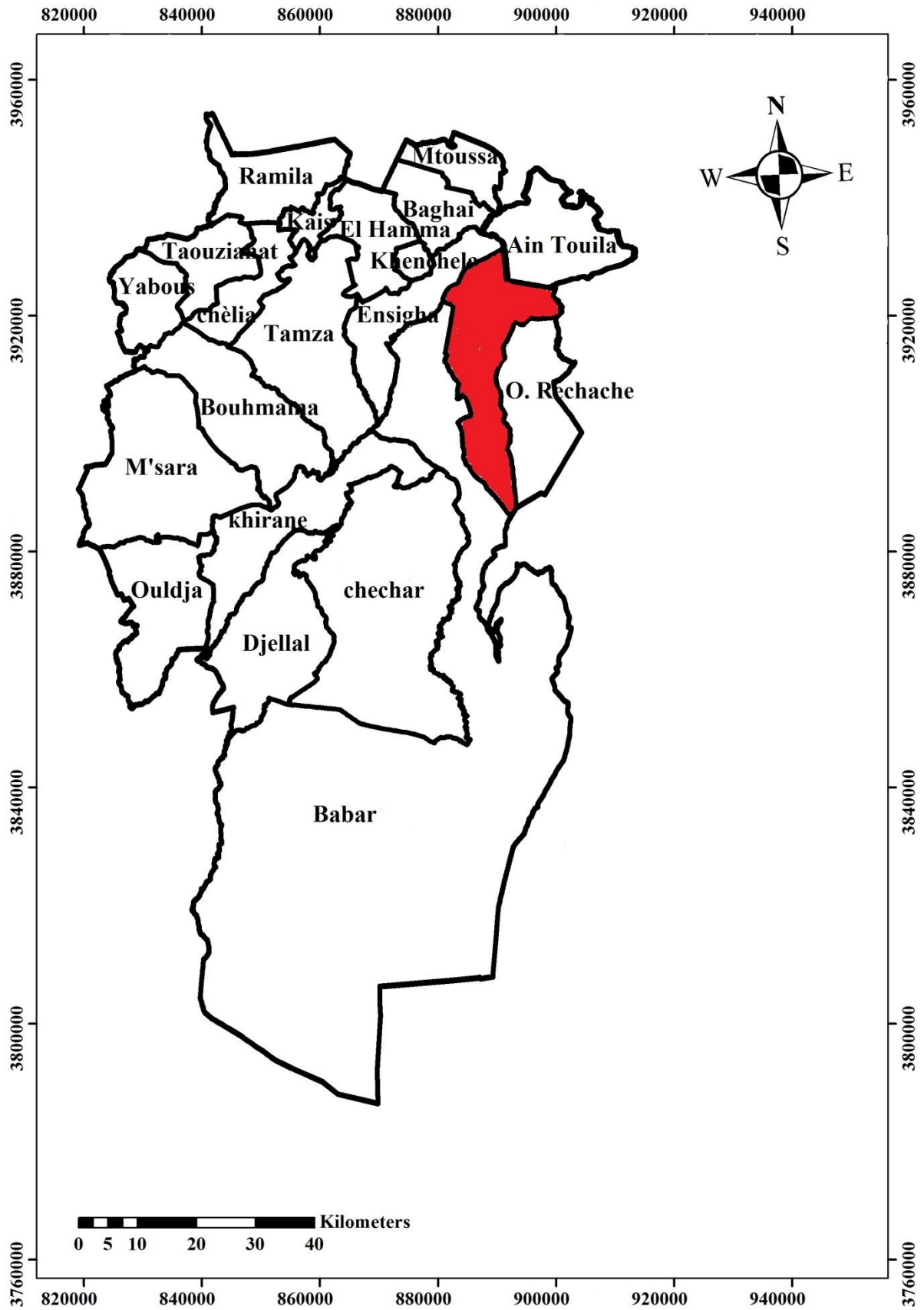


Fig. (01) : Carte administrative de la wilaya de khenchela, représente la commune d'el mahmel

I.1.2 Sur le plan géographique :

La commune d'el mahmel est l'une des 21 communes que compte la wilaya de khenchela.

- Superficie : 37 7,80Km² soit 37 780 ha
- Population : 38706hab.
- Densité : 102 hab. / Km²
- Le Chef-lieu TAZOUGERT. (DENV 2014)

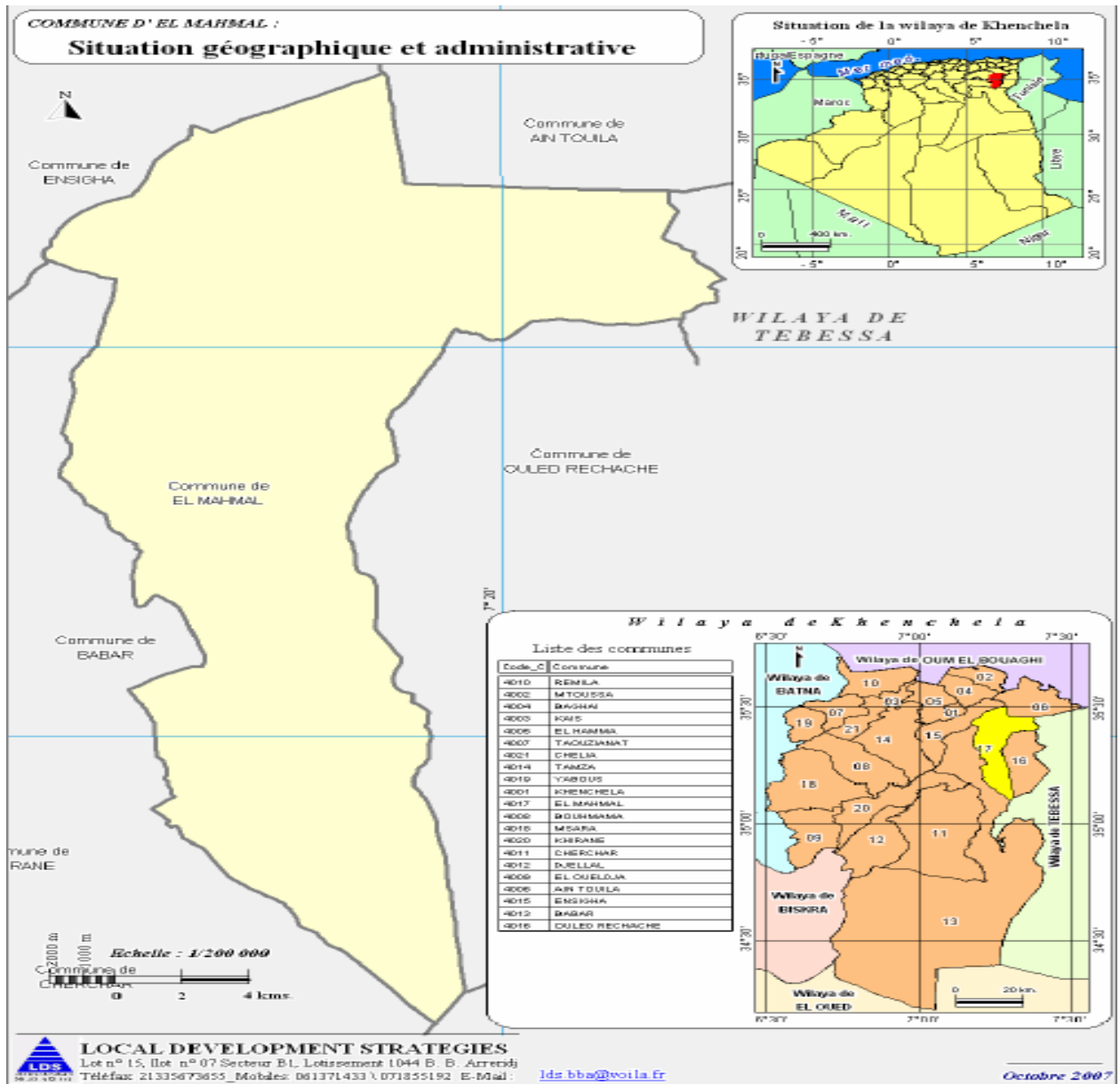


Fig. (2) : Carte de découpage administrative de la zone d'étude

Source : Direction de l'hydraulique

I.1.3. Sur le plan démographique :

La population de la commune d'el mahmel est passée de 41 683 habitants au recensement général de la population et de l'habitat (**RGPH 2010**) à 42725 habitants en 2012, avec un taux d'accroissement de 2.50%.

Celle du chef-lieu est passée de 32641 habitants au (**RGPH 2011**) à 33457 habitants en 2012 avec un taux d'accroissement de 2.5%.

Les habitants représentant 78,30 % de la population totale de la commune. La population hors chef-lieu est de l'ordre de 9268 habitants soit de 21,70 %, cette frange est répartie en agglomérations secondaires et zone éparses. (**RGPH, 2012**).

Les données concernant la population du secteur d'sebkha relevé presque de l'impossible, cela nous a obligées à utiliser les données propres à toute la commune.

En effet, cette dernière à notre sens reflète les mêmes caractéristiques. La structure de la population selon l'âge et le sexe ne représente aucune différence de taille par rapport à celle de l'ensemble du pays à savoir:

- Une extrême jeunesse.
- Un équilibre entre les sexes

Tableau 01 : La répartition de la population d'el mahmel

POPULATION	EXISTANT 2011	EXISTANT 2012
Population totale	41 683	42 725
Population urbaine	32 641	33 457
population rurale	9 042	9 268
Enfants de moins de 06 ans	5 055	5 181
Enfants de 6-15 ans	8 686	8 903
Population de 15-29ans	13 568	13 907
Population de 16-59 ans	26 772	27 441
Population 60 ans et plus	2 976	3 050

Source : APC d'el mahmel

La dispersion de l'habitat rural est des plus remarquables. Elle est organisée essentiellement selon un dispositif physique que nous avons pu observer lors de nos investigations sur le terrain.

- habitations en guirlandes continues au contact des massifs « Djebels » (APC 2010)
- habitations auréolaires en semis réguliers au contact des glacis et des zones inondables, et entourant les sebkhas.
- dispersion entre haut et bas glacis.

I.2 Milieu physique :

I.2.1 Les reliefs

Le relief est la résultante de la combinaison entre deux facteurs : l'altitude et la pente. Le relief de la wilaya de khenchela est composé de quatre (04) grands ensembles géographiques (DPA, 2009).

➤ **Les montagnes**

On les rencontre essentiellement dans la zone ouest de la wilaya (les aurès) ; dans la zone centrale (les monts des nememchas) et au nord - est (Ain -touila)

➤ **Les plateaux**

Ils sont situés au nord-est (plateau d'Ouled Rechache) et s'étendent sur les communes de l'mahmel et d'ouled rechache.

➤ **Les plaines**

Situées au nord et nord-ouest de la wilaya, elles comprennent remila, bouhmama et M'toussa. Il est à noter que ces deux derniers ensembles sont parfois appelés les hautes plaines.

➤ **Les parcours steppiques et les dépressions**

Ils sont situés dans la partie méridionale de la wilaya. Ils se caractérisent par des terres sablonneuses et par la présence de chotts .ces derniers constituent ainsi le point de convergence exutoire des oueds drainant le sud de la wilaya.

I.2.2 La lithologie

Sur le plan lithologique, la wilaya de khenchela présente une multitude de faciès, dont les plus représentés sont énumérés ci-après. (DPAT 2012)

- ❖ **Les alluvions et sables :** Ces faciès, moyennement stables, sont rencontrés principalement sur les hautes plaines du nord, sur les terrasses alluviales d'el meroudj et oued guergoub, ainsi qu'au niveau du glacis situé sur les piémonts des aurès-néménchas et les basses plaines du sud.

Ils correspondent à des terres à fort potentiel agricoles, mais dont l'intensification reste tributaire de la ressource en eau pour l'irrigation.
- ❖ **Les marnes :** Formations très sensibles à l'érosion et souvent sujettes aux glissements de terrain, les marnes sont présentes tout le long de la vallée de l'oued el arabe et sur la partie est de la wilaya, correspondant aux monts des némémchas, Au niveau de ces derniers, qui sont dépourvus de végétation forestière, ces formations sont soumises à une érosion intense et se présentent souvent sous forme de « badlands ».
- ❖ **Les calcaires et dolomies dures :** Formations à bonne résistance à l'érosion, les calcaires et dolomies dures sont présents sur la presque totalité du massif des aurès et sur les reliefs du nord-est de la wilaya. En général, ces formations de montagne sont relativement bien arrosées et couvertes d'une végétation forestière assez dense qui les protège de l'érosion.
- ❖ **Les calcaires friables :** Peu répandus dans la wilaya, ces faciès sensibles à l'érosion sont localisés principalement sur la bande médiane séparant le nord du sud de la wilaya, et localement au nord, dans la zone des garaet et tarf. Ces roches donnent naissance à des sols calcaires, de profondeur variable suivant leur position topographique, et riche en humus quand ils sont couverts de végétation forestière.
- ❖ **Le trias (gypse) :** Formation saline, le trias est essentiellement répandu sur les basses plaines sahariennes au sud de la wilaya, Par ailleurs on le trouve localement au nord de kenchela, à l'est de babar et au sud d'ouled rechache. La végétation au niveau de ces espaces est de type halophile.

I.2.3 Pédologie

- ✓ **Les sols calcaires humifères :** Ils sont rencontrés sur les monts et les piémonts de l'aurès, à une altitude comprise entre 1 000 et 1500 mètres.
- ✓ **Les sols insaturés humifères :** Ces sols sont rencontrés sur les reliefs les plus élevés (plus de 1500 mètres d'altitude) de l'aurès. Ils sont occupés par des forêts.

- ✓ **Les sols calciques** : Ces sols sont rencontrés sur les bas piémonts, et sur les hautes plaines longeant la route qui mène de kenchela à fais en passant par kaïs et remila. Ils s'étendent à l'Est jusqu'à ain touila et au sud jusqu'à babar en partant de kenchela.
- ✓ **Les sols éoliens d'ablation** : Ces sols sont rencontrés au sud de la wilaya, sur les piémonts des monts nememchas, dont l'altitude est située entre 200 et 500 mètres.
- ✓ **Les sols éoliens d'accumulation** : Ils sont localisés uniquement dans la zone sud de la wilaya, près du chott melghir (sols sablonneux).
- ✓ **Les sols alluviaux basiques** : Ces sols sont localisés sur des zones de changement de pente, c'est-à-dire les zones où la pente devient plus douce. On les rencontre principalement dans les plaines entourant les dépressions (dépression de garât et tarf, cuvette du bas sahara, et la dépression de tazougart), mais aussi au niveau des vallées encaissées de babar, de bouhmama et de la plaine de guentis.
- ✓ **Les sols salins ou solontchaks** : Ces sols caractérisant les dépressions sont rencontrés au niveau des zones d'accumulation. Ils sont le résultat d'une hydrologie à l'écoulement endoréique ou de la présence de roches triasique (gypse : roche saline).
- ✓ **Les roches mères** : Ces roches, résultat d'une érosion intense due a une conjugaison de facteurs négatifs (relief montagneux, intensité des pluies, substratum tendre et à une absence de couvert végétal pérenne) affleure notamment les monts des nememchas.

I.3 Caractéristiques hydrographiques

La région d'étude comme la plupart des zones arides et semi-arides est caractérisée par un ruissellement de type endoréique. Les cours d'eau qui draient la zone de Chott esbikha, dont les écoulements sont intermittents prennent leur source principalement à partir de djebel tadinaret et de djebel louinal de ouled rechache.

Les principaux oueds sont :

- **Oued zoui** : celui –ci ont l'embouchure est à el mahmel se dirige au nord de la commune de Ouled rechache et se jette dans les lieux d'esbikha.
- **Oued guergoube** : dont l'embouchure se trouve Aguentils se dirige vers le sud et se disperse au lieu dit El Meita et sert à l'irrigation des épandages appelée N'fidha (terres alluvionnaires utilisées à la céréaliculture d'orge verte dessinée à l'alimentation du cheptel durant la période transhumance).

• **Oued melloul** : rente son embouchure à la commune d'el mahmel et jette à oued gergoube.

I.4 Cadre géologique et hydrogéologique de la zone d'étude :

La zone d'étude se présente comme une vaste cuvette comblée de dépôts plio-Quaternaire d'une superficie de 400 Km² environ, Elle se situe au sud de kenchela, elle est limitée au nord et au nord-ouest par les djebels, chataia et son prolongement djebel tafrent, au nord ouest par djebel aidel et son prolongement channtgouma, à l'ouest djebel djahfa, au sud et sud-est est limité par koudiat sguiguine et tadelist, à l'est tadinart .

I.4.1 Cadre géologique de la zone d'étude :

I.4.2 Stratigraphie :

La zone d'étude, fait apparaitre des terrains du Quaternaire et du Crétacé (ENAGEO 1988). (Fig03)

- **Quaternaire** : il est constitué par des dépôts sableux, limoneux et des graviers avec de gros galets.
- **Maestrichtien** : il correspond à des calcaires à des nodules de silex (95 mètres) et une alternance de marnes et de calcaires (40 mètres).
- **Campanien** : il débute par 60 mètres de calcaires crayeux, surmonté par une série de 150 mètres de marnes.
- **Santonien** : constitué par une série marneuse de 100 mètres d'épaisseur et 130 mètres d'une formation à caractère récifal et béchique.
- **Coniacien** : constitué par une alternance de marnes et de calcaires d'une épaisseur de 150 mètres.
- **Turonien** : le turonien supérieur est constitué par 150 mètres d'une alternance de marnes et de calcaires noduleux .le turonien basal correspondent à une série de 200 mètres de marnes à intercalations de marno-calcaires.
- **Cénomaniien** : il correspond à une puissante série marneuse dépassant 700 mètres surmontés par une barre calcaire de l'ordre de 30 mètres formant une corniche. On ne dispose comme document géologique de base, que de la carte générale de l'algérie au 1 /50 000.

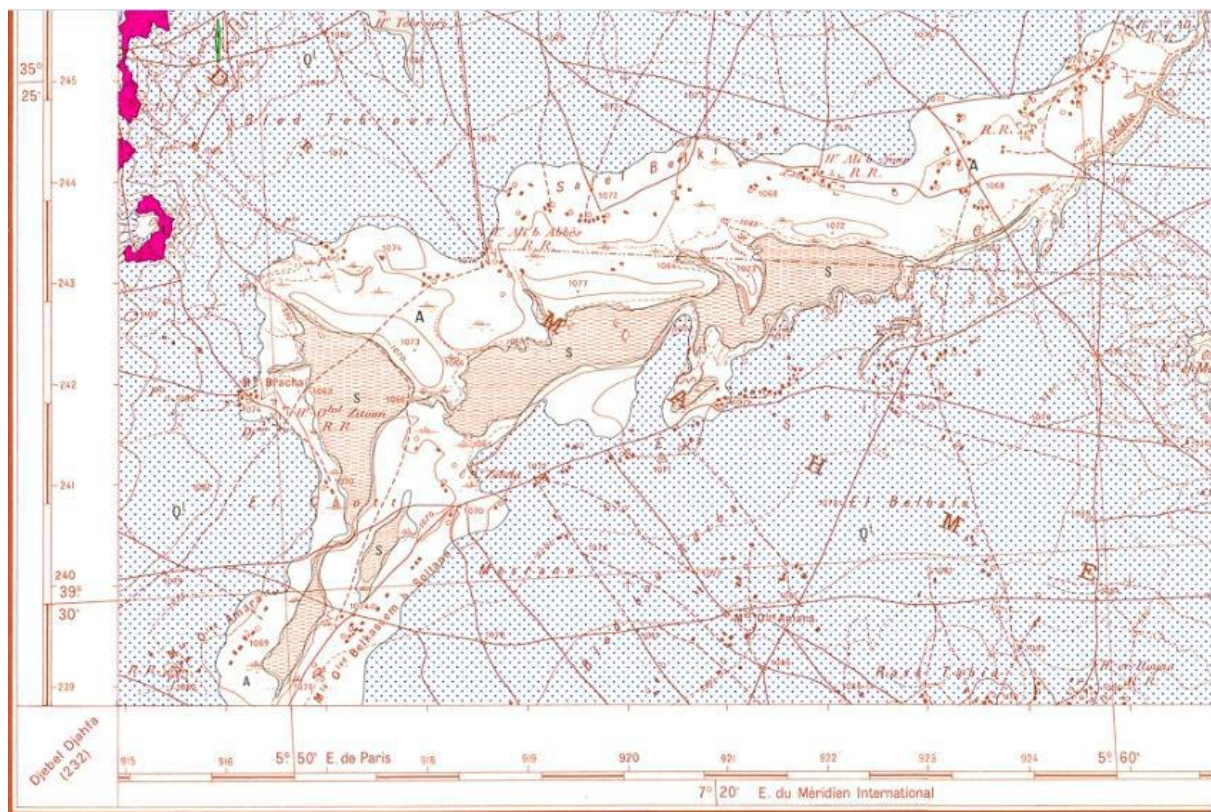


Fig. (3) : carte géologique de la plain D'el mahmel (extrais de la carte géologique de feuille N°204 sonatrach)

Quaternaire :

Les dépôts quaternaires sont d'origine continentale et occupent d'importantes surfaces. Ils se sont développés essentiellement dans les parties bordant les massifs montagneux. On y rencontre des éboulis à blocs, éboulements et glaciers polygéniques. Dans les zones basses telles les vallées et les sebkhas, terrasses et sols salés hydromorphes. On y trouve une croûte calcaire villafranchienne, perché, entaillé et probablement karstifié ainsi que des tufs carbonatés, liés à quelques sources hydrothermales.

Donc le quaternaire recouvre la majeure partie de la plaine d'el mahmel. Le bassin étant fermé, il a recueilli tous les produits de l'érosion des reliefs environnants. Sédimentation est en majeure partie sableuse, limoneuse ; avec une proportion importante de gypse. On y trouve également des intercalations de: graviers, avec de gros galets.

A- crétacé :

Il correspond aux formations carbonatées situées surtout au nord de la plaine (Djebel Tafrent) en trouve :

- **Maestrichtien** : il correspond à des calcaires à des nodules de silex et une alternance de marnes et de calcaires.
- **Campanien** : correspond essentiellement à des marnes et des calcaires crayeux.
- **Santonien** : constitué par une série marneuse, d'une formation à caractère récifal et béchique
- **Coniacien** : correspond essentiellement à des marnes grises et marneuses calcaires.
- **Turonien** : en a le turonien supérieur constitué de marnes et de calcaires noduleux .le turonien basal correspond à de marnes à intercalations de marne calcaire

B- Trias diapirique :

Le Trias correspond aux terrains les plus anciens des zones externes de la chaîne Alpine. Il est essentiellement évaporitique et se présente sous forme de structure diapirique et en lames injectées le long des accidents tectoniques. Les affleurements d'extension et de constitution variable, perçant leur couverture mésozoïque et cénozoïque de façon anormale, s'observent en plusieurs dizaines de points dans les Aurès, ou sur ses bordures. Le trias dans la zone d'étude ce trouve a l'est de djebel chetaia ou on observe un pointement triasique en forme décroissante allant d'ain karima au djebel tarf sur une longueur de 12 km et une largeur de 02 km. Il est en contact anormal avec le Turonien et le Sénonien supérieur.

Le diapir de tazouguert est formé par des argiles varicolores et gypses chaotiques à glaçon avec passage des marnes calcaires et cargneules. (J.M. Villa 1973)

I.5 Cadre hydrogéologique :

L'hydrogéologie est définie par deux grands aquifères, l'un superficiel constitué par des dépôts de sables, argiles et gravier d'épaisseur moyenne 50 mètres. Ces formations d'affleurements et d'extension réduite ne peuvent constituer à elles seules, un aquifère important dans la région, néanmoins elles pourraient répondre aux besoins domestiques et agricoles à petite échelle. Les débits extraits n'excédant pas 10 l/s.

L'aquifère profond est constitué par les formations de calcaires avec des intercalations de marnes d'une épaisseur pouvant atteindre 135 mètres.

Les calcaires du Turonien, constitué par une alternance de calcaires et de marnes (150 mètres) peuvent-être aussi un aquifère potentiel dans la région, cependant son importance hydrogéologique ne peut être connue que par un forage de reconnaissance.

❖ Dépôts Quaternaires :

L'aquifère Quaternaires est constitué par des dépôts de sables, argiles et gravier d'épaisseur moyenne 50 mètres. Ces formations d'affleurements et d'extension réduite ne peuvent constituer à elles seules, un aquifère important dans la région, néanmoins elles pourraient répondre aux besoins domestiques et agricoles à petite échelle. La surface du niveau statique de cette nappe est en communication directe avec le réseau hydrographique superficiel.

Les débits extraits n'excédant pas 10 l/s et les rabattements peuvent atteindre 22 mètres pour un niveau statique très proche de la surface du sol (inférieur à 10 mètres).

❖ Dépôts Maestrichtien

L'aquifère Maestrichtien est constitué par un ensemble de calcaires avec des intercalations de marnes d'une épaisseur pouvant atteindre 135 mètres.

Cet aquifère pourrait constituer localement un bon réservoir pour les eaux souterraines, toutefois son importance hydrogéologique dépend étroitement du degré de fissuration des calcaires qui le constituent. Les potentialités de la nappe du Maestrichtien sont

relativement importantes comme nous le montre le forage TZ7 qui donne un débit de 28 l/s pour un rabattement de 39 mètres.

❖ **Dépôts Turonien :**

Le Turonien supérieur constitué par une alternance de calcaires et de marnes (150 mètres) peut-être lui aussi un aquifère potentiel dans la région, cependant son importance hydrogéologique ne peut être connue que par un forage de reconnaissance.

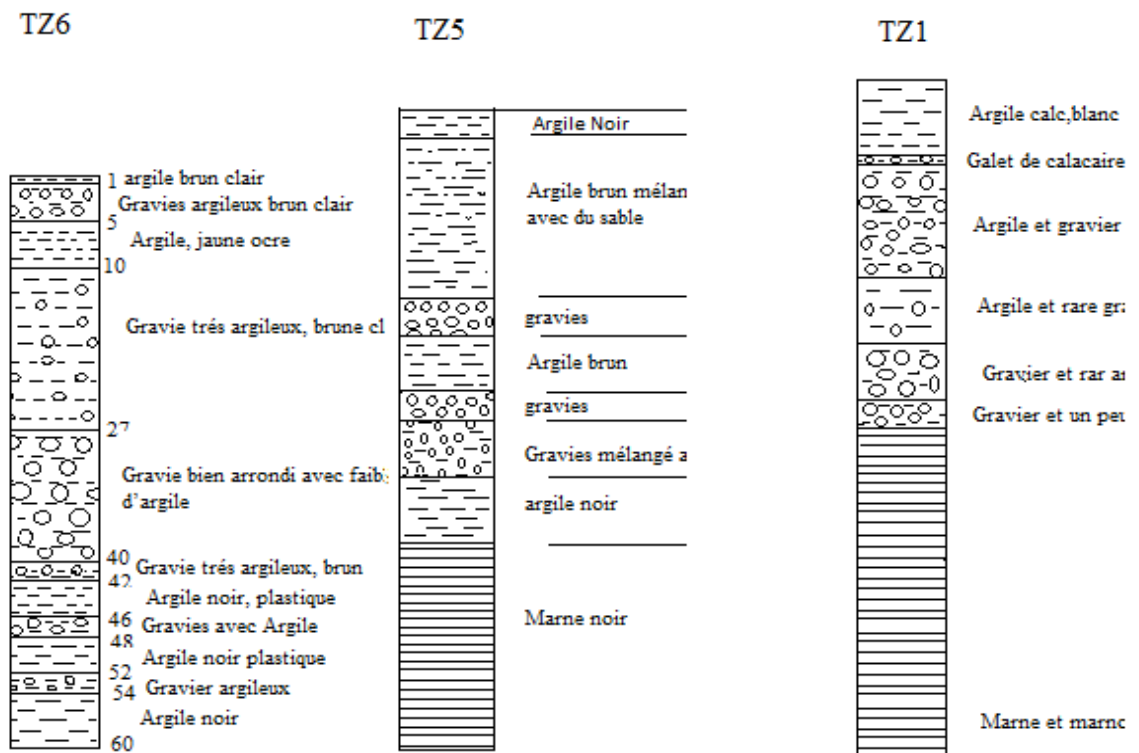


Fig. (04) : Coupe lithologique de quelque forage implanté dans la plaine d'el mahmel

I.5.1 Tectonique :

L'examen des coupes géo-électriques (ENGE01988) révèle l'existence de discontinuités électriques plus ou moins franches qu'on peut associer à des failles ou à de forts pendages. Ces discontinuités sont visibles surtout dans la partie ouest de l'étude, ceci du fait de la présence d'un terrain résistant qui pourrait correspondre à la barre calcaire du Maestrichtien.

Généralement ces failles sont de direction nord-sud à nord-est sud ouest, leur rejet peut dépasser parfois 250 mètres.

I-6 Conclusion :

La zone d'étude se présente comme un bassin sédimentaire dont la série stratigraphique est constituée par une alternance des marnes cénomaniennes et des marnes et calcaires du Turonien, sur laquelle dépose une bande calcaire qui représente le Maëstrichtien pour trouver au sommet des dépôts sableux, limoneux et des graviers avec de gros galets qui représente le quaternaire. La zone d'étude est définie par deux grands aquifères, l'un superficiel constitué par des dépôts de sables, argiles et gravier d'épaisseur moyenne 50 mètres et l'autre profond constitué par les formations de calcaires avec des intercalations de marnes d'une épaisseur pouvant atteindre 135 mètres.

Chapitre II

Hydroclimatologie

II.1- Introduction :

L'hydroclimatologie est une étape très importante pour une étude hydrogéologique. Elle permet de quantifier la part d'eau ruisselé et la part d'eau infiltrée utile à l'alimentation de l'aquifère.

Toute étude hydroclimatologique dépend de deux paramètres essentiels :

- Les précipitations qui nous renseignent sur les quantités d'eau utile au renouvellement de réserves et sur le régime pluviométrique.
- Les températures sont nécessaires pour estimer l'évaporation et l'évapotranspiration qui influent sur la part d'eau contenue dans le sol et par conséquent utilisable.

Ce dernier point est important pour les réserves souterraines en eau que pour la végétation et les cultures agricoles.

L'Algérie est caractérisée par une variabilité climatique liée aux irrégularités topographiques et aux influences opposées de la Méditerranée et du Sahara. (Younssi .H.E, 2009). la zone d'étude se situe dans étage bioclimatique semi-aride.

L'équipement climatologique du bassin est cependant loin d'être satisfaisant. Le manque de documentation est flagrant, les longues séries d'observation sont rares. Toutes fois nous allons tenter de faire ressortir les caractéristiques générales du climat, ses nuances spatiales et ses irrégularités temporelles à partir de la documentation disponible.

Pour étudier le climat de la zone d'étude, nous avons exploité les données climatiques qui ont été recueillies au niveau de la station météorologique d'el-hamma (Khenchela), dont les coordonnées :

Longitude	(7° 15' 33.88" et 7° 22' 47.28") Est.
Latitudes	(35° 20' 26.63" et 35° 24' 24.97") Nord.
Altitude	890 m

Les données s'étalent sur une période de 10 ans de puis 2005 jusqu'à 2015.

II.2- Etude des caractéristiques climatiques de la région

II.2.1-Les précipitations :

Généralement, on englobe sous le terme « précipitations » toutes les eaux qui tombent à la surface de la terre sous forme liquide ou solide (pluies, neige, grêle ...).

Les précipitations sont évidemment le facteur essentiel caractérisant le climat d'une région. Elles jouent un rôle prépondérant dans le comportement hydraulique des cours d'eaux et dans l'alimentation éventuelle des nappes souterraines et sont ainsi l'élément le plus important dans l'établissement du bilan hydrique parce qu'elles reflètent la circulation des eaux superficielles et souterraines.

Les précipitations connaissent de grandes fluctuations d'un mois à un autre et d'une année à une autre. Les caractéristiques pluviométriques de la zone d'étude sont tirées d'une chronique de 10 ans (2005 – 2015) d'observation à la station d'el -hamma.

II.2.1.1-Précipitation moyenne mensuelle

Le calcul de la moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations du mois considéré sur un grand nombre d'années ou dite "précipitation moyenne mensuelle", donne un aperçu sur les variations mensuelles des précipitations. En effet, les moyennes mensuelles des précipitations mesurées à la station d'el hamma durant la période d'observation allant de 2005 à 2015 sont représentées dans le tableau (N° 02)

Tableau. 02 : Précipitation moyenne mensuelle d'al hamma (2005-2015)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTALE (mm)
P (mm)	44,31	40,02	55,59	48,69	63,72	26,58	20,92	31,89	67,27	38,1	26,39	38,1	501,583

Source : Station météorologique d'el -hamma (Khenchela).

Le mois de septembre, est le mois le plus pluvieux avec une moyenne de (67,27mm) et le mois juillet est le mois le plus sec avec (20,92mm).

Pour évaluer la variation des précipitations moyennes mensuelles, nous avons établi l'histogramme (Fig.05), traduisant les données précédentes:

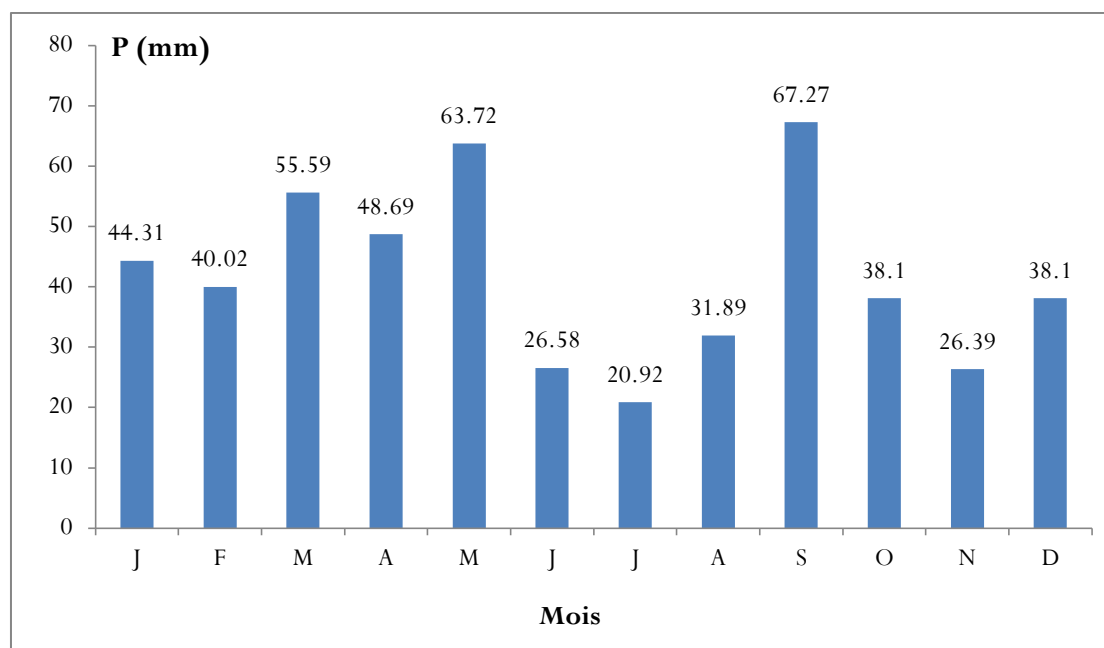


Fig. (05): Histogramme de précipitations moyennes mensuelles d'el hamma (2005-2015).

II.2.1.2 Les précipitations annuelles :

En se basant sur les données des précipitations mensuelles de la station d'el hamma durant la période d'observation allant de 2005 à 2015, nous avons calculé les précipitations annuelles correspondant.

Tableau 03 : Précipitation moyenne annule d'el hamma (2005-2015)

Année	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
P (mm)	30,71	48,63	42,35	39,55	51,85	44,09	52,19	28,64	42,92	35,07	40,07

- L'année la plus pluvieuse étant 2011 avec une moyenne annuelle de (52.19mm).
- L'année 2012 étant la plus sèche avec une moyenne annuelle de (28.64mm).

Pour évaluer la variation des précipitations annuelles, nous avons établi l'histogramme (Fig. 06) traduisant les données précédentes:

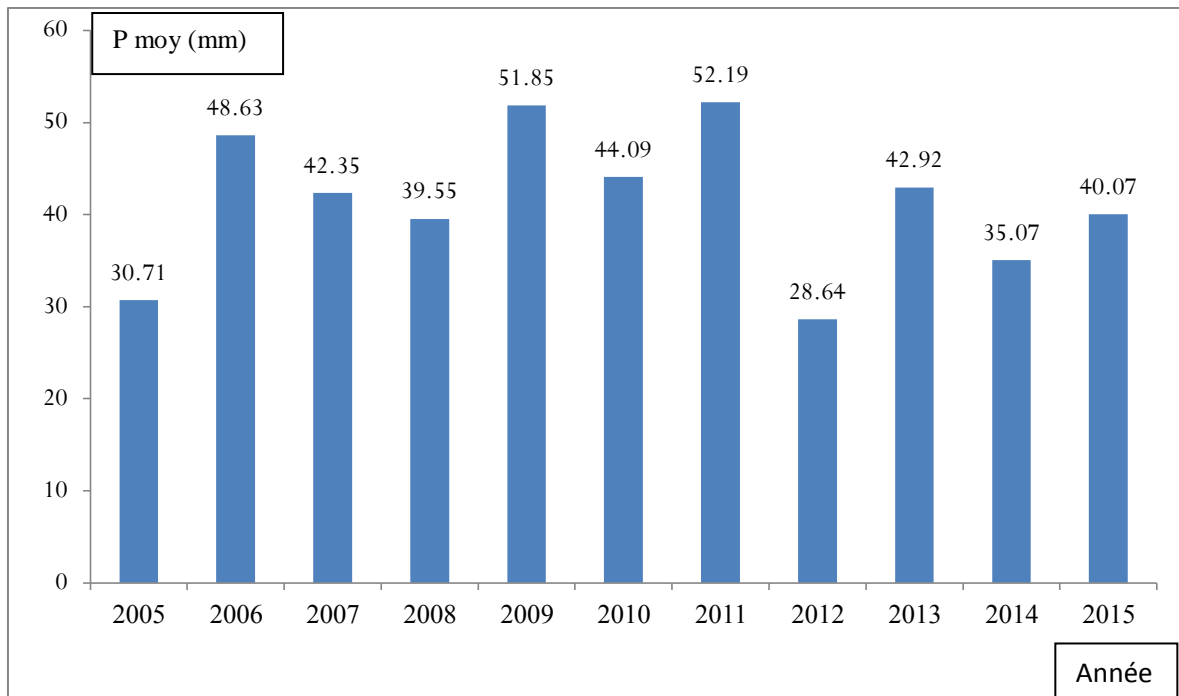


Fig. (06) : Précipitation moyenne annuelle d’el hamma (2005-2015).

II.2.2 La température :

L’inverse des précipitations qui constituent l’apport en eau d’un système hydrologique d’où son rôle important dans l’alimentation des nappes, les températures quant à elles jouent un rôle prépondérant dans les pertes en eau et par conséquent dans la décharge des nappes car elles régissent directement le phénomène d’évapotranspiration et donc le déficit d’écoulement annuel et saisonnier. Elles constituent donc le deuxième facteur important dans une étude climatique.

Les températures moyennes mensuelles durant 10 années (2005– 2015) sont représentées dans le tableau n°04.

Les températures de la zone d’étude connaissent d’énormes fluctuations au cours des mois de l’année, ils sont très bas en saisons froides (hiver), où décembre est le mois le plus froid (9,3 C⁰) et très élevées en saisons chaudes (été), où juillet est le mois le plus chaud avec une température de (15,82 C⁰). (Tableau- 04) et Fig. (07).

Tableau 04 : Température moyenne mensuelle d’el hamma (2005-2015).

Mois	JAN	Fév.	Mars	Avril	Mai	Jun	Jui	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
T moy	9.52	9.43	10.82	12.37	13.43	14.82	15.82	14.17	13.50	10.8	10.17	9.3

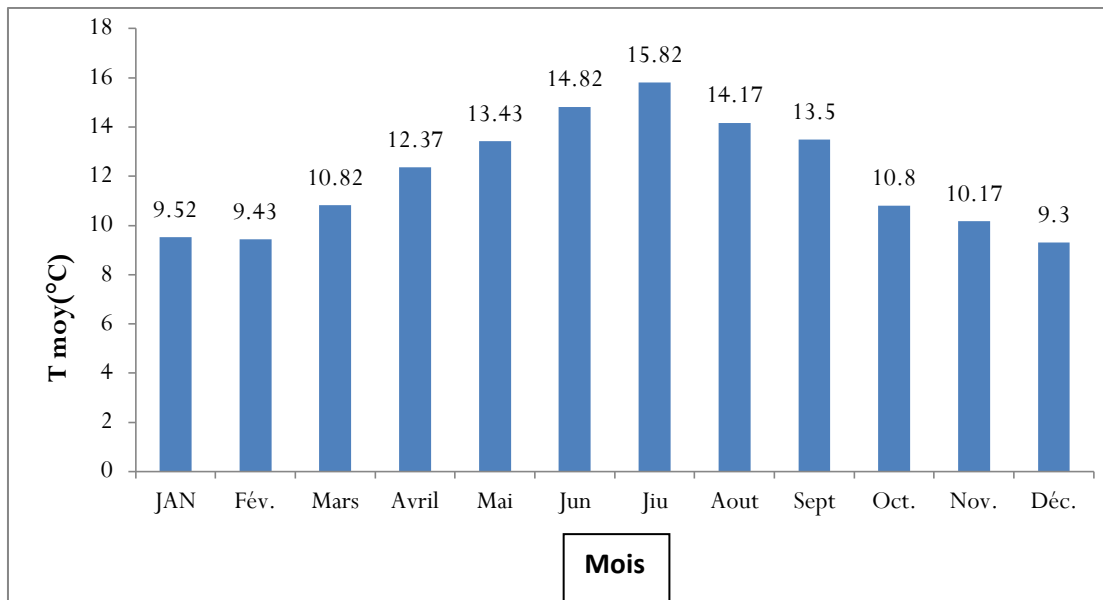


Fig. (07) : Histogramme de températures moyennes mensuelles.

II 2.2.1-Analyse des températures:

D'après le diagramme (Fig.08), On peut distinguer, une diminution de la température à partir du mois de septembre pour atteindre sa valeur minimal au mois de février, c'est le mois le plus froid, avec (6.22°) une élévation de la température où la température croit progressivement a partir du mois de mai pour arriver à une valeur maximale au mois de juillet (c'est le mois le plus chaud, avec 26.98 °C).

Tableau05: Température enregistrée à la station d'el hamma (2005-2015)

Paramètre	T (°C) Moye min	T (°C) Moye max	T (°C) Moye	Amplitude : M-m
sept	15,48	27,95	21,718	12,47
oct.	10,51	21,57	16,04	11,05
nov.	6,42	16,41	11,42	9,99
déc.	2,76	11,84	7,3	9,08
Jan	1,78	11,27	6,52	9,49
fév.	1,61	10,83	6,22	9,21
mars	4,42	15,25	9,84	10,82
avril	7,62	20,1	13,86	12,47
mai	11,21	25,04	18,13	13,82
Jun	15,67	30,33	23	14,66
juil.	18,96	35	26,98	16,04
aout	17,99	32,56	25,27	14,57

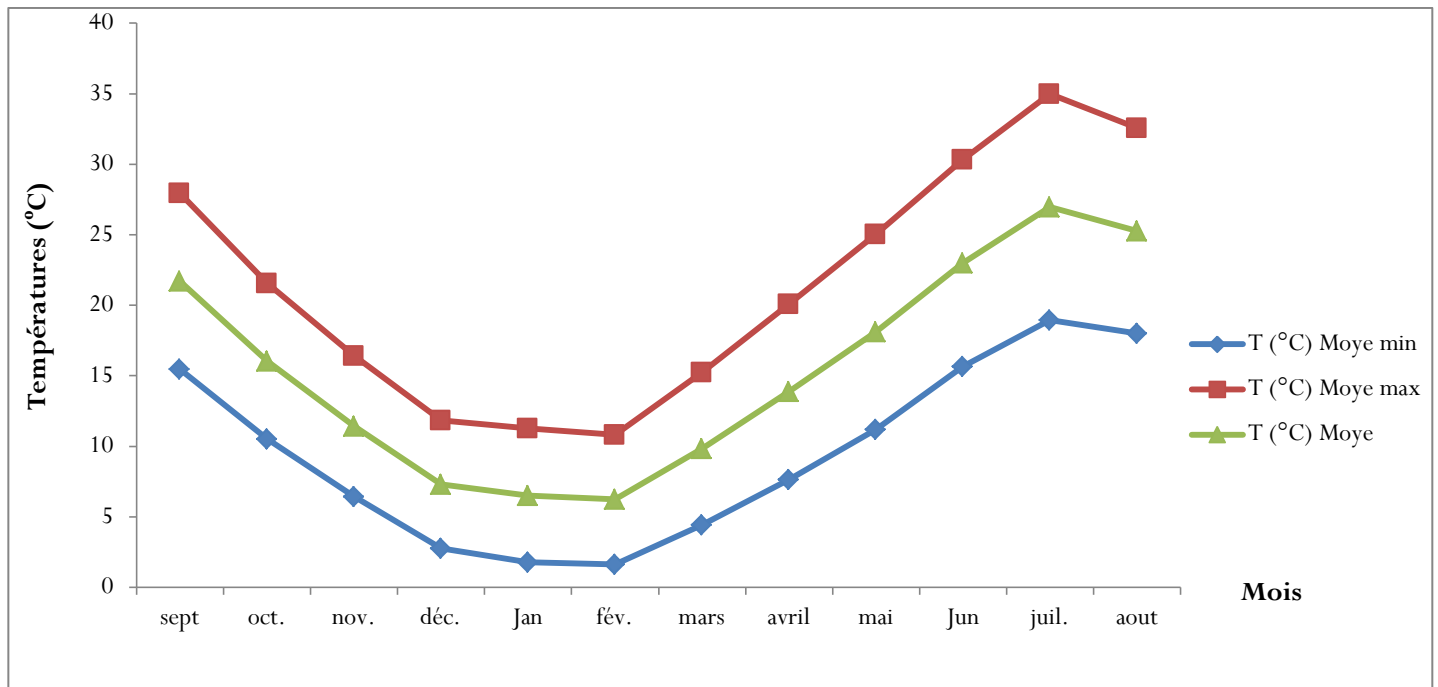


Fig. (08) : La répartition des températures moyennes (max, min, et moye) de la station d'el hamma

II.3 Synthèse climatique :

Après la détermination des caractéristiques climatiques de notre zone d'étude, nous avons élaboré le diagramme Ombrothermique de Gaussen, l'indice d'aridité et le Climagramme d'Emberger pour cette zone.

II.3.1 Diagramme Ombrothermique de Gaussen.

Il a franchi le temps à cause de sa simplicité et de son efficacité. Pour Gaussen un mois est "sec" si le quotient des précipitations mensuelles (P) exprimé en mm par la température moyenne T exprimée en °C est inférieur à 2 ($P \leq 2 T$).

La représentation sur un même graphique des températures et des précipitations moyennes mensuelles avec en abscisse les mois permet d'obtenir les diagrammes Ombrothermique qui mettent immédiatement en évidence les périodes sèches et les périodes pluvieuses. (Guyot 1999).

Les échelles prises en ordonnée sont telles que 1°C correspond à 2 mm de précipitation. On a une période sèche chaque fois que la courbe des températures passe au-dessus de la courbe des précipitations et une période humide dans le cas inverse.

Selon le diagramme Ombrothermique de notre zone d'étude (figure 09) la période sèche

essentiellement estivale s'étale sur 04 mois, allant de mai à aout, et 08 mois humides de septembre à avril.

Tableau06: Pluviothermique d'el hamma

Mois	Jan	fév.	mars	avril	mai	Jun	juil.	aout	sep	oct.	nov.	déc.
T(c°)	6,52	6,22	9,84	13,86	18,13	23	26,98	25,27	21,71	16,04	11,42	7,3
P (mm)	44,31	40,02	55,59	48,69	63,72	26,58	20,92	31,89	67,27	38,1	26,39	38,1

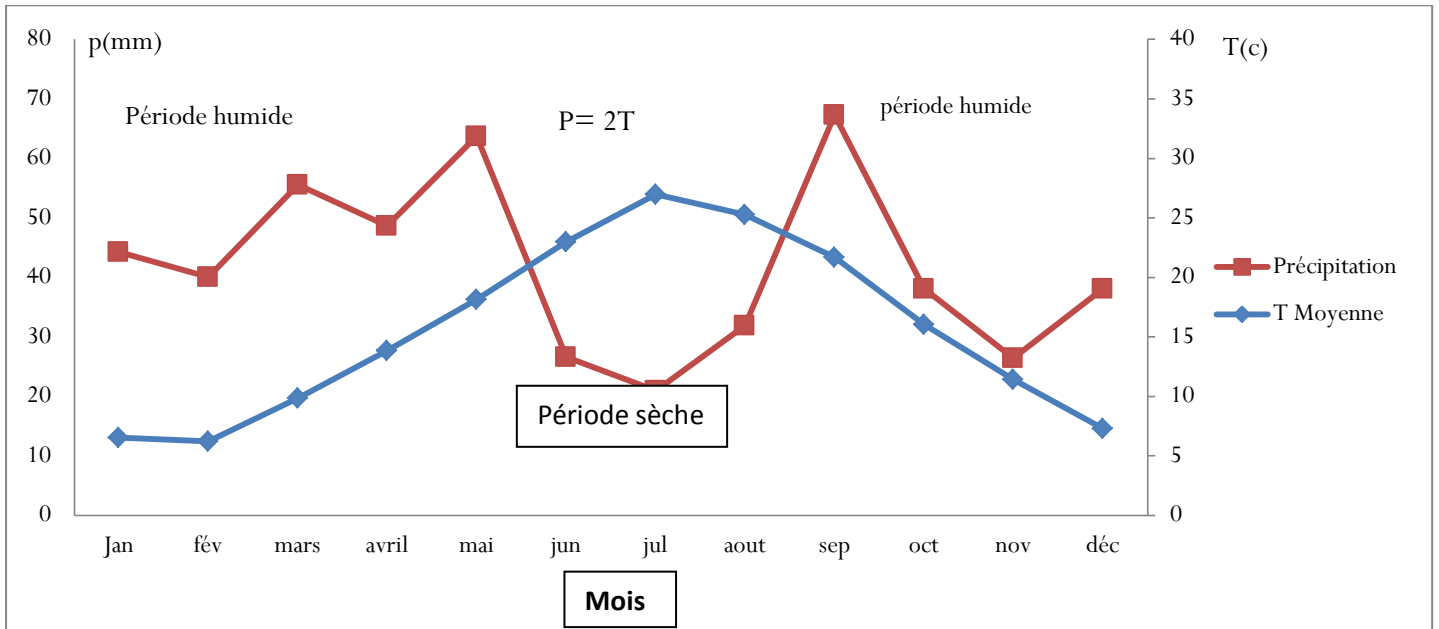


Fig. (09) : Diagramme Ombrothermique de Gaussen de la zone d'étude

Nous constatons un allongement de la période sèche qui s'étale du mois de mai jusqu'au mois d'aout, elle coïncider avec la période la plus chaude (été), et une période humide froid plus longue qui commence du mois d'octobre et se prolonge jusqu'a le mois d'avril.

II.3.2 L'indice d'aridité

En 1925 Emmanuel De Martonne a proposé une formule climatologique permettant le Calcul d'un indice dit indice d'aridité (**I a**). Cet indice est fonction de la température (T en C) Et des précipitations (P en mm) et permet de déterminer le type de climat qui caractérise la zone d'étude, cet indice est calculé par la relation suivante

Les valeurs de l'indice permettent de déterminer le climat selon le classement suivant :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

Quand :

- $Ia < 5$ le climat est hyperaride.
- $5 < Ia < 7.5$ le climat est désertique.
- $7.5 < Ia < 10$ le climat est steppique.
- $10 < Ia < 20$ le climat est semi-aride.
- $20 < Ia < 30$ le climat est tempéré.
- $Ia > 30$ le climat est humide.

Où : **I** : indice d'aridité **P** : précipitations moyennes annuelles en mm.

T : températures moyennes annuelles en °C

$$P=501.53 \quad t=15.25 \quad i=19.86$$

Suivant les valeurs de (**I**) De Martonne le climat est **semi-aride**.

La zone d'étude se caractérise par un climat semi-aride à tendance tempérée.

II.3.3 Climagramme d'Emberger :

Le quotient Pluviothermique d'Emberger (**Q**) destiné à caractériser le climat méditerranéen et ses nuances. En effet (Emberger.1930) a remarqué que dans les régions méditerranéennes l'amplitude thermique annuelle est un facteur important de la répartition de la végétation. (Guyot 1999). C'est un quotient qui est fonction de la température moyenne maximale (**M**) du mois le plus chaud, de la moyenne minimale (**m**) du mois le plus froide en degré Celsius et de la pluviosité moyenne annuelle (**P**) en mm. Ce quotient est d'autant plus élevé que le climat de la région est humide, il est calculé par la formule suivante : (Emberger 1955).

$$Q = \frac{P}{2 \left(\frac{M+m}{2} \right) \times (M-m)} \times 100$$

La formule du quotient d'Emberger qui a été simplifiée par STEWART 1969 s'exprime comme suit :

$$Q2 = 3.43 \times \frac{P}{(M-m)}$$

P : pluviométrie en (mm)

M : moyenne des maximums du mois le plus chaud.

m : moyenne des minimums du mois le plus froid.

(M+m) / 2 : Température moyenne.

Q2 : quotient Pluviothermique annuel en mm.

M-m : amplitude thermique extrême moyenne.

P= 501.53 M= 308.21 m= 274.78

Q2 =47.02

Ce qui confirme le caractère semi-aride du climat de la zone d'étude

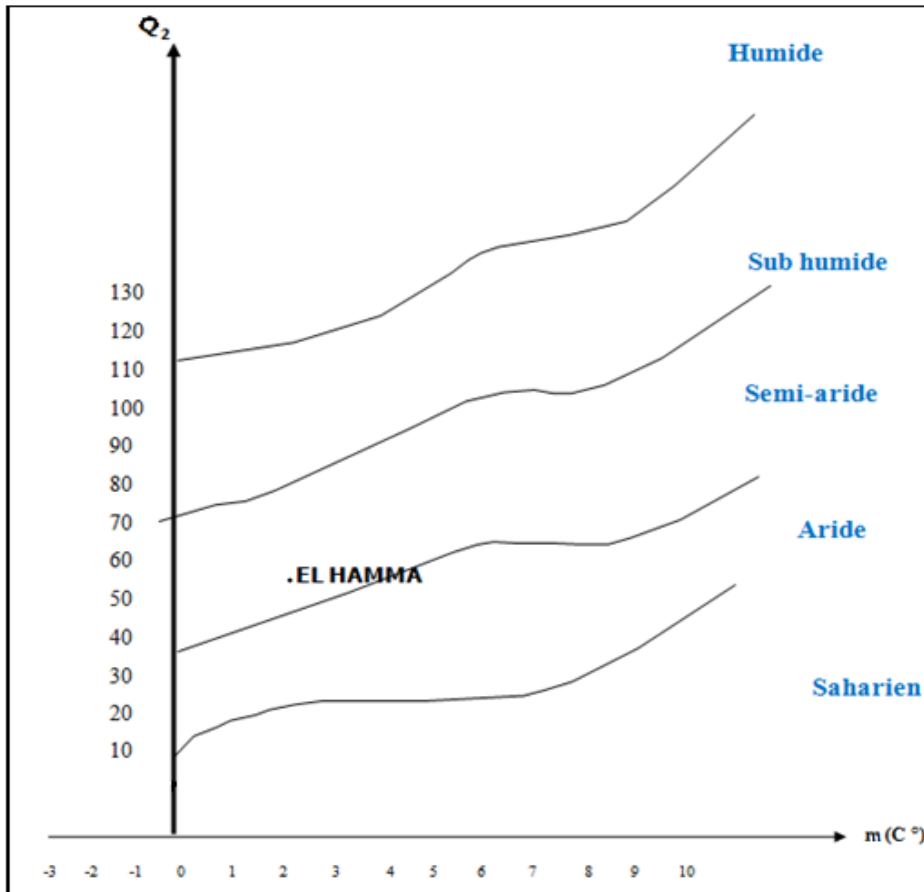


Fig.10: Climagramme d'Emberger D'el hamma (2005-2015)

II.3.4 L'humidité :

Les échanges de vapeur d'eau des couverts végétaux dépendent en premier lieu de l'humidité de l'air atmosphérique. Il est donc utile de rappeler un certain nombre de définitions qui lui sont relatives (Cretinon, 1994).

L'humidité relative à l'air est un élément dont la mesure correcte demande plus que la température.

Tableau 07: L'Humidité d'el hamma

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
H% moy	70,96	68,97	64,7	61,4	56,52	48,12	63,24	62,13	56,83	61,44	66,27	69,01

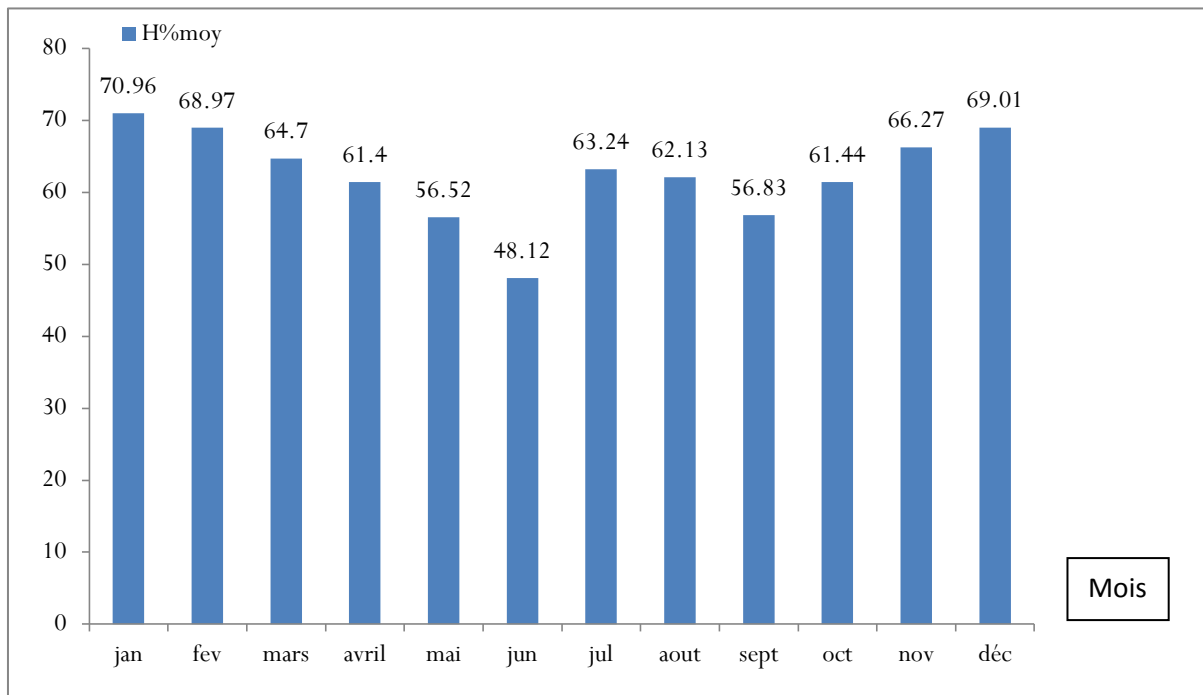


Fig.(11) : Histogramme humidité relative mensuelle moyenne d'el hamma (2005-2015)

A partir de la l'histogramme (Fig.11) on constate que les valeurs de l'humidité sont relativement homogènes. Les données hygrométriques montrent que le pourcentage le plus élevé est enregistré durant le mois de janvier avec (70.96 %) ce qui veut dire qui est le mois le plus humide, alors que le pourcentage le plus faible est enregistré durant le mois de juillet avec (48.12 %).

II.3.5 L'évaporation :

L'évaporation est la restitution de l'eau par l'atmosphère sous forme de vapeur à partir de la surface du sol, quelle que soit sa nature (sol, végétaux, eau libre). Elle est donc un élément très important pour l'établissement du bilan hydrologique, et dépend de plusieurs paramètres, la température, les précipitations, l'humidité de l'air, et le couvert végétal.

Tableau.08 : Les moyennes mensuelles de l'évaporation de la période (2005-2015)

Mois	jan	fév.	mars	avril	mai	Jun	juil.	aout	sept	oct.	nov.	déc.
Evaporation (mm)	57,47	64,15	94,80	116,59	150,43	221,29	259,67	233,39	158,95	115,15	82,33	56,50

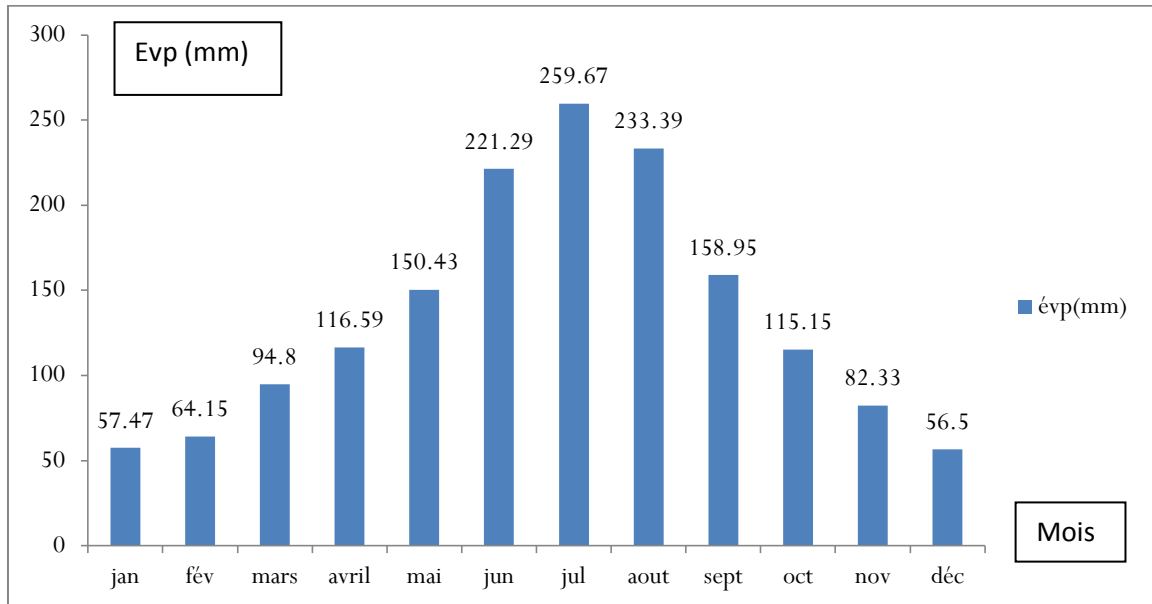


Fig. (12) : Histogramme de variation des moyennes mensuelles de l'évaporation de la période

L'évaporation moyenne variée d'un mois à l'autre. La valeur maximale est enregistrée en juillet avec une moyenne de (259,67mm) et la valeur minimale est enregistrée en décembre avec une moyenne de (56,5)

II.4 Bilan hydrique :

Le bilan hydrique correspondant à une équation entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves. Ainsi pour déterminer le bilan de la région étudiée, il est indispensable d'évaluer ses composantes (infiltration, ruissellement et évaporation). Le bilan hydrique est calculé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I$$

Avec :

P : Précipitation annuelle en mm.

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm.

R : Ruissellement en mm.

I : Infiltration annuelle en mm.

II.4.1 Estimation de l'évapotranspiration :

Est l'ensemble des deux phénomènes, l'une physique « évaporation » et l'autre biologique « transpiration ». On distingue :

- L'évapotranspiration potentielle (ETP) employée lorsque la surface évaporant est convenablement alimentée.
- L'évapotranspiration réelle (ETR) qui représente une fracture de l'ETP, et ne tient compte de l'abondance de l'eau qu'à la surface évaporant.

II.4.1.1 Évapotranspiration réelle (ETR) : "C.W.Thornthwaite".

L'estimation de l'ETR en (mm) par cette méthode est liée au volume de précipitations. Trois cas peuvent se présenter :

- 1^{er} cas : $P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$:

Il y a une reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation, le surplus va représenter l'écoulement superficiel.

- 2^{ème} cas $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$:

Dans ce cas, la RFU (réserve facilement utilisable) va s'épuiser jusqu'à satisfaction de l'ETP.

- 3^{ème} cas $P < ETP$ et $RFU = 0 \Rightarrow ETR = P$:

Il y aura donc un déficit agricole (DA) représenté par la quantité d'eau qui doit être apportée pour l'irrigation.

La station météorologique d'El Hamma a une évapotranspiration réelle moyenne de l'ordre de 484,9 mm/an. (Tableau 09).

II.4.1.2 Évapotranspiration potentielle (ETP) :

C'est la somme des quantités d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée et pendant une période bien définie en considérant des apports d'eau suffisants. Elle est estimée par la formule de « C.W.Thornthwaite » proposée en 1948 et basée essentiellement sur les températures de l'air:

$$ETP = 16 (10 t / I)^a \cdot k$$

Avec: $a = 0,016 I + 0,5$; $I = \sum i$; $i = (t / 5)^{1,514}$

ETP: Evapotranspiration potentielle mensuelle en (mm).

t : Température moyenne mensuelle en (°C).

i : Indice thermique mensuel.

I : La somme des indices mensuels de l'année.

k : Facteur correctif intégrant la durée d'insolation et la température.

Le total de l'ETP est de 848,6 mm

II.4.1.3 Ruissellement (R)

Il est calculé par la formule de « Tixeront Berkaloff » :

$$R = P^3 / 3 (ETP)^2$$

Avec :

R : Ruissellement en (mm).

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm).

ETP : Evapotranspiration potentielle en (mm).

$$R = (501,6)^3 / 3(848,6)^2 = 126203844,09 / 3(720121,96)$$

$$R = 126203844,09 / 2160365,88$$

$$R = 58,41$$

En admettant que la réserve facilement utilisable est égale à 100 mm (saturation), les résultats précédemment obtenus nous ont permis d'établir le bilan hydrique, la synthèse finale de l'étude climatique.

Le tableau suivant résume le bilan de C.W.Thornthwaite de la station d'el hamma (2005-2015).

Tableau 09 : Bilan de C.W Thornthwaite (mm) de la station d'el-hamma (2005-2015)

Période	T (°C)	I	K	ETP C (mm)	Pr (mm)	BH (mm)	CH	VR (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
S	21,72	9,2	1,04	102,7	67,27	-35,5	-0,3	0,0	0,0	67,3	35,5	0,0
O	16,04	5,8	0,98	59,1	38,1	-21	-0,4	0,0	0,0	38,1	21,0	0,0
N	11,42	3,5	0,85	29,1	26,39	-2,8	-0,1	0,0	0,0	26,4	2,8	0,0
D	7,3	1,8	0,84	13,7	38,1	24,4	1,8	24,4	24,4	13,7	0,0	0,0
J	5,63	1,2	0,86	9,2	44,31	35,1	3,8	35,1	59,5	9,2	0,0	0,0
F	6,23	1,4	0,85	10,7	40,02	29,3	2,7	29,3	88,7	10,7	0,0	0,0
M	9,84	2,8	1,03	27,6	55,59	28,0	1,0	11,3	100,0	27,6	0,0	16,7
A	13,86	4,7	1,09	51,3	48,69	-2,6	-0,1	-2,6	97,4	51,3	0,0	0,0
M	18,13	7	1,21	89,3	63,72	-25,6	-0,3	-25,6	71,8	89,3	0,0	0,0
J	23	10,1	1,21	132,3	26,58	-105,7	-0,8	-71,8	0,0	98,4	33,9	0,0
J	26,99	12,8	1,23	175,1	20,92	-154,2	-0,9	0,0	0,0	20,9	154,2	0,0
A	25,28	11,6	1,16	148,3	31,89	-116,4	-0,8	0,0	0,0	31,9	116,4	0,0
	15,5	72,0		848,6	501,6	-347,0				484,9	363,7	16,7

II.5.2 Interprétation du bilan de C.W.Thornthwaite :

Les résultats obtenus du bilan hydrique de C.W.Thornthwaite de la station d'el hamma illustrés dans le tableau précédent et les graphismes si dessous, nous ont permis de tirer les observations suivantes :

- La région d'étude reçoit des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de (501,6 mm) et une température moyenne annuelle de 15,5 °C.
- L'évapotranspiration potentielle (ETP) atteint son maximum au mois de juillet (175,1 mm) et son minimum au mois de janvier (9,2 mm). L'ETP total est de l'ordre de (848,6 mm).
- L'Evapotranspiration réelle (ETR) totale est de 484,9 mm
- Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est pleine, il y a un surplus d'eau accompagné par un ruissellement et quand elle a tendance à diminuer et au point qu'il sera carrément vide, il y aura un épuisement du stock et par conséquent un déficit agricole s'étalant du mois de Juin jusqu'au mois de novembre avec une moyenne annuelle de (363,7 mm).
- La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de décembre (43.6 mm). Elle atteint son maximum (saturation : 100 mm) au mois de mars et reste ainsi jusqu'au mois d'Avril puis elle commence à s'épuiser pour se vider complètement au mois de Juin.
- L'excédent annuel est égal à (16,7 mm) seulement au moi de mars.

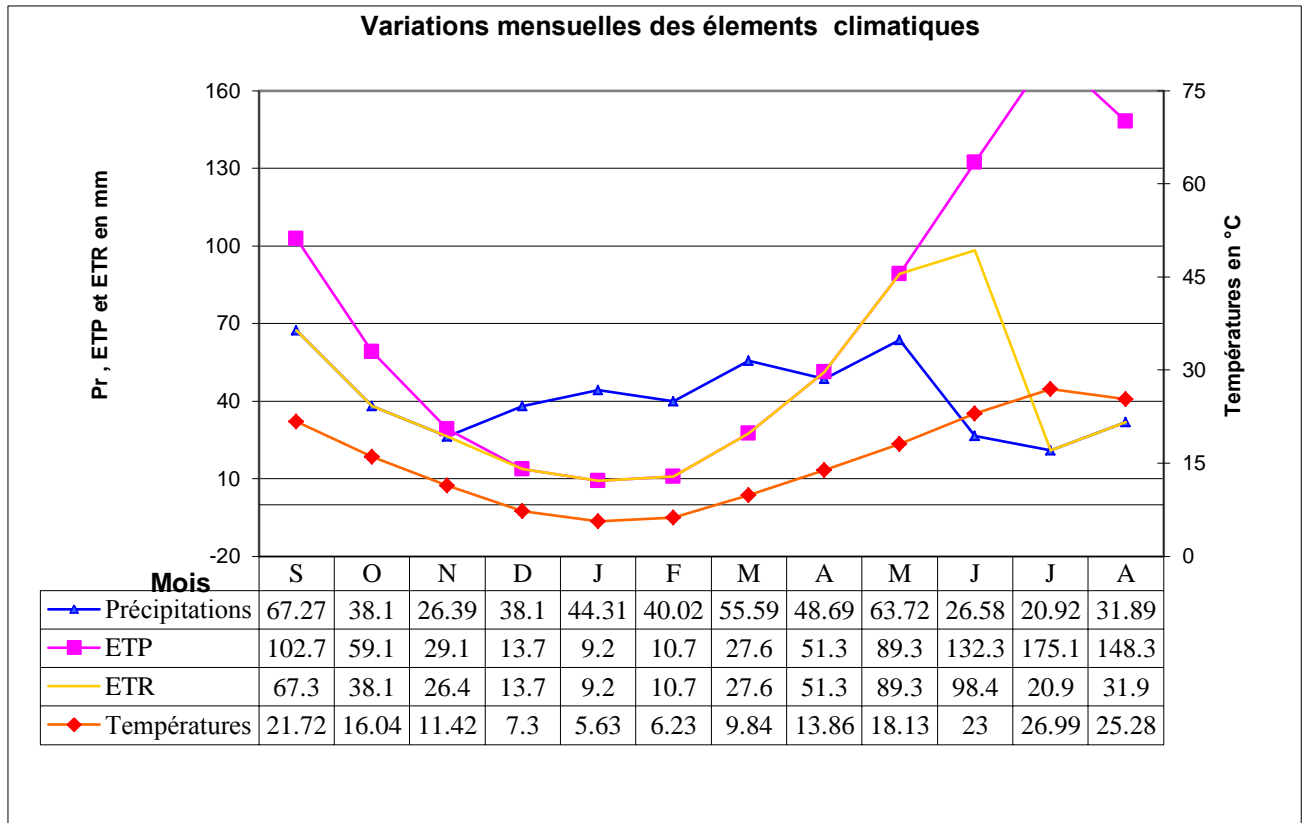


Fig13 : Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station el hamma (2005-2015).

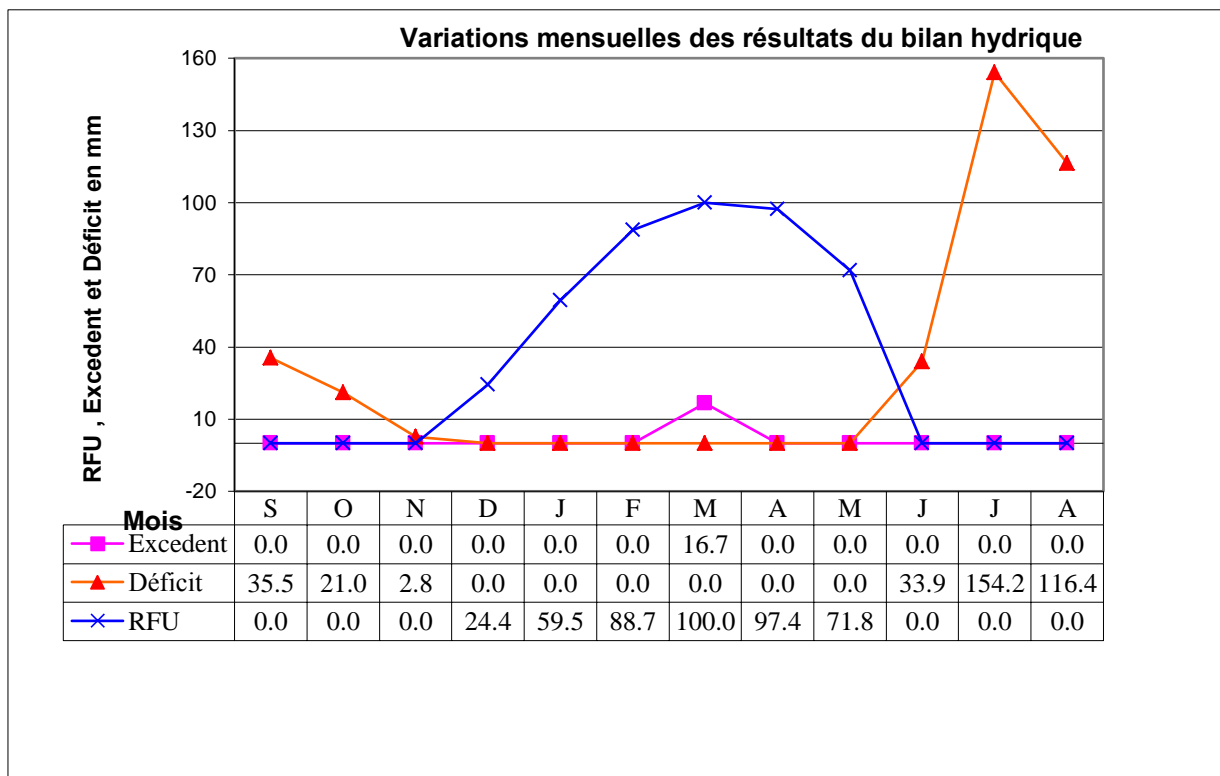


Fig14: Diagramme de la variation de la RFU, du déficit et de l'excédent à la station d'el hamma (2005-2015).

II.6 .Conclusion

Le climat de la région d'étude est typiquement est semi-aride (Hiver froid et Eté chaud). Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 501.53mm. La variation de température moyenne annuelle est de 15.25 (C°), avec un maximum de 26.99C au Mois de juillet et un minimum au mois de janvier 5.63C.

Le bilan hydrique et l'estimation de ses paramètres, nous ont permis de ressortir les résultats suivants :

- l'évapotranspiration réelle (ETR) est de l'ordre de 484,9 mm, ce qui représente 96,6 % des précipitations moyenne annuelles.
R= 58,41 mm/an.
- Le déficit des précipitations pour satisfaire l'évapotranspiration potentielle (ETP) est de l'ordre de 363,7 mm/an répartie du mois de juin jusqu'au mois de novembre, ce qui donne une idée sur l'irrigation nécessaire des terres agricoles durant cette période.

Chapitre III

Revue de littérature

III-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).

III.2. Concept de vulnérabilité des eaux souterraine à la pollution

III.2 .1 historique

La prise de conscience de la nécessité de protection de la ressource en eau est présente depuis très Longtemps dans nos sociétés. Mais depuis quelques décennies, l'exigence de planification du territoire selon des modalités tolérables pour l'environnement souterrain a contribué au développement de la notion d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, on peut le remarquer par le développement de nombreuses méthodes d'estimation de la vulnérabilité. La nécessité de classer les sources de contamination, et de définir les conditions de protection des eaux souterraines se sont fait sentir dans les années 1960 quand Vladirnirskij suggéra le développement d'une méthode, précurseur des cartes de vulnérabilité, permettant la Construction de cartes de potentiel de contamination des eaux souterraines. Margate et Albinet (1970) pour leur part élaboraient en France dans les années 1970 une carte de vulnérabilité des eaux souterraines à l'échelle du pays. Le terme vulnérabilité date des années 1960 et a été choisi afin de sensibiliser la population au fait que même si la notion d'eau souterraine est associée à une image de pureté, cette ressource n'en reste pas moins sensible aux agents extérieurs et susceptible d'être polluée.

Selon la nature et la structure des sols et aquifères le concept de vulnérabilité pourra prendre des formes et des degrés variés de manière à mettre en évidence les capacités de résistances naturelles diverses des milieux (Margate, 1991). D'après Albinet et Margate (1970), les cartes de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine servent à montrer quelles sont les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans les aquifères en tenant compte de la nature des terrains rencontrés en surface et les conditions hydrogéologiques. Cependant, il n'existe aucune définition officielle de la vulnérabilité de

même qu'il n'existe aucune technique standard d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines, ce qui rend difficile la comparaison des diverses évaluations. En effet, la notion de vulnérabilité des eaux souterraines n'est pas une propriété absolue mais un indicateur complexe et le manque d'unicité dans la définition ou plutôt le manque d'acceptation d'une définition du terme «Vulnérabilité des eaux souterraines », contribue à la complexité de cette notion.

Le concept de vulnérabilité peut se définir à 3 niveaux :

- aptitude d'un système d'eaux souterraines à être contaminé.
- intégration de l'aptitude des eaux souterraines à propager et à conserver la contamination
- prise en considération des caractéristiques polluantes du contaminant ce qui fait appel aux Concepts de normes et de seuils de toxicité. (Murat V et al, 2000)

III.2.2. Le concept de la vulnérabilité

Le terme vulnérabilité a été introduit dans la littérature hydrogéologique par le français J.Margat en 1968 (Martinez-Bastida et al 2010, Vrba and Zaporozec 1994) Il est aujourd'hui couramment usité, y compris dans sa version anglaise (vulnerability) ; cf. " Guide Book on mapping Groundwater Vulnerability " (AIH Intern. Contrib. To Hydrogeology, n°16, 1994).

Ce terme de vulnérabilité, appliqué d'abord aux eaux souterraines, permettait par une métaphore expressive, d'abord de sensibiliser (rendre conscient que les eaux souterraines ne sont pas, en général, à l'abri des pollutions, malgré l'idée de pureté naturelle qui leur est communément attachée), puis de faire comprendre des différences (la variété des conditions naturelles rend ces eaux inégalement protégées, d'où divers degrés de vulnérabilité à identifier et cartographier).

Il n'y a pas une définition générale de la vulnérabilité des eaux souterraines (Magiera 2000).

Une des premières définitions trouvées dans la littérature est celle d'Albinet et Margat (1970) qui proposent que "la vulnérabilité d'un aquifère soit la possibilité de percolation et de diffusion de polluants depuis la surface du sol jusqu'à la nappe, dans des conditions naturelles".

Olmer et Rezac (1974) suggèrent que la vulnérabilité des eaux souterraines soit "le degré de dangerosité déterminé par les conditions naturelles et indépendantes des sources de pollution actuelles". Leur point de vue est que la vulnérabilité dépend dans la zone non

saturée de la perméabilité verticale et, dans l'aquifère, du gradient hydraulique et de la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine.

Vrana (1984) définit la vulnérabilité des eaux souterraines comme "le complexe des conditions naturelles de la surface et de la subsurface influençant le mouvement d'un polluant vers l'aquifère".

Villumsen et al. (1982) proposent que la vulnérabilité des eaux souterraines soit "le risque qu'a une substance chimique, utilisée ou entreposée sur ou près de la surface du sol, d'influencer la qualité des eaux souterraines". Selon ces auteurs, la vulnérabilité des eaux souterraines dépend d'une série de paramètres, aussi bien dynamiques que statiques. Ils insistent sur le fait que la composition chimique des eaux souterraines peut être utilisée comme indicateur de la vulnérabilité et ils recommandent que les analyses chimiques des eaux soient utilisées comme vérification préliminaire des cartes de vulnérabilité.

Sotomikova et Vrba (1987) comprennent la vulnérabilité d'un système hydrogéologique comme "l'aptitude de ce système à faire face à des impacts extérieurs, aussi bien naturels qu'anthropogéniques, qui affectent son état et ses Caractéristiques dans le temps et dans l'espace". Civita définit le degré de vulnérabilité intrinsèque comme la possibilité d'infiltration et de percolation de contaminants à travers la zone non saturée (Benacchio et al. 1988)

Mais la majorité des travaux recensés utilise celle de l'association internationale des hydrogéologues (AIH) Vrba Zaporozec (1994): "la vulnérabilité à l'échelle du temps humain soit une propriété intrinsèque naturelle invariante des parties non saturées et saturées du système aquifère et qui dépend de la capacité ou de l'incapacité de ce système à faire face à des processus naturels et des impacts humains."

III.3 Types de vulnérabilité

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

III.3.1 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).

III.3.2 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).

III.4 Les critères de vulnérabilité

III.4.1 Critères de vulnérabilité intrinsèque :

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples Facteurs intervenant soit sur la nature et/ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert. L'ensemble des critères de vulnérabilité rencontrés dans la littérature sont exposés ci-dessous.

➤ Critères relatifs au sol

• Ruissellement – infiltration :

Le ruissellement et l'infiltration efficace (quantité d'eau s'infiltrant jusqu'à la nappe) sont représentatifs de la recharge de la nappe. Ils sont étroitement liés à la topographie et à la nature des formations superficielles.

• Couverture Pédologique

La nature, la texture, la teneur en argiles et en matière Organique, ainsi que la puissance (ou épaisseur).

➤ Critères relatifs à la zone non saturée

- **Profondeur de la nappe libre** : L'épaisseur de la zone non saturée conditionne le temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physico-chimique avec l'encaissant).
- **Amplitude de battement de nappe** : Elle peut devenir un critère de vulnérabilité dans la mesure où elle est significative (l'amplitude de battement de la nappe, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe).
- **Perméabilité verticale de la zone non saturée** : Elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe.

III.4.2 Critères de vulnérabilité spécifique :

Le comportement du polluant potentiel (milieu fixe) dépend des caractéristiques du milieu, mais également des propriétés physico-chimiques et biologiques du composé lui-même (réactions acides bases, d'oxydoréduction, de désorption, biodégradation, synthèse cellulaire, diffusion, évaporation, filtration, transport de germes,...).

Capacités dispersives et épuratoires des sols : Concerne les propriétés auto épuratoires des sols.

Qualité du réseau hydrographique : Le réseau hydrographique peut être vecteur de contaminations vers les eaux souterraines.

Typologie de l'occupation du sol : L'occupation du sol conditionne les volumes et la nature des polluants potentiels (forêt, cultures, élevage, habitat, tissu industriel, etc...).

Tableau 10 : Critère intrinsèque et spécifique de la vulnérabilité des eaux souterraines et leurs Paramètres (vrba et Civita, 1994)

Vulnérabilité intrinsèque (naturelle)				
Critères essentiels				
paramètres	sol	Zones non saturée	Aquiferes (zone saturée)	recharge
Principaux	-Texture -Structure -Epaisseur -Tau de matière -Teneur en argile -Perméabilité	-Epaisseur (par rapport aux niveaux piézométriques -lithologie (en tenant compte de la structure et de la stratification de la roche -temps de Transfer de l'eau	-lithologie (en tenant compte de la structure et de la stratification de la roche) -Epaisseur -porosité efficace -perméabilité -sens d'écoulement des eaux souterraines -temps de résidence et âge des eaux souterraines	-taux de recharge annuelle nette -précipitations annuelles
complémentaires	-Capacité d'échange -Cationique -Capacité de réduction et de sorption -Carbonate -Densité apparentes -Humidité capacité au champ	-teneurs en eau -perméabilité	-inaccessibilité hydraulique -capacité d'emmagasinement -transmissivité	-Evaporation - Evapotranspiration -température de l'air

	-prélèvement d'eau par les racines -réaction de transfert d'azote			
--	--	--	--	--

III.5 Cartographie de vulnérabilité à la pollution

III.5.1 Objet de cartographie :

La sensibilité d'une nappe à la pollution est une notion non mesurable dépendant des paramètres propres de la nappe, car elle est définie par rapport à une pollution qui a déjà atteint la nappe, à partir de la zone non saturée ou d'un ouvrage d'eau souterraine (puits, forage, etc.).

L'objectif d'une carte de la vulnérabilité d'un système en eau souterraine à la contamination est de fournir le potentiel et le degré de risque de contamination, mais aussi le degré des conséquences possibles d'une contamination, de même que les éléments nécessaires, tant pour la prévention que pour les mesures mises en place à la suite d'une contamination. La cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère permet une meilleure gestion de la nappe et des interventions rapides et appropriées en cas de pollution.

III.5.2 Techniques d'estimation de la vulnérabilité :

Le moyen le plus pratique d'exprimer vulnérabilité des eaux souterraines est cartographie de la vulnérabilité. La vulnérabilité des eaux souterraines varie dans l'espace à cause de la grande variation de faciès lithologique des matériaux qui forme la surface.

Le but de la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines est de présenter les différents degrés de protection offerte par les différentes lithologies (Ramos Leal and Rodriguez Castillo 2003), et de fournir les informations pour les aménageurs et aux autorités pour contrôler les activités humaines et protéger les eaux souterraines. Ce type d'information peut aider à assigner les zones sensibles qui ne devraient pas être affectées par les activités anthropogéniques.

Pour chaque zone sensible, le degré de risque des sources de pollutions potentielles doit être estimé (Ramos Leal and Rodriguez Castillo 2003). La carte de risque peut être réalisée par la superposition de la carte qui montre les zones vulnérables avec la carte qui montre la location

Des sources de pollution potentielles ou les activités polluantes occupant le sol (Gogu and Dassargues 2000).

Comme proposé dans Vrba et al. (1994) (dans un recueil exhaustif sur les méthodes cartographiques de vulnérabilité), la vulnérabilité des eaux souterraines est une propriété qui est relative, non-mesurable et sans dimension. Depuis ce terme introduit, plusieurs scientifiques ont essayé de développer des méthodes pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité.

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses, chacun élaborant sa méthode selon ses besoins. La multiplicité des méthodes provient aussi bien des objectifs recherchés au niveau de la réglementation, des activités humaines, des polluants, etc., que du nombre d'organismes qui développent leur propre méthode (Aubre, 1992).

Les méthodes d'estimation peuvent être classées en trois catégories principales (selon Liggett et al. (2009) :

- Méthodes paramétriques avec indices superposables (empiriques) GOD, EPIK, DRASTIC, SINTACS, CALOD, SI, COP. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (SIG, par exemple)
- Méthodes par modélisation physique (mathématiques numériques)
- Méthodes statistiques (prévisionnelles)

III.5.2.1 Les méthodes paramétriques :

Permettant de calculer rapidement de façon empirique des indices de vulnérabilité, sont fréquemment utilisées et s'appuient sur une sélection d'attributs et paramètres physiques représentatifs de la vulnérabilité (épaisseur de la zone non saturée, type de sol, etc.), qui sont discrétisés et classés par intervalle décroissant d'effet supposé sur l'atténuation d'une contamination (donc d'accroissement de la vulnérabilité). Gogu et al. (2000) subdivisent la famille des méthodes paramétriques en trois sous-systèmes, selon l'approche théorique utilisée :

- **Systèmes matriciels.** Basés sur un nombre limité de paramètres physiques rigoureusement choisis et présentés sous forme de matrice. L'estimation de l'indice de vulnérabilité se fait alors de façon très rapide et simple, selon un système de tableau multiparamètres.

- **Systèmes de paramètres classés combinés.** Les paramètres physiques jugés nécessaires à l'estimation de la vulnérabilité sont répartis sur une échelle de valeurs classées d'après leur influence estimée sur l'atténuation d'une contamination potentielle. Ces classes sont ensuite combinées selon un schéma calculatoire défini pour donner un indice final de vulnérabilité.
- **Systèmes « point-count Systems models PCSM » (classement – pondération).** Proche du système de paramètres classés combinés, avec l'ajout de facteur de pondération pour chaque valeur de paramètre, selon son efficacité particulière dans l'atténuation d'une contamination potentielle. Les valeurs finales d'indices sont alors obtenues par la somme pondérée des valeurs de paramètre. La méthode DRASTIC (Aller et al. (1987)) et la méthode SINTACS (Civita et al. (1997)) qui en est dérivée est de bons exemples de systèmes « point-count ».

Le mélange de plusieurs de ces approches dans les schémas conceptuels d'estimation de la vulnérabilité est fréquent (exemple de système hybride matriciel / « point-count » pour la méthode COP).

Tableau11 : Avantages ; Inconvénients et type d'utilisateurs cibles pour les trois types principaux de méthodes d'estimation de la vulnérabilité

Type de méthodes	Avantages	Inconvénients	Type d'utilisateur	Référence
Méthodes paramétriques empiriques	-coûts réduits -rapides -peu gourmandes en données hydrogéologiques -facilement interprétables	-indices de vulnérabilité purement qualitative -fortement dépendantes du jugement de l'expert -fréquentes divergences d'estimation entre les méthodes (pour un même site)	-Administration et gouvernements -Expert divers -domaine éducatif	Aller et al. (1987), Civita et al(1997) Vias et al (2006)
Méthodes par modélisations physique	-indice de vulnérabilité quantifiée	-gourmandes en données hydrogéologiques	-Expert en hydrogéologie et en science de	Connell et al (2003) Neukum et al.

	-peu ou pas de jugement subjectif de l'expert -permettant l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque ou spécifique -basée sur la physique réelle des écoulements	-Difficilement utilisables sans consultations de l'expert -coût élevés : main d'œuvres et logiciels	l'environnement -Administrations et gouvernements	(2009) Jeannin et al (2001)
Méthodes statistiques prévisionnelles	souterrains -indice de vulnérabilité quantifiée avec incertitude -peu ou pas de jugement subjectif de l'expert -corrélation directes avec des données de terrain (contamination réelles et potentielles)	-Spécialisées : souvent développées pour un seul type de contaminant -pas de méthodes « clé- en- mains -difficilement utilisables sans Consultation de l'expert	-experts en hydrogéologies et en science d l'environnement - Administrations et gouvernements	Maseti et al (2009) Tesoriero et al (1997) Worall et al (2003) Worall et al (2005)

III.5.2.2 Approches statistiques et par modélisation physique

Basées sur les processus physiques d'écoulement de l'eau et du transport des contaminants, sont à priori indépendantes du contexte hydrogéologique, les méthodes paramétriques – empiriques sont quant à elles en grande partie dépendante de ce contexte. La plupart de ces méthodes sont ainsi en règle générale dédiées à un environnement hydrogéologique précis, par le choix des paramètres géologiques pour l'estimation de la vulnérabilité. Ainsi les méthodes déjà mentionnées DRASTIC et SINTACS s'appliquent de préférence aux milieux aquifères poreux, alors que les méthodes EPIK (Doerfliger et al. (1999) ; Doerfliger et al. (1998)) et DISCO (Pochon et al. (2008), entre autres, ont été développées pour les milieux karstiques et fissurés, respectivement. Les milieux karstiques ont également été en premier lieu au centre de l'approche européenne (Zwahlen (2004)).

III.6 Les méthodes d'évaluation de vulnérabilité intrinsèque les plus utilisées dans les milieux poreux et karstique

L'étude de vulnérabilité de l'eau souterraine à la pollution est un outil qui permet d'identifier les régions les plus susceptibles à la contamination dans un aquifère donné. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la vulnérabilité des aquifères :

III.6.1 Aquifer vulnerability index (AVI) (Van Stempvoort 1993):

C'est un system d'évaluation a notation et il prend en compte deux paramètres seulement : la conductivité hydraulique **K** (perméabilité) de chaque couche au-dessus de la surface d'eau souterraine et son épaisseur **d**.

$$C = \sum D_i / K_i, \text{ pour les couches de } 1 \text{ à } i$$

Dans ce type d'approche, des valeurs hydrauliques saturées de conductivité (K_{sat}) sont assignées à chaque couche sédimentaire rapportée par point. Ces valeurs sont souvent établies à partir de valeurs typiques issues de recherches bibliographiques. L'épaisseur des différentes couches sédimentaires découle de l'étude des ouvrages existants sur le territoire de l'étude. La résistance hydraulique (c) à la dimension du temps (par exemple en années) et représente le flux-temps par gradient d'unité pour l'eau s'infiltrant au travers des diverses couches de sédiment vers la couche aquifère saturée.

Une résistance hydraulique (c) faible, suppose une vulnérabilité importante, au contraire (c) élevée suppose une vulnérabilité faible.

Résistance hydraulique, c (années)	Notation (c)	Catégorie de vulnérabilité
< 10 ans	< 1	vulnérabilité extrêmement élevée
10 -100 ans	1 à 2	vulnérabilité élevée
100 -1000 ans	2 à 3	vulnérabilité modérée
1000 -10000 ans	3 à 4	basse vulnérabilité
> 10.000 ans	> 4	vulnérabilité extrêmement basse

III.6.2 SINTACS

Elle est dérivée de la méthode DRASTIC, développée en Italie, par CIVITA au début des années 1994, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Petelet et al, 2000). Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien :

- S : Soggiacenza (profondeur de la nappe) ;
- I : Infiltrazione (infiltration) ;
- N : Azione del Non Saturo;
- T : Tipologia della Copertura (sol) ;
- A : Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero ;
- C : Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique) ;
- S : Acclività della Superficie Topographica

Contrairement à DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et dans des cellules différentes, des facteurs de pondération variables selon les situations (Schnebelen et al. 2002). L'index final résultant de cette méthode est divisé sous forme de pourcentage puis d'intervalles définis sur la base de 500 tests. Ces intervalles sont regroupés en six classes de vulnérabilité. SINTACS utilise donc les sept mêmes paramètres que DRASTIC mais est plus flexible au niveau du système d'indexation et de pondération.

L'utilisateur code les données d'entrée en fonction des situations locales de chaque cellule, avec la possibilité d'utiliser des classifications différentes suivant les conditions.

III.6.3 DRASTIC

Cette méthode a été développée par Aller et al (1987) pour U.S Environmental Protection Agency (EPA), comme une méthode d'évaluation de la pollution potentielle des eaux souterraines sur une petite échelle. Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères :

- D : Depth to groundwater (distance à la nappe, épaisseur de la Zone non saturée) ;
- R : Recharge (recharge) ;
- A : Aquifer media (nature de la zone saturée) ;
- S : Soil media (nature du sol) ;
- T : Topographie (topographie, pente en %) ;

- I : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée) ;
- C : Conductivity (perméabilité de l'aquifère).

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité.

L'index de vulnérabilité final (D_i) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante :

$$D_i = D_n D_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p$$

Où : D, R, A, S, T, I, C, sont les paramètres cités plus haut

n : notation accordée à chaque paramètre ;

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Les notations généralement accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

III.6.4 La méthode SI (Susceptibility Index)

La méthode SI (Susceptibility Index ou méthode d'Indice de Susceptibilité), qui estime la vulnérabilité verticale spécifique à la pollution agricole (essentiellement par les nitrates et également par les pesticides), a été développée au Portugal par RIBEIRO (2000). Cette méthode prend en considération cinq paramètres. Les quatre premiers paramètres sont identiques à quatre paramètres déjà utilisés dans la méthode DRASTIC (D : la profondeur de la nappe, R : la recharge efficace de l'aquifère, A : la lithologie de l'aquifère, et T : la pente topographique du terrain). Les cotes correspondantes aux différentes classes de ces paramètres, dans la méthode DRASTIC, ont été également conservées. Un cinquième nouveau paramètre a été introduit : le paramètre occupation des sols (OS). La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Land Cover (EUROPEAN COMMUNITY, 1993). Une valeur appelée facteur d'occupation des sols et notée LU, variant de 0 à 100, est attribuée à chaque classe d'occupation des sols. Il est à signaler que les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres ont été multipliées par 10 pour faciliter la lecture des résultats obtenus. Ces valeurs varient par conséquent de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable. Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité.

III.6.5 La Méthode GOD (Foster 1987).

Développée par Foster en 1987, elle présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la Migration latérale des polluants dans la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

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

Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère. L'indice de GOD est le résultat de multiplication des trois paramètres $GOD = C_G * C_o * C_D$

III.6.6 La Méthode GALDIT

(Chachadi et Lobo- Ferreira, 2001) développer dans le cadre du projet Euro-Indien COASTIN (programme INCO DEV du 4èmePCRD), cette méthode est préconisée pour les aquifères côtiers pour la détermination de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines par rapport à l'intrusion saline fondée sur la combinaison de six paramètres pouvant influencer l'intrusion saline potentielle : -Le type d'aquifère, libre, captif ou semi-captif (Groundwater occurrence) ;

- La conductivité hydraulique de l'aquifère (Aquifer hydraulic conductivity)
- La profondeur de la nappe en dessous du niveau de la mer (Depth to groundwater Level above sea)
- La distance par rapport à la côte (Distance from the shore) ;
- L'impact de l'état actuel de l'intrusion saline dans la zone d'étude (Impact of existing status of seawater intrusion in the area)
- L'épaisseur de l'aquifère (Thickness of the aquifer).

Le processus de calcul de l'indice GALDIT prend en considération le poids relatif assigné à chaque paramètre. Il varie de 1 à 4, La variabilité des conditions hydrogéologiques et l'effet cumulé des deux aspects. La multiplication des paramètres du modèle permet de définir l'indice GALDIT de vulnérabilité

III.6.7 La méthode GLA (Hölting et al 1995)

Cette méthode proposée par l'observatoire géologique allemand (Geologische Landesämter) et l'institut fédéral des géosciences et ressources naturelles. Cette méthode est basée sur un système de notation par lequel l'efficacité globale de protection de la couverture du sol et zone non saturée est calculée. Elle exige les paramètres suivants:

Paramètre 1: S - capacité de champ effectif du sol

Paramètre 2: W – taux de percolation (recharge des eaux souterraines)

Paramètre 3: R - type de roche

Paramètre 4: T - épaisseur du sol et la roche couverture au-dessus de l'aquifère

Paramètre 5: Q - points de bonus pour les systèmes aquifères perchés

Paramètre 6: HP - points de bonus pour les conditions de pression hydraulique

L'efficacité globale de protection (**PT**) est calculée en utilisant les équations suivantes **(1)** - **(3)**:

$$PT = P1 + P2 + Q + HP \dots \dots \dots (1)$$

P1-efficacité protectrice de la couverture du sol: $P1 = S * W \dots \dots \dots (2)$

Efficacité protectrice **P2** de la zone non saturée (sédiments ou roches solides):

$$P2 = W * (R1 * T1 + R2 * T2 + \dots \dots + Rn * Tn) \dots \dots \dots (3)$$

III.6.8 La méthode RISK et RISK2

Destinée aux milieux karstiques est une méthode de cartographie multicritère de la vulnérabilité des surfaces contribuant à la recharge de l'aquifère. Elle fournit une cartographie hiérarchisée en 5 classes de vulnérabilité. Se basent sur les critères : Réservoir aquifère, Infiltration, Sol, Karstification et Epikarst. RISK2 prend en compte les phénomènes exo-karstiques tels que les dolines, avens et pertes.

III.7 L'apport des systèmes d'information géographique

III.7.1 Les définitions et fonction d'un S.I.G

De façon générale un SIG peut être défini comme un système informatique de gestion et de traitement d'informations localisées. Un SIG peut être considéré comme un modèle du monde réel (Fig15) qui permet d'élaborer, de tester et de choisir des scénarios d'évolution pour l'avenir.

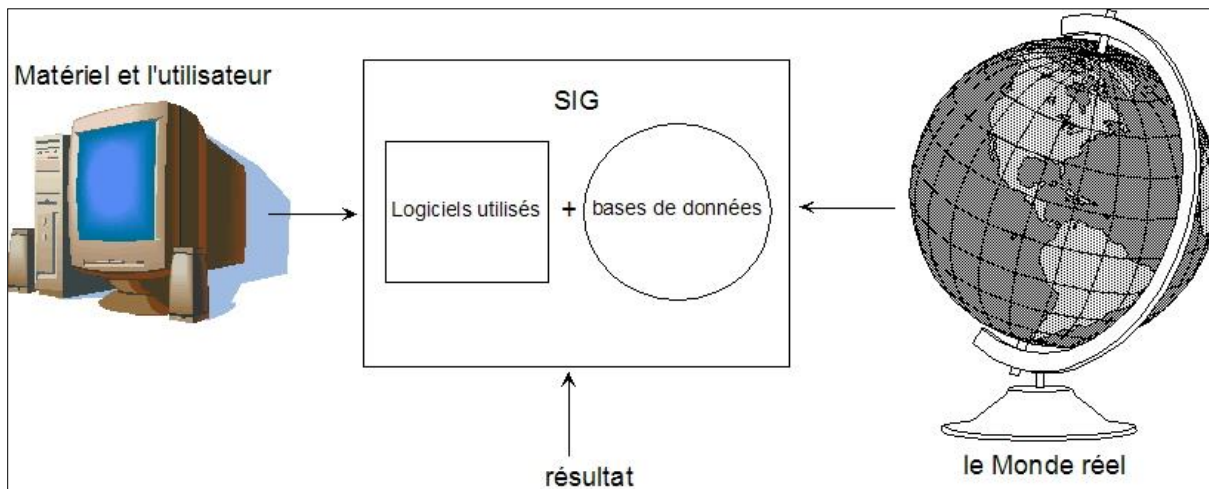


Fig. (15) Schéma d'un SIG

III.7.2 Composants d'un SIG

Le cœur d'un SIG est constitué (figure 16) par la base des données géographiques (BDG) composée de deux composants principaux (Collet, 1992).

- Une base de données spatiales décrivant les objets spatiaux (couche géologique, limites de nappes, limites de bassins versants, ouvrages d'eau souterraine...);
- Une base de données alphanumérique (attributs) (figure 17) définissant les caractéristiques thématiques (faciès lithologique, profondeur de l'eau, cote de substratum, productivité des ouvrages ...) des objets spatiaux.

Autour de cette base de données gravite un ensemble de systèmes informatiques avec lesquels elle est en interaction permanente. Chaque système a une fonction précise au sein du SIG (Didon 1990). On distingue notamment :

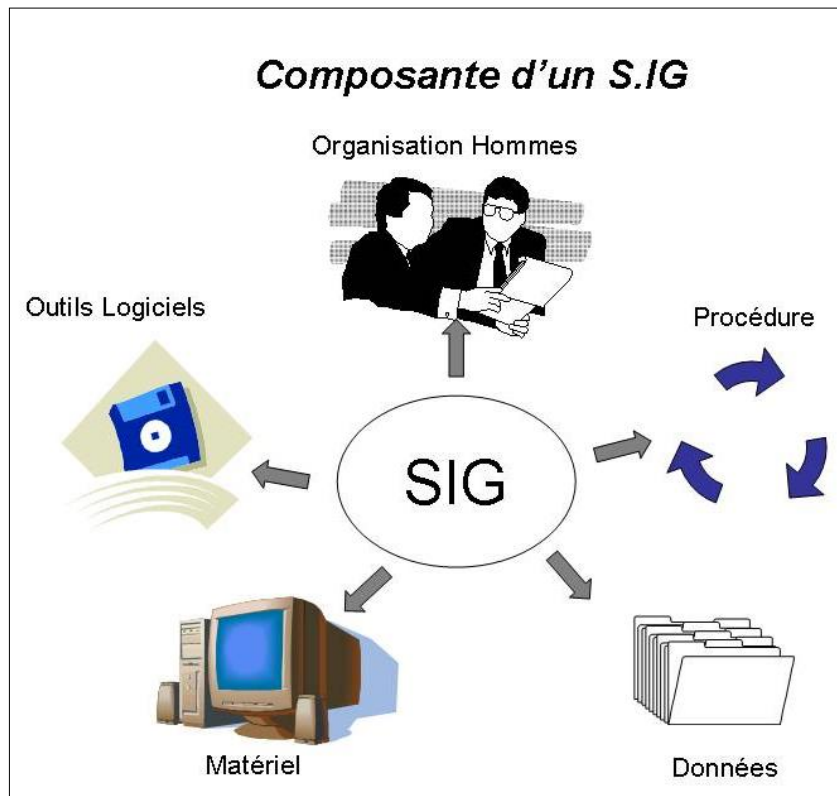


Fig. (16): les composantes d'un système d'information géographique

Données Géographiques								
Données a références géographiques				Données Alpha-Numériques				
Localisation en X, Y			Localisation topologique (relationnelle)		Variable	Classes	Valeurs	noms
Point	Ligne	Surface	Grille	Réseau				
*								

Fig. (17): Données manipulées par un SIG

III.7.2.1 Le Systeme de saisie numérique

Ce système permet de saisir les documents à caractère spatial (Figure 18) (telles que les cartes topographiques, géologiques...) et de convertir l'information analogique en une information numérique.

Un des moyens de saisie d'un document cartographique par le SIG, est l'utilisation de la table à digitaliser.

Les bases de données alphanumériques (attributs) peuvent être directement saisies dans des nouvelles tables du SIG ou importées à partir d'autres logiciels (Excel, Access, Dbase, etc....).

III.7.2.2 Le Systeme de traitement d'images

Les images qui ne peuvent être digitalisées (photo aériennes, satellitaires, etc....) peuvent être scannées et calées attribution de coordonnées (x, y) à chaque point de l'image dans le type de projection correspondant à la zone étudiée.

III.7.2.3 Le Systeme de gestion et de la base de données

Un SIG contient non seulement un SGBD traditionnel (gestion des données thématiques), mais aussi une variété d'outils capables de gérer à la fois les dimensions thématique et spatiale de l'information.

Par exemple le SGBD permet de répondre à des requêtes formulées par les gestionnaires des ressources en eau souterraine (sélection des données relatives à un secteur donné, combinaisons mathématiques plus ou moins compliquées (profondeur d'eau, profondeur du substratum...) et de mettre des résultats dans des tableaux, graphiques, cartes...

Le système de gestion de la base de données a une liaison bidirectionnelle avec la base de données géographique (spatiale). Ainsi, il prélève à la fois de l'information de la BDG et la complète à l'aide des résultats des analyses effectuées.

III.7.2.4 Le Systeme d'analyse statistique

Ce système permet de faire tous les traitements statistiques classiques des données et des procédures statistiques d'analyse de la dimension spatiale.

III.7.2.5 Le Systeme d'analyse spatiale

L'analyse spatiale de l'information constitue l'outil le plus puissant d'un SIG. Elle constitue une extension des capacités d'interrogation des bases de données traditionnelles, en prenant en compte la localisation géographique des observations.

Ce système permet par exemple de fusionner plusieurs objets selon des critères et des conditions fixés par l'utilisateur (des zones de même faciès géologique par exemple), et de créer ainsi de nouvelles tables plus synthétiques et plus facilement exploitables (Figure18).

Le système d'analyse spatiale a une liaison bidirectionnelle avec la base de données géographique.

III.7.2.6 Le Systeme de représentation cartographique

Ce système permet de sélectionner des éléments de la BDG et de les représenter cartographiquement à l'écran de l'ordinateur ou à l'imprimante.

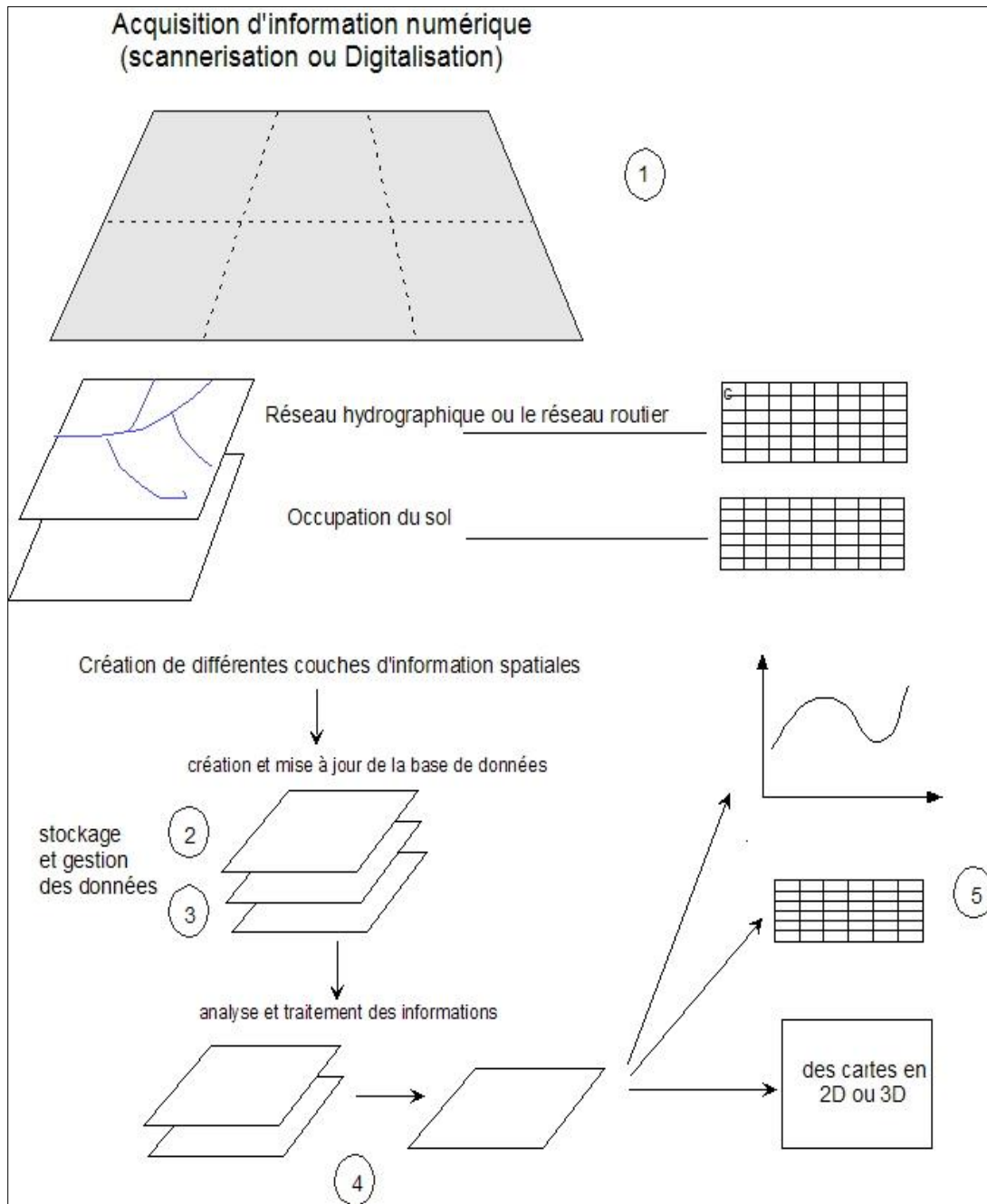


Fig. (18): Principales fonctions d'un SIG

III.7.3 Mode de représentation d'un SIG

Il existe deux approches fondamentales pour représenter l'espace géographique dans un système d'information géographique ; le mode vectoriel et le mode matriciel. Ces deux modes sont complémentaires et permettant de créer des modèles d'une qualité supérieure.

Mode raster il existe deux approches fondamentales pour représenter l'espace géographique dans un système d'information géographique ; le mode vectoriel et le mode

matriciel. Ces deux modes sont complémentaires et permettant de créer des modèles d'une qualité supérieure.

III.7.3.1 Mode raster

Le mode raster correspond à une division régulière (Figure 19) de l'espace étudié en cellules rectangulaires carrées (pixels). Il est fortement lié à la notion d'image. Les images satellitaires en sont des exemples.

Chaque pixel est référencé en ligne et en colonne et contient une valeur correspond à une grandeur numérique (niveau d'eau, perméabilité teneur en nitrates...) ou alphanumérique (dans ce cas on lui attribue un code (Figure 20) correspond à un attribut descriptif). La résolution de ce type de SIG (taille occupée par un pixel sur terrain) correspond à la taille des plus petits objets que l'on pourra identifier.

Ce mode de représentation est très adapté pour effectuer des calculs entre pixels de mêmes dimensions ayant les mêmes coordonnées et appartenant à des couches différentes du SIG. C'est le cas par exemple de la carte de vulnérabilité d'un aquifère élaborée à partir de plusieurs couches d'information relatives au sol, à la recharge et à la zone non saturée de la nappe.

Un inconvénient majeur de ce mode de représentation est qu'il exige de larges volumes pour le stockage des données, ce qui ralentit énormément leur manipulation sur les PC. Les dimensions des fichiers peuvent être cependant considérablement réduites à l'aide des méthodes de compaction.

III.7.3.2 Le Mode vecteur

Le mode vecteur permet la représentation des objets dans un espace continu (non discrétisé) (Figure 19) : les objets et leurs limites sont localisés avec précision dans un référentiel géographique ou cartésien. Cette structure de données est liée à la notion de carte.

Les objets et leurs limites sont digitalisés et leur représentation se fait sous trois formes de base : les points (ex : puits, forages, sources, sondages électriques, sources de pollution...), les polygones (ex : réseau hydrographique, réseau routier...) et les polygones (ex : surface d'une formation géologique, d'un aquifère, d'un périmètre irrigué..).

Le repère utilisé pour localiser les objets peut être géographique (longitude, latitude) ou cartésien (système Lambert). Ainsi, un point est désigné par ses coordonnées et une ligne

continue est codée de manière approchée par ligne brisée (suite de points repérés par leurs coordonnées).

Le mode vecteur a l'avantage de permettre une représentation plus conforme au mode réel. Le SIG est constitué par la superposition, la visualisation et l'impression de tous les objets existants, par exemple les réseaux hydrographique et routier, les courbes de niveau, les limites des couches géologiques, la situation des ouvrages d'eau souterraines...). La sortie finale des documents est généralement d'une grande qualité et pourra se faire à l'échelle voulue.

Ce mode ne permet pas cependant de faire des calculs numériques entre les différentes couches d'information d'un SIG. Les croisements entre les différentes couches d'information sont délicats, car ils font appel à des algorithmes complexes et nécessitent une typologie

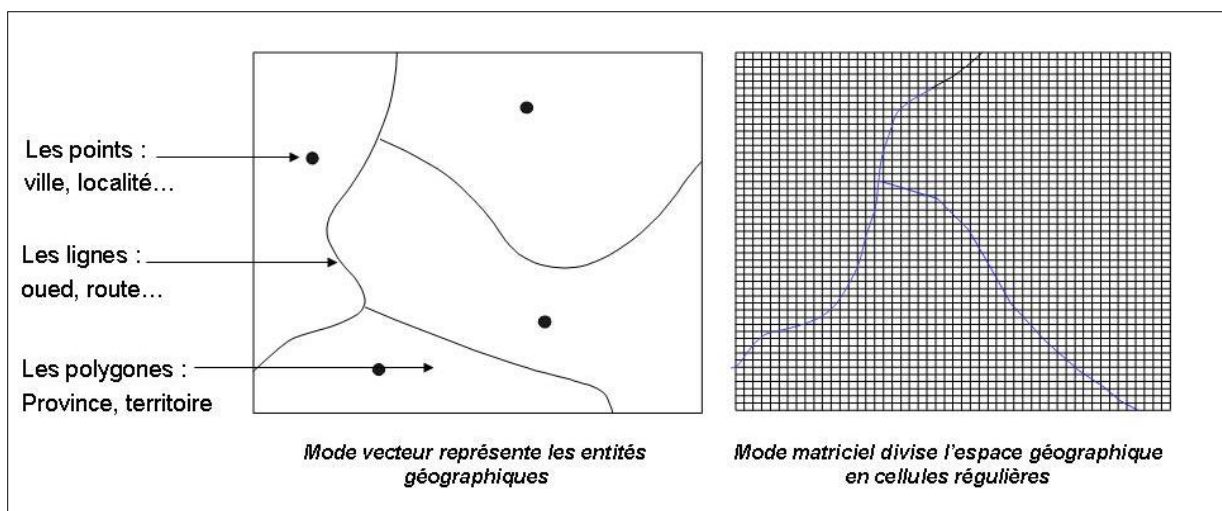


Fig. (19): La représentation en mode vecteur et en mode raster

III.7.3.3 Combinaison des modes vecteur et raster

Loin de s'opposer, les deux modes de représentation (vecteur et raster) d'un SIG se compètent dans leur utilité pour représenter et modéliser le monde réel.

Si tous les SIG comportent un système de gestion de bases de données, certains ne seront à même de ne traiter que des données du type raster, d'autre n'utilisent que des données de types vecteurs.

La nouvelle génération des SIG disponibles actuellement sur le marché dispose des algorithmes de conversion (Figure 21) nécessaires et permettent le passage du mode vecteur en mode raster et inversement (ArcView par exemple). La tendance sous ses deux modes : vecteur et raster.

III.8 Acquisition de donnée

III.8.1 Introduction

L'acquisition des données pour un SIG ne consiste pas uniquement à leur introduction dans une base de données, mais aussi à les codifier. Cette codification doit considérer le format et la structure des données utilisés par le logiciel envisagé. En effet, tout objet à saisir doit être nommé ou codifié. Ainsi, il peut être distingué des autres et appelé facilement chaque fois que c'est nécessaire. En principe, l'acquisition des données se fait en trois phases (Figure20) :

- Saisie des données spatiales,
- Saisie des attributs
- Lien entre les données spatiales et leurs attributs.

Il est nécessaire de disposer des données. Ces données proviennent de sources variées qui englobent entre autres : Base de données existantes,

- Tableaux, listes de données numériques ou alphanumériques, etc.
- Observations terrain par moyen d'instruments topographiques (GPS, carnet électronique, etc.),
- Photographie arienne,
- Images satellitaires,
- Cartes existantes,
- Tout document graphique,

Par échantillonnage (aléatoire, systématique, stratifié, etc..).

III.8.2 Saisie des données spatiales

- **Donnes existentes**

Ces données concernant surtout les observations topographiques, les bases de données existantes, des fichiers de données numériques provenant de différents logiciels et des listes et tableaux de données numériques et/ou alphanumériques. Ces données pouvant être introduites

dans la base des données d'un SIG si leur format est compatible avec le format des données traitées par le logiciel.

- **Numérisation**

Cette opération consiste à numériser toutes les entités spatiales. Ainsi, selon le type de données à numériser, l'opérateur doit choisir entre l'utilisateur d'une table à numériser et un instrument à balayage électronique (scanner) (Figure 20). Le principe général de numérisation consiste à mesurer, dans un système d'axes, tous les détails du document à saisir.

- **Conversion**

Quelque soit la méthode utilisée, l'opérateur d'un SI G peut avoir besoin de données en mode vecteur ou de données raster qu'une conversion d'un mode à l'autre peut être nécessaire. Cette conversion est réalisée par un module quelques fois incorporé dans le logiciel utilisé ; certains logiciels n'offrent pas cette facilité. Par conséquent, l'opérateur peut réaliser le programme de conversion en se basant sur les divers algorithmes répondant à cet objectif.

III.8.3 Saisie les attributs

Les attributs sont caractérisés par leur aspect non spatial (Figure 21). Par exemple, une zone peut être définie spatialement par sa limite, enregistrée dans la base par les coordonnées des points infiniment voisins qui la forment (mode vecteur) ou par la position et les valeurs des pixels se trouvant sur l'étendue de cette zone (mode raster). Cependant, cette zone peut être caractérisée par une culture spécifique, un type de sol bien défini, un type d'irrigation particulier, un ou plusieurs propriétaires, un type de terrain donné, etc. Ces données descriptives constituent les attributs. Ainsi, la saisie de ces éléments est réalisée parallèlement à la saisie des données spatiales ou plus tard en utilisant le système de gestion de la base des données. De même, chaque attribut est décrit par un identificateur qui sert à le distinguer des autres attributs ou à l'extraire lorsque c'est nécessaire.

III.8.4 Lien entre données spatiales et attributs

L'utilisation d'une structure de données adéquate facilite la gestion et la mise à jour de ces données. Par conséquent, l'utilisation de codes et d'identificateurs uniques rend le lien efficace entre les deux types de données (Figure 21). Ce lien sert à faire correspondre chaque entité graphique aux différents attributs qui lui sont associés. Ainsi, chaque objet est décrit dans la base de données d'une manière claire et détaillée. Cette description peut inclure aussi

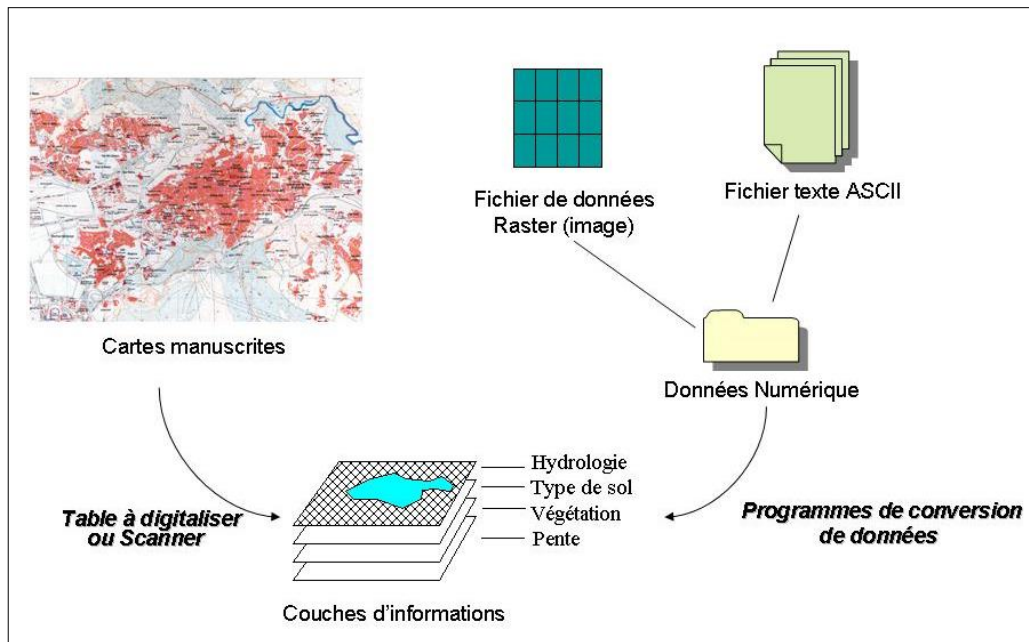


Fig. (20): Acquisition des données pour un SIG

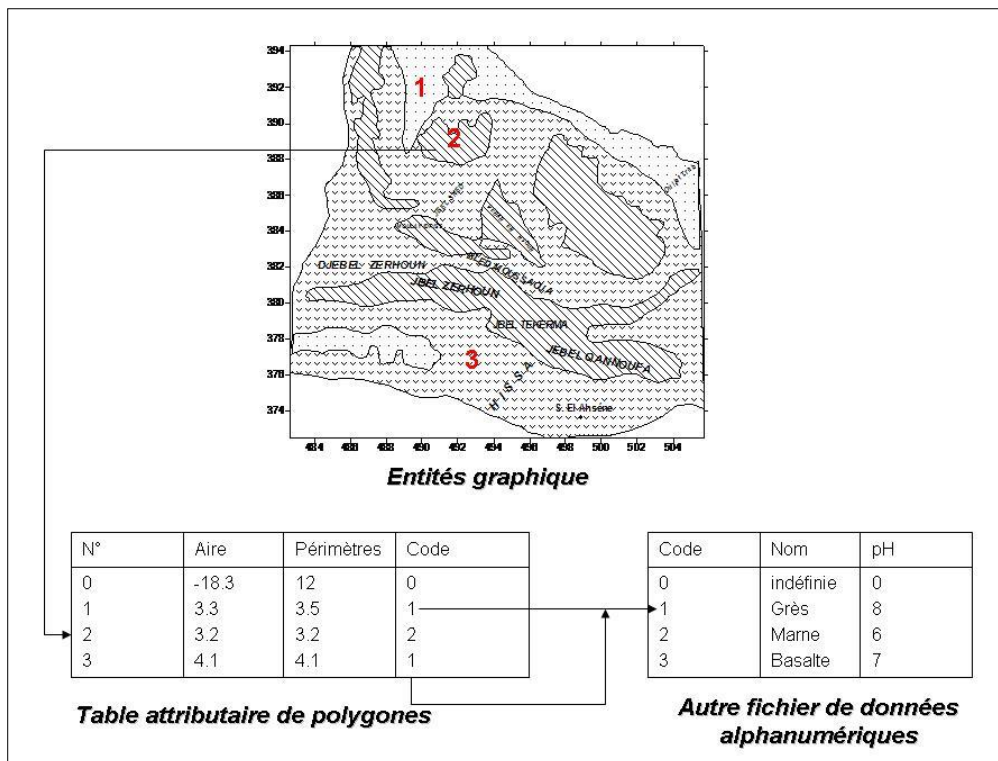


Fig. (21): Structure d'une couche d'information

Les objets voisins. De même, une description topologique des différentes relations existantes entre les objets représentés et entre ces objets et leurs attributs, constitue le lien fondamental des données spatiales et non spatiales. La majorité des SIG actuels incorporent un système de gestion de base de données utilisant une structure topologique.

III.8.5 Fonction d'analyse d'un SIG :

En principe, les tâches et les opérations d'analyse réalisées dans le cadre d'un SIG sont gérées par des routines informatiques. Malgré que chacune de ces routines ait un objectif précis, elle est basée sur des fonctions d'extraction, de reclassification ou de superposition.

- **Extraction de données**

Les fonctions d'extraction des données utilisent l'algèbre booléenne. Ce dernier, appliqué sur les attributs et les propriétés spatiales, fait appel aux opérateurs : ET, OU, négation et OU exclusif.

- **Reclassification des données**

La reclassification des données est une étape qui suit l'étape d'extraction. C'est ainsi que l'opérateur peut visualiser les résultats et décider sur la nouvelle structure des données. De plus, la reclassification doit tenir compte de toute opération de fusion ou de séparation. Par exemple, un segment commun à deux zones fusionnées doit être éliminé de la base de données.

- **Superposition des données**

En générale, l'opérateur ne travaille pas avec un seul type de données, mais, plusieurs types de données. De même, il peut avoir besoin de connaître, par exemple, les zones caractérisées par un certain type de sol, ayant une utilisation spécifique et espacées des zones urbaines d'une certaine distance. Dans ce cas, l'opérateur a besoin au moins de deux cartes (carte de classification des sols, carte d'utilisation des sols).

Opérations ponctuelles

- Addition,
- Soustraction,
- Multiplication,
- Division,
- Exponentiation,
- Fonctions trigonométriques,

- Fonctions logarithmiques,
- Racine carrée,
- Moyenne,
- Couverture (couvrir une carte des cellules non nulles d'une autre carte),
- Combinaison booléenne,
- Détermination des limites maximales et minimales,
- Extraction ou isolation,
- Détermination de la fréquence de distribution,

Opérations zonales

- reclassification ou renomination des unités de la légende
- détermination de la surface, périmètre, longueur,
- reclassification des régions en se basant sur la surface,
- superposition et intersection de deux réseaux de polygones,
- recherche booléenne sur les zones,
- classification des zones en basant sur l'inclusion.

Opérations de voisinages

- détermination des sites en se basant sur la distance ou intervalle de valeurs d'une cible donnée,
- utilisation des fonctions de surface continue (pente, orientation et exposition de la pente, profil),
- utilisation des fonctions qui génèrent une surface continue à partir des données point (interpolation),
- formation des courbes de niveau,
- interpolation,
- utilisation des fonctions sur des surfaces continues ou détermination du plus court chemin,
- détermination des zones en se basant sur un point connu.

III.9 Les principaux SIG les plus utilisés dans le domaine de l'hydrogéologie

III.9.1 Logiciel MapInfo :

C'est un SIG du type vecteur développé par Mapping Information System Corporation, New York, Etat Unis. plusieurs Modules de MapInfo :

- **MapInfo Professional 7** est un outil de type Système d'Information Géographique qui sert à créer de l'information géographique, à traiter de l'information et à la cartographier.
- **Vertical Mapper 3.0 (Vertical Mapper™)** est un outil de création et d'exploitation de l'Information Géographique sous forme de grilles (Grid) assez puissant (MNT, exploitation d'images raster en reli. 3. **ChronoMap® 2.1** et **ChronoVia®** (800 Euros) : logiciels de la société française Magellan Ingénierie - qui sont conçus pour le calcul d'itinéraires, l'optimisation de tournées et la recherche de proximité (isochrones).et...).
- **MapBasic®** est le langage de programmation qui permet de personnaliser une application MapInfo.
- **MapInfo MapX™ 4.5** est l'ActiveX cartographique des développeurs d'applications MapInfo
- **MapXtreme Java Edition** pour Internet, est une solution cartographique " 100% Pure Java™ ".

III.9.2 Logiciel ArcView

C'est un SIG mixte (vecteur et raster), développé par ESRI (Environnement Systems Research Institute), New York. Etat Unis.

ArcView est à la fois un outil exceptionnel de cartographie thématique et un logiciel performant permettant la création, la mise à jour des données géographiques et leur analyse approfondie. Les principales fonctionnalités de ArcView

- interface utilisateur très ergonomique ;
- fonction annuler/rétablir permanente ;
- intégrer diagrammes, cartes, table et graphiques ;
- lecture directe et intégrée des données vectorielles et raster ;
- mise à jour dynamique des données avec règles de comportement ;
- capacité d'analyse exceptionnelle ;
- environnement d'édition robuste ;
- liens multimédia avec toutes sortes de fichiers ;
- intégration des données images, CAD/DAO, cartes, tables et bases données SQL (Oracle SysBase, Informix, Ingres, SQL, Server) ;
- architecture modulaire et évolutive ;

- environnement de développement complet ;
- aide en ligne simple et complète;
- aide en ligne simple et complète ;
- extension ArcView Network Analyst pour la gestion des parcours ;
- extension ArcView Spatial Analyst pour des analyses raster/vecteur approfondies ;
- extension ArcView 3D Analyst ;
- extension Internet Map Server pour la publication des cartes sur le Web ou en intranet ;
- extension 3D Analyst pour la représentation et animation des données en 3 dimensions ;
- extension ArcPress pour l'impression des fichiers volumineux ;
- extension ArabView pour l'élaboration de cartes en Arabe.

Les principales extensions d'ArcView

- **Spatial Analyst** Ce module permet :

- ✓ Créer, d'analyser, interroger des données maillées dans un environnement simple et convivial.
- ✓ De générer de nouvelles informations à partir des données existantes.
- ✓ De convertir les données vecteur en raster, d'analyser des surfaces.
- ✓ D'analyser plusieurs grilles de données en même temps et d'établir leurs histogrammes.

- **Image Analyst**

Ce module permet de réaliser des opérations fondamentales (affichage, amélioration, analyse et classification) dans le domaine du traitement d'images en télédétection.

- **Tracking Analyst**

Ce module est destiné aux applications prenant en compte à la fois les critères d'espace et de temps. Il permet aussi de recevoir, de visualiser, de stocker et d'analyser des données temporelles en temps réel, comme c'est le cas pour les données GPS par exemple .

- **3D Analyst**

C'est un module d'ARC/INFO qui a été intégré dans l'environnement ArcView. Il permet de :

- faire une visualisation dynamique et interactive des données géographiques en trois dimensions ;
- faire tourner interactive ment une vue 3D, de « zoomer »dessus, de changer la position de l'observateur et de sa cible et enfin d'identifier les entités géographiques en 3D ;
- calculer les courbatures, la ligne de plus grande pente... ;
- créer des documents cartographiques en 3D.

Chapitre IV

*Evaluation de la vulnérabilité des eaux
souterraines a la contamination*

IV .Matériel et méthode

IV .1.Introduction

Pour réaliser l'objectif cité précédemment, une méthodologie permettant d'évaluer la Vulnérabilité, à partir d'un ensemble d'informations (piézométrie, géologie et coupe hydrogéologique) et de leur traitement numérique, a été employée. Cette méthodologie est présentée sur ce chapitre.

Dans le but de déterminer la vulnérabilité de la nappe d'el mahmel, on a utilisé la Méthode GOD, associé avec un Système d'Information géographique (SIG). Ces outils informatiques et leur couplage rendront plus accessible l'application de la législation touchant la protection des eaux souterraines, permettront d'évaluer les risques de contamination des eaux de façon fiable et facile, d'établir par la suite des périmètres de protection requis et de gérer les usages des ressources.

IV-2 .1.Présentation de la méthode GOD

La méthode GOD est une méthode de systèmes paramétriques développée par Foster en Angleterre en 1987. Elle présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas la migration latérale des polluants dans la zone saturée (Mardhel et al. 2005). Elle permet de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité (Murat et al. 2003). Elle repose sur trois critères :

- type de nappe (**G**roundwater occurrence)
- type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (**O**verall aquifer class)
- profondeur de la nappe (**D**epth to groundwater table).

La détermination de (Indice GOD) est obtenue par la multiplication de ces trois paramètres, selon l'équation si dessous, où C est la cote affectée au paramètre:

$$I_{GOD} = C_g * C_o * C_d$$

Après le calcul de l'indice, on détermine les classes de vulnérabilité correspondant aux intervalles d'indices obtenus. Généralement, ces indices sont répartis en cinq classes de vulnérabilité allant de « très faible » à « très forte »

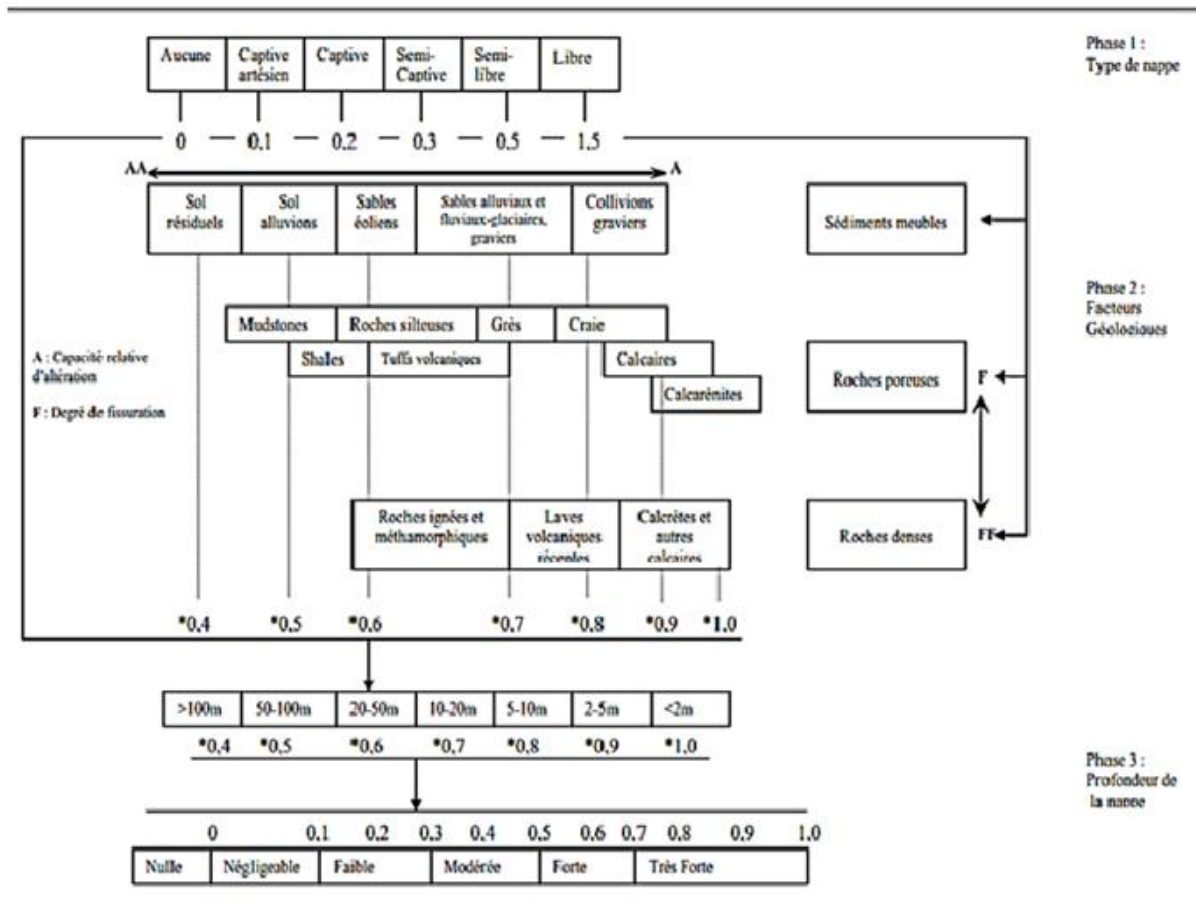


Fig. (22) système empirique GOD : pour estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.

IV.2 .2.Acquisition des données et mode de traitement

Les données utilisées dans ces études sont acquises de plusieurs sources. Le tableau... Si dessous expose la description de chaque paramètre GOD, la source d'acquisition de données et leur mode de traitement.

Facteur	Description	Source des données	Mode de traitement
Type de nappe (G).	La vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution dépend du type de nappe, libre ou captive, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère.	Carte Géologique et log des forages.	Digitalisation

<p>Lithologie et perméabilité de la ZNS de l'aquifère (O).</p>	<p>La circulation et la propagation d'un contaminant dans la zone saturée dépendent aussi de la texture et la distribution lithologique des couches de l'aquifère. Cela est toujours contrôlé par la granulométrie, la porosité, la perméabilité et la lithologie des formations géologiques ,Cette dernière est obtenue par corrélation et extrapolation des données de logs stratigraphiques de forages et de piézomètres fournies par l'ANRH et la DHW.</p>	<p>Colone lithostragraphique des forage</p>	<p>Interpolation (krigeage)</p>
<p>Profondeur de la nappe (D).</p>	<p>La profondeur de la nappe représente la distance verticale traversée par un polluant depuis la surface du sol pour atteindre l'aquifère. Généralement, la protection potentielle de l'aquifère augmente avec la profondeur de la surface supérieure de l'eau.</p>	<p>Carte piézométrique de la zone d'étude.</p>	<p>Interpolation (Krigeage).</p>

II.2.3. Préparation des données :

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe d'El Mahmel à été réalisés par la méthode GOD à l'aide du logiciel ArcGis version 10.1 et l'extension Spatial Analyst. Le logiciel ArcGis permet l'intégration et la répartition spatiale des scores poids, attribués aux trois paramètres de la méthode GOD et leur représentation sous le format raster. Avec l'extension Conversion Tools dans ArcToolBox les shapefiles ont été convertis en raster (Fig. 23).

Chaque raster représente la variation spatiale des poids. Le calcul des indices de vulnérabilité selon la méthode GOD se fait directement par la multiplication des trois raster à l'aide de « l'outil Raster calculator » dans spatial analyst tools (Fig. 24). Le résultat de ce calcul est l'élaboration d'une nouvelle couche d'information qui représente la variation de l'indice de vulnérabilité dans la zone d'étude.

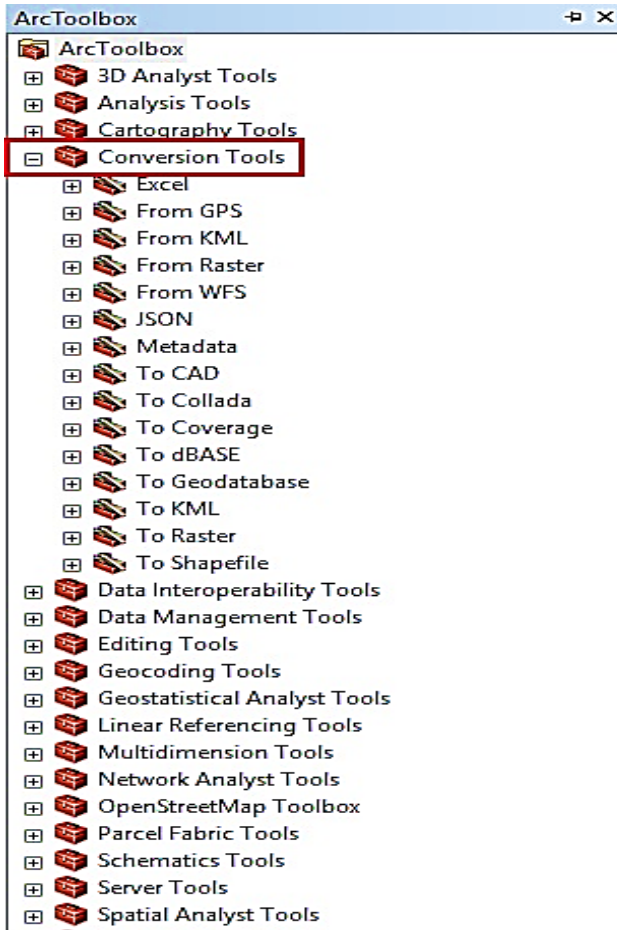


Fig. (23). Outils de conversion des shapfile en raster

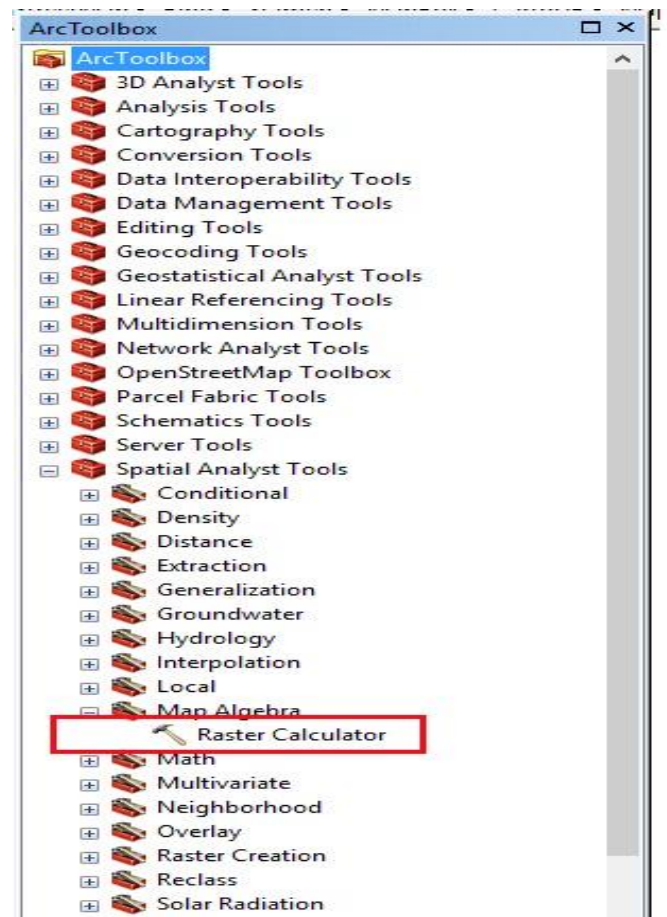


Fig. (24). Outils de calcul de l'indice GOD

Les étapes de l'élaboration de la carte de vulnérabilité sont les suivantes :

- Collecte des données.
- Numérisation et interpolation des données.
- Attribution des scores.
- Classification, et reclassification des trois paramètres spécifiques de la nappe.
- Élaboration de la carte pour chaque paramètre spécifique de la nappe en mode Raster.
- Calcul de l'indice de vulnérabilité global par la multiplication des trois cartes Raster des paramètres spécifiques de la vulnérabilité de la nappe.
- Classification et de la carte vulnérabilité finale selon la méthode GOD.

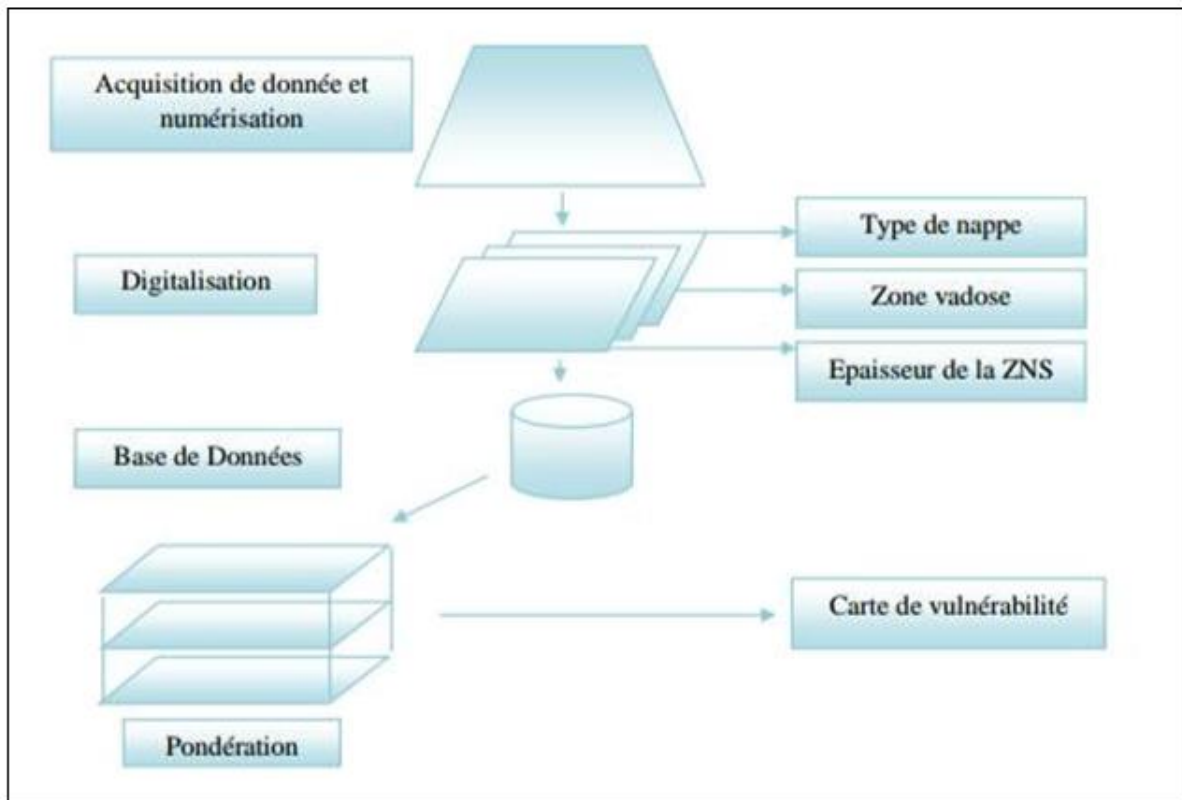


Fig. (25): méthode utilisé pour la réalisation de la carte de vulnérabilité

IV.3. Résultat et discussion

IV.3.1. Paramètre de type de nappe (Groundwater occurrence) « G »

L'évaluation de ce paramètre a été faite à partir de l'interprétation des coupes de forages et la carte géologique de la région. Ces valeurs ont été classées selon les fourchettes proposées par la méthode GOD pour ce paramètre.

On a deux classes principales pour ce critère : Fig. (26)

- La nappe est en régime libre qui occupe 91,22% sur l'ensemble de la zone d'étude. (Un poids de 0,9 a été attribué)
- Au centre et sud-ouest la nappe semi-captive et captive qui représente 8,08% de totalité de la zone d'étude. (un poids de 0,6 et 0,2 est attribuées respectivement)

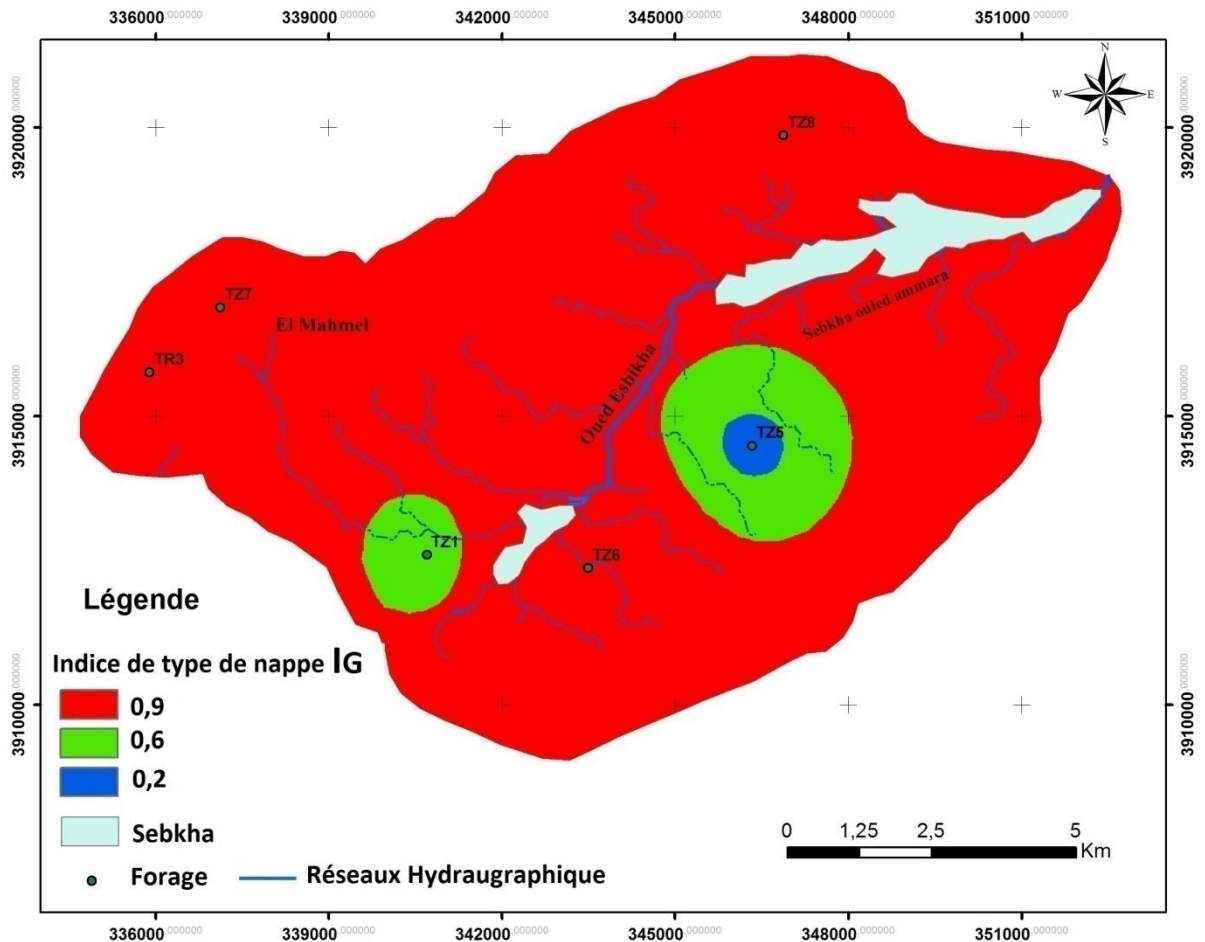


Fig. (26): carte type de nappe (critère G)

IV.3.2.Paramètre type d’aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer classe) Fig. (27)

La description du matériel constituant la zone non saturée de l’aquifère de El Mahmel a été réalisée sur une base descriptive des coupes de forages qui captent cet aquifère. Ensuite une interpolation des données a été faite par Krigeage après codification.

Trois types de matériaux qui constituent la zone non saturée :

- Au sud et sud-ouest la zone non saturée est essentiellement argileux qui occupe la grande partie 64,66% de la zone d’étude. (Un poids de 0,4 a été attribué).
- Au centre de la zone d’étude la zone non saturée est essentiellement calcaireux argileux qui occupe 22,27% de la surface totale. (Un poids de 0,5 est attribué)

- Au nord la zone non saturée est constituée par des graviers et débris de calcaire qui occupe 13,06% a totalité de la zone d'étude. (Un poids de 0,8 est attribué)

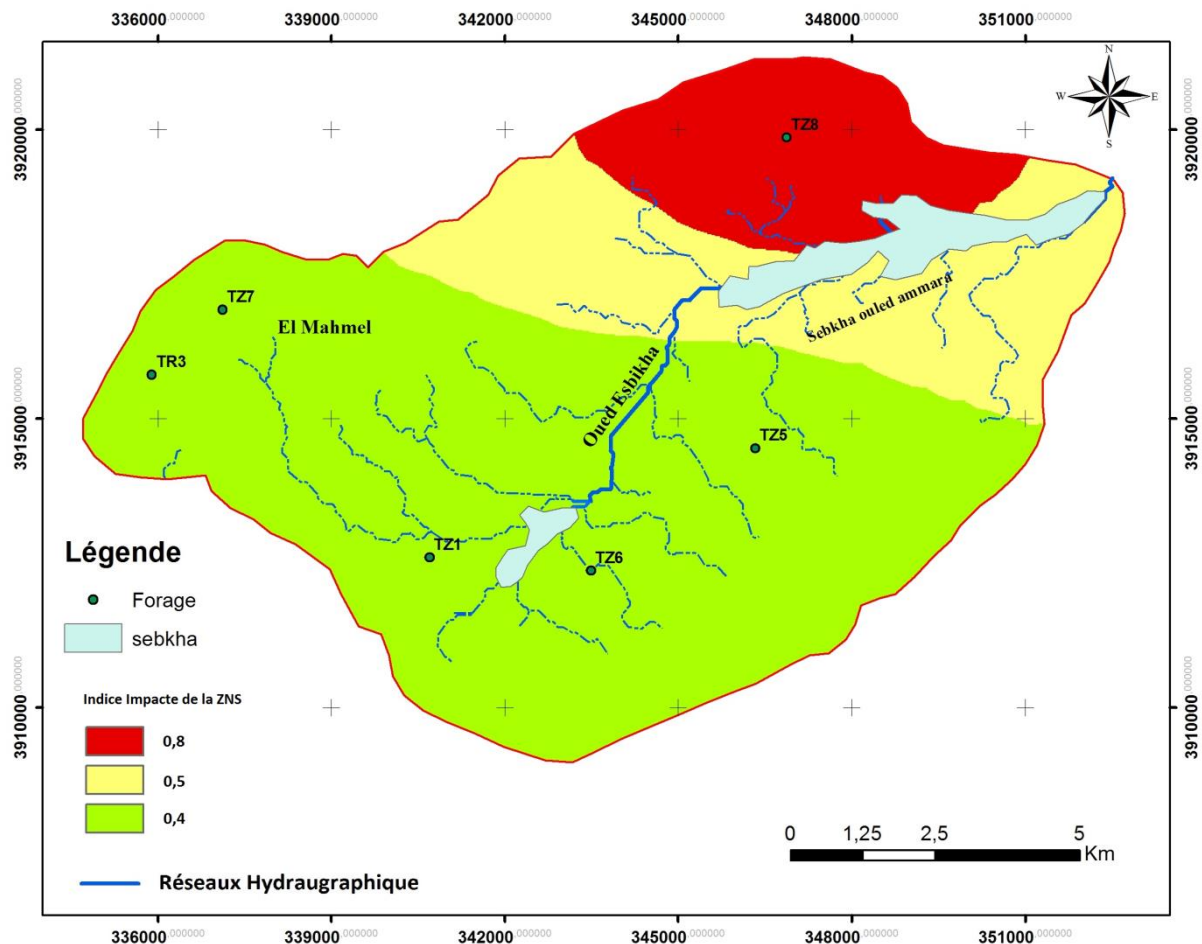


Fig. (27): carte impacte de la zone vadose critère « O ».

IV.3.3. Paramètre « profondeur a la nappe » D. Fig. (28)

Dans la zone d'étude les valeurs de profondeurs des eaux souterraines relevées au niveau des forages sont comprises entre 5 et 30 mètre. La carte de profondeur Fig. (28) à été générée par interpolation par krigeage inclus dans 3D Analyst tools du logiciel ArcGis 10.1, ensuite reclassifier selon la méthodologie proposée par le modèle GOD.

La carte des profondeurs de la nappe (figure 28) montre trois classes,

- Classe 1 profondeur (< 5m) au centre, et le sud-est de la zone d'étude. Elle représente 26,56% de la superficie totale. (Un poids de 0,9 a été attribué)

- Classe 2 profondeur compris entre 5m-15m (en vert) qui occupe 52,01% de la zone d'étude. (Un poids de 0,6 est attribuée).
- Classe 3 la classe de forte profondeur > 15 m au Nord de la zone d'étude représente 21,42%. (Un poids de 0,2 est attribuée).

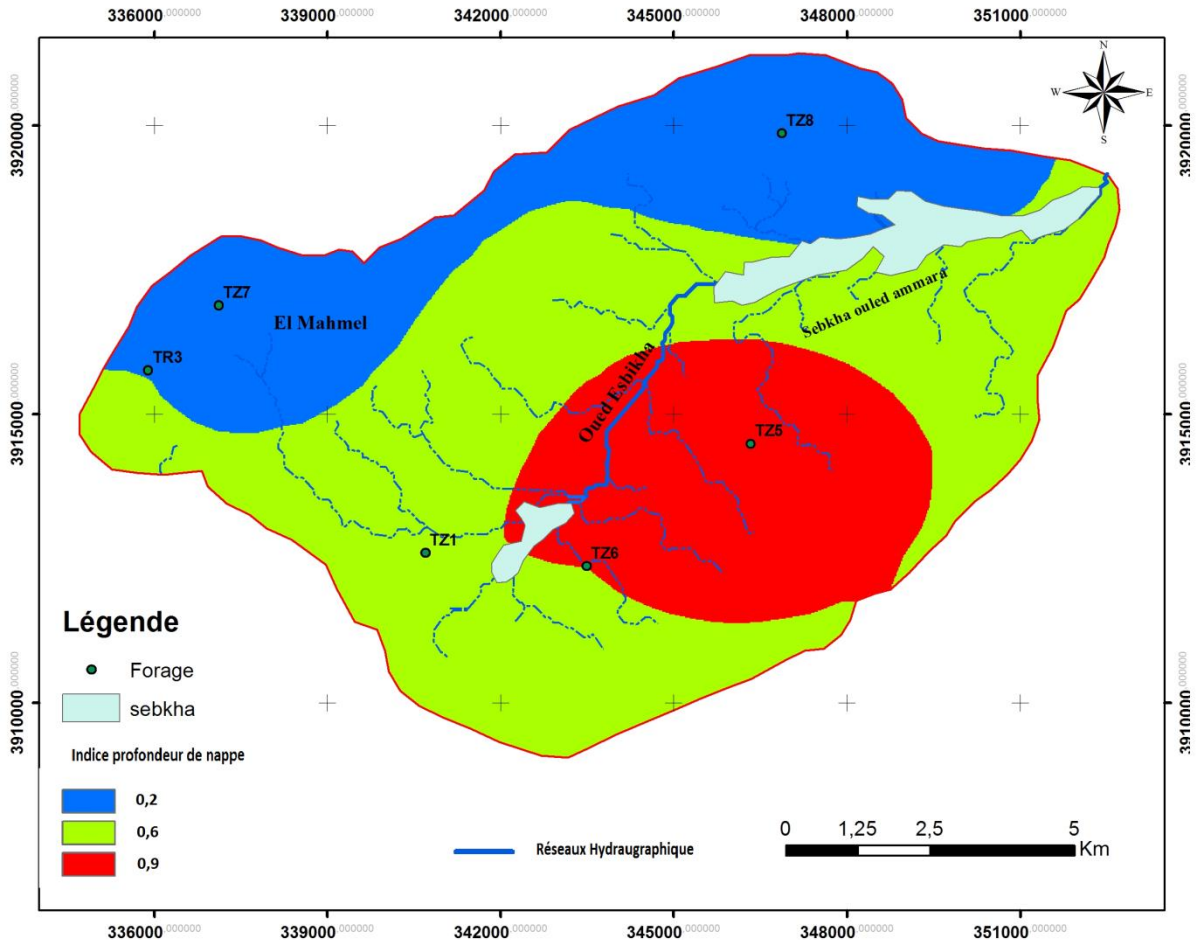


Fig. (28): carte profondeur de la nappe critère « D »

IV.3.4. Cartographie de la vulnérabilité a la pollution de la nappe d'el mahmel (Fig30)

L'indice de vulnérabilité Igod relatif a la méthode GOD est calculé par la multiplication de trois cartes d'indices G, O et D.

$$I_{god} = C_G * C_o * C_D$$

Tableau 12. Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode

Intervalle	Classe GOD
0-0,1	Vulnérabilité très faible
0,1-0,3	Vulnérabilité faible
0,3-0,5	Vulnérabilité modérée
0,5-0,7	Vulnérabilité forte
0,7-1	Vulnérabilité extrême

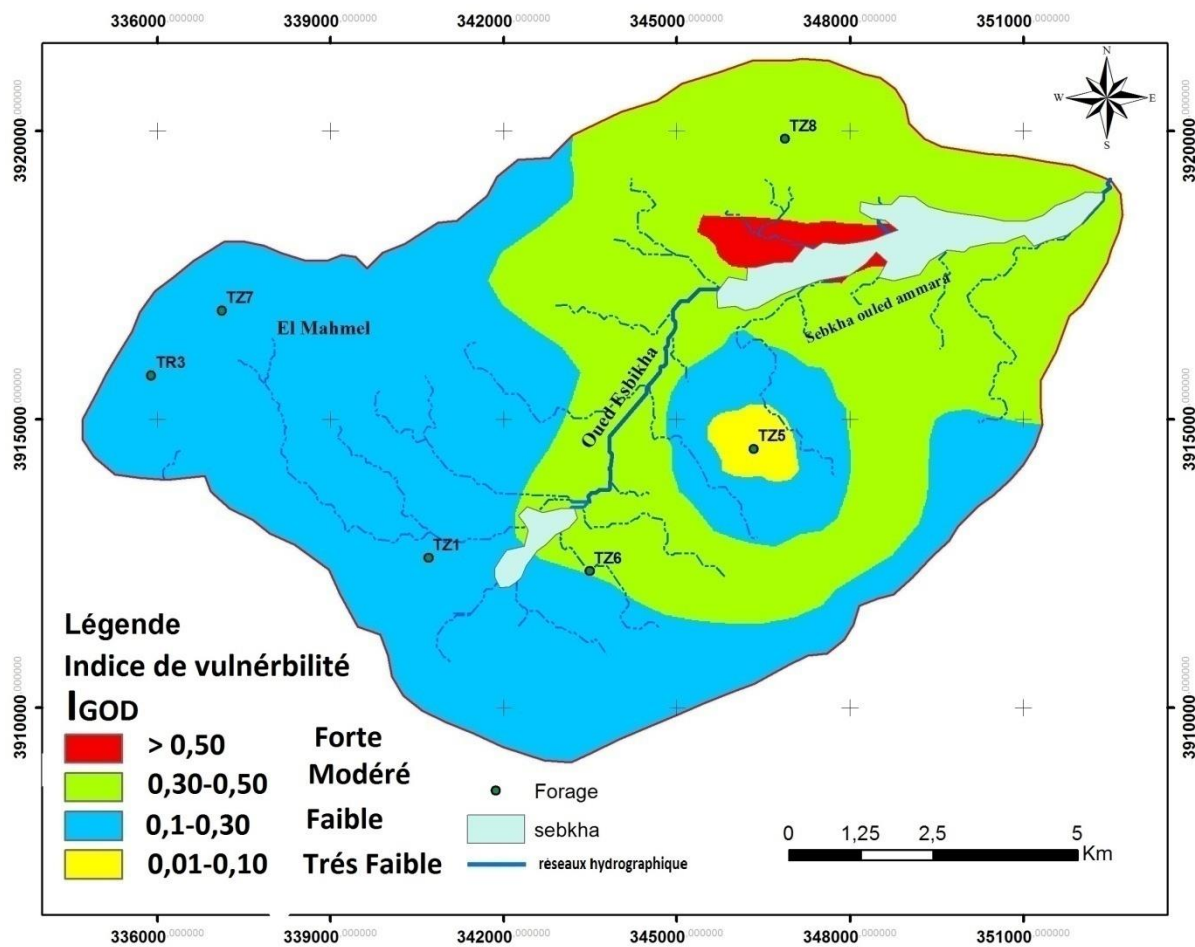


Fig. (29): carte de l'indice de vulnérabilité GOD

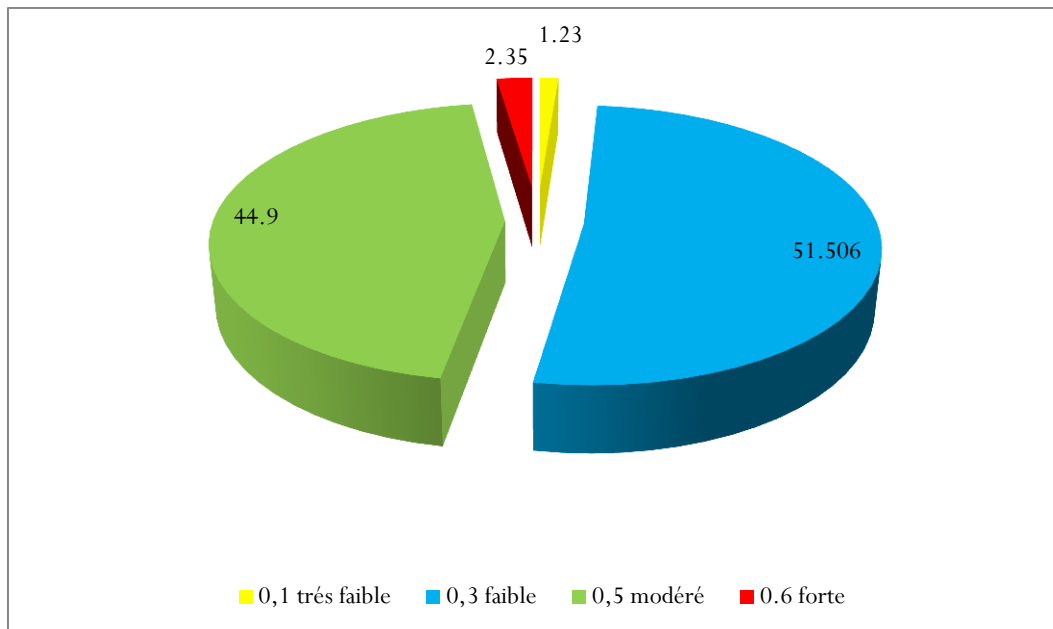


Fig. (30): Répartition d'indice de vulnérabilité GOD du secteur d'étude.

L'analyse de la carte de vulnérabilité obtenue révèle la présence de 4 class d'indice qui sont : Très faible –faible - modérée -forte.

- Classe de vulnérabilité « très faible » : représente 1,23% de la zone d'étude et se localise aux alentours du forage TZ5. Cette vulnérabilité très faible malgré la profondeur de la nappe proche du sol. Cela due à la nature lithologique de la zone non saturée entièrement argileuse.
- Classe de vulnérabilité « faible » : représente 51,5 % de la zone d'étude (en bleu) qui couvre le sud-ouest y compris l'agglomération d'El Mahmel, ce qui représente un avantage pour la nappe.
- Classe de vulnérabilité « Modéré », occupe 44,9% de la zone d'étude Cette classe se localise aux zones agricoles au Nord, au et Nord-est de la zone d'étude. Cette portion de vulnérabilité modéré ce coïncide avec la nature de l'aquifère libre
- Classe de vulnérabilité « Forte », occupe une portion de 2,35 % de la zone d'étude, et qui coïncide avec Sebkhata ouled Ammara au nord de la zone d'étude. La zone non saturée est principalement de lithologie graveleuse et la nappe est entièrement en régime libre ce qui favorise la forte vulnérabilité.

IV.4. Conclusion

Les différents points abordés le long de ce chapitre ont fait état de la vulnérabilité à pollution de la nappe d'el mahmel. L'approche utilisé a permis de déterminer et classier les zones de vulnérabilité, qui montrent, deux classes majeurs ,classe de vulnérabilité faible qui a représenté 51,5 (%) et classe de vulnérabilité modéré qui représenté 44,9 (%).Des mesures doivent être prises pour le mettre à l'abri de la contamination par des polluants qui pourront exister à la surface de la zone. Ces cartes de vulnérabilité ont ainsi vocation à devenir un véritable outil d'aide à la gestion et à la surveillance de la ressource en eau souterraines.

Conclusion Général

Conclusion générale :

Le synclinal de el mahmel se représente comme une vaste ouverte d'une superficie de 363km², elle est située dans la partie steppique au sud de kenchela, fait partie des hauts plateaux constantinois elle est limitée au nord-ouest par les djebels aidel, feaou, chenntgouna et djahfa, au sud-est, elle est limitée par koudiat sguigine et tadelist.

Le couplage entre l'étude géophysique (ENAGEO 1988) et la géologie fait apparaître des terrains du Quaternaire, constituée par des dépôts sableux, limoneux et des graviers avec de gros galets d'une épaisseur de 70 m environ et du crétacé formé par une alternance de marne et de calcaire de maestrichien. Sur le plan hydrogéologique en a la superposition de deux nappes : - quaternaire formé par des dépôts sableux limoneux, avec des galets et une nappe de maestrichien formé par des calcaires qui représente la nappe locale.

Sur le plan hydroclimatologique, la région d'étude se trouve dans une zone à climat semi-aride, les précipitations sont caractérisées par irrégularité avec une moyenne annuelle de 492 ; 57 mm, la température moyenne est de l'ordre de 15,52°C et l'évapotranspiration réelle est de 484,9 mm soit 80% des précipitations moyennes annuelles.

La vulnérabilité intrinsèque à la pollution de la (el mahmel) nappe et l'objet de cette étude a été estimée par un modèle couplé aux SIG est GOD.

La méthode GOD utilise pour présenter la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale des polluants à travers la zone non saturée, les trois paramètres ayant trait au type d'aquifère, la lithologie de la zone non saturée et la profondeur de la nappe.

L'étude de la vulnérabilité de la nappe alluviale à la pollution a permis l'établissement d'une carte de vulnérabilité. Cette dernière a mis en évidence quatre zones à différents degrés de Vulnérabilité :

- La zone de vulnérabilité « très faible » : représente 1,23% de la zone d'étude et se localise aux alentours du forage TZ5. Cette vulnérabilité très faible malgré la profondeur de la nappe proche du sol. Cela due à la nature lithologique de la zone non saturée entièrement argileuse.
- Classe de vulnérabilité « faible » : représente 51,5 % de la zone d'étude (en bleu) qui couvre le sud-ouest y compris l'agglomération d'el mahmel, ce qui représente un avantage pour la nappe.

Conclusion Général

- Classe de vulnérabilité « Modéré », occupe 44,9% de la zone d'étude Cette classe se localise aux zones agricoles au Nord, au et Nord-est de la zone d'étude. Cette portion de vulnérabilité modéré ce coïncide avec la nature de l'aquifère libre
- Classe de vulnérabilité « Forte », occupe une portion de 2,35 % de la zone d'étude, et qui coïncide avec Sebkhata ouled Ammara au nord de la zone d'étude. La zone non saturée est principalement de lithologie graveleuse et la nappe est entièrement en régime libre ce qui favorise la forte vulnérabilité

Recommandations :

Dans une zone semi-aride telle que la région d'El mahmel, l'eau souterraine représente leur principale ressource très sensible. Nous proposons les perspectives suivantes pour compléter le travail démarré dans cette étude :

- La carte de vulnérabilité ne doit pas être interprétée comme le reflet d'une vulnérabilité absolue mais comme une hiérarchie entre les hydro systèmes, qui permet de cibler les zones prioritaires en matière de protection de la ressource.
- Parallèlement à cette cartographie complémentaire (éventuellement dans le cadre d'un prochain stage universitaire), des études hydrogéologiques hydrodynamiques pourraient venir compléter le champ de connaissances nécessaires à ces études de vulnérabilité.
- L'installation d'un réseau de piézomètre pour contrôler la fluctuation de la nappe
- Convaincre les responsables des services de l'environnement d'instaurer dans la conception des captages d'eau la notion des périmètres de protectio

Références bibliographiques

- **Albinet, M. et Margat, J. 1970.** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Bulletin du BRGM (deuxième série), section m, No 4, p 13-22.
- **Aller, L., T., Bennet J. H., Lehr R. J, Petty and G. Hackett., 1987:** DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, EPA/600/2-87-036, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Washington, D.C. of sewer exfiltration. Water Science & Technology 47(4): 61-67
- **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).
- **Amharref M. Bernoussi A, 2007.** Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines. Actes JSIRAUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007. Publications AUF.10 p.
- **Aubre, François., 1992 :** Développement d'une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. Mémoire de maîtrise (M.Sc.), École des gradués, Université Laval, 248p
- **Babiker I.S., Mohamed M.A.A., Hiyama T., Kato, K.2004.** Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system. Environment International 29 (2004). P.1009-1017.
- **Bézèlques S. et des Garets E. avec la collaboration de Mardhel V. et Dörfliger N. 2002.** Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe). Phase 1 - Définition de la méthode de détermination de la vulnérabilité. Rapport BRGM-51783-FR, 44p.
- **Castany G., 1982.** Principes et Méthodes de l'Hydrogéologie, Dunod, 236 p. ISBN 2-10-004171-71.

Références bibliographiques

- **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.
- **Chachadi A.G. & Lobo-Ferreira, J.P., 2001:** Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. Proc. Workshop on modelling in hydrogeology, Anna University, Chennai, pp.143-156, and in COASTIN A Coastal Policy Research Newsletter,
- **Civita M., 1994.** La carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento : Teoria e pratica. Pitagora Editrice, Bologna, 325 p Number 4, March 2001. New Delhi, TERI, pp. 7-9, (cf. <http://www.teriin.org/teri-wr/coastin/newslett/coastin4.pdf>).
- **Civita, M. and DE Maio., 1997 :** SINTACS. Un Sistema Parametrico per la Valutazione e la Cartografia della vulnerabilità Degli Acquiferi All'inquinamento. Metodologia & Automatizzazione. Pitagora Editrice Bologna. pp 191.
- **CRETINON, (1994):** Définition des principaux paramètres utilisés en hygrométrie, Bulletin du Bureau National de Métrologie, 25 (98), 3-6 (1994).
- **De Martonne E., 1926.** - Une nouvelle fonction climatologie : l'indice d'aridité, la météo 449-459 p.
- **Djebaili S. 1984.** - Steppe algérienne .phytosociologie et écologie O.P.U. Alger. 127p
- **Doerfliger, N., P.-Y. Jeannin, and F. Zwahlehn., 1999:** Water vulnerability assessment in karst environments: A new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method), Environ. Geol., 39(2), 165–176.
- **Ellis, J.B., Revitt, D.M., Lister, P., Willgress, C and Buckley, A. (2003).** Experimental studies of sewer exfiltration. Wat.Science & Tech., 47(4), 61-67.
- **Emberger L. 1930.** - La végétation de la région Méditerranéenne. Essai d'une classification des groupements végétaux. Rev. Géol. Bot., 42. Pp: 341-404.
- **Emberger L. 1955.** – Une classification biogéographique des climats. Recueil. Trav. Lab. Géol. Zool. Fac. Sci. Montpellier. Pp : 3-43. endémisme, Ecologia méditerranéa, 21 (1-2). Pp: 19-39.
- **ENAGEO 1988 :** document interne. étude géophysique dans le synclinal d'El mahmal. 11p

Références bibliographiques

- **Epting J., Huggenberger P. ET Rauber M.** (2008 (1)). Integrated methods and scenario
- **Eiswirth M. G. ET Hötzl H.**, Eds. (2005). AISUWRS Work-package 8: Leakage Rates
- **Foster S.S.D., 1987.** Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of soil and Groundwater to pollutants. RIVM.TNO Committee on Hydrological Research, p. 69-86.
- **Graillat A., Bouchet C., Durand F., Paulin Ch., Petit V., Picquet I. et Sedan O.** 1994. Carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe de la Grande-Terre. Coupure IGN 4603 G de Pointe-à-Pitre échelle 1/25 000 – Rapport BRGM R 37-896 ANT 4S-94 C 420-00802
- **GAAGAI. , (2009) :** Etude hydrologique et hydrochimique du Bassin versant du Barrage de Babar sur Oued El Arabe région Est de l'Algérie. Mémoire Magister, université de Batna Faculté des sciences de l'Ingénieurs, Département d'Hydraulique. **130 p**
- **Gogu R. et A. Dassargue S. 1998.** A short review on groundwater vulnerability assessment. Basic statements for use in the framework of the cost 620 action. Workshop: Vulnérabilité et protection des eaux karstiques, 18-20 mai, Université de Neuchâtel, Suisse, p. 1-19.
- **GUYOTE G (1999),** Climatologie de l'environnement, cours et exercices corrigés, Ed DUNOD, paris, p 325
- **Gogu, R. C., and A. Dassargues., 2000:** Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overly and index methods, Environ. Geol., 39(6), 549–559
- **Hamza M.H., Added A., Francésb A., Rodríguez R.,** Validity of the vulnerability methods DRASTIC, SINTACS and SI applied to the study of nitrate pollution in the phreatic aquifer of Metline–Ras Jebel–Raf Raf (northeastern Tunisia); Geosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie); Volume 339, Issue 7, June 2007, Pages 493–505.
- **Hölting B., Haertle, T., Hohberger, K.-H., Nachtigall, K.H., Villinger E., Weinzierl, E., Wrobel, J.-P., 1995:** Konzept zur Ermittlung der Gesamtschutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. – Geol.Jb C63: 5-24

Références bibliographiques

- **Lallemand-Barres A. & Roux J-C., 1989.** Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. BRGM manuels et Méthode n° 19.
- **Lallemand-Barres A. (1994).** Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Etude documentaire préliminaire. R37928. BRGM. P. 1-17.
- **Landreau A., 1996,** Contribution à une normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions des eaux souterraines, Rapport BRGM R38846. 28 p.
- **Liggett, J. E., and S. Talwar., 2009:** Groundwater vulnerability and integrated water resource management, Streamline Watershed Management Bull., 13(1), 29.
- **Magiera, P., 2000:** Methoden zur Abschätzung der Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers. Grundwasser, 3, 103-114
- **Mardhel V, Pinson S, Gravier A, 2005.** Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais. BRGM/RP – 54238-FR. : BRGM. <http://www.nord-pas-de-calais.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/BRGM-RP-54238-FR.pdf>
- **Margat J. 1968.** Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine a la pollution. Base de la cartographie, Doc. BRGM, 68 SGL 198 HYD. Orléans, France
- **Margat, J. 1991.** La vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions, conception - estimation -Cartographie. Institut Européen de l'eau, 9 p.
- **Martinez-Bastida, J.J., Arauzp, M., Valladolid, M., 2010:** Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. Hydrogeology Journal; 18: 681-698
- **Morgan M & Alexis G 2013 :** État des lieux du secteur de l'eau en Algérie. Etude et analyse IPEMED. http://www.ipemed.coop/adminIpemed/media/fich_article/1384435889_Etat%20des%20lieux%20du%20secteur%20de%20l%27eau%20en%20Alg%C3%A9rie%20oct2013.pdf (Consulté le 21/05/ 2017)
- **MURAT, V., 2000 :** Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution, application aux aquifères de piémont Laurentien. Mémoire de maîtrise université de Québec INRS – Géo ressources, Québec 127p.

- **Murat, V., Martel, R., Michaud, Y., Therrien, R., 2000b** (version préliminaire). Guide D'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. Rapport présenté au ministère de l'Environnement du Québec, Service des pesticides et des eaux souterraines.
- **Murat V, Paradis D, Savard MM, Nastev M, Bourque E, Hamel A, et al., 2003.** Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. Ressources naturelles, Canada. Québec : Commission géologique du Canada. <http://dsp-psd.pwgsc.gc.ca/Collection/GSC-CGC/M44-2003/Articles/d03.pdf>.
- **Neukum, Christoph, Azzam, Rafiq., 2009:** Quantitative assessment of intrinsic groundwater vulnerability to contamination using numerical simulations, in: The science of the total environment 408.2, S. 245-254, doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.09.046
- **Olmer, M., and B. Rezac., 1974:** Methodical principles of maps for protection of ground water in Bohemia and Moravia scale 1:200000, Mem. I.A.H. 10, 1, pp. 105–107.
- **Petelet-Giraud E., Doerfliger N. Crochet P., 2000:** RISKE: multicriteria assesment of karstic aquifer vulnerability mapping. Application to the Fontanilles and Cent-Fonts karstic aquifers (Herault, S.France). Hydrogéologie 4, pp 71-88.
- **Pochon A., Tripet J.-P., Kozel R., Meylan B., Sinreich M. et Zwahlen F. (2008).** Groundwater protection in fractured media: a vulnerability-based approach for delineating system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Ada, Oklahoma, USA.
- **Pochon, A., J.P. Tripet, R. Kozel, B. Meylan, M. Sinreich, and F. Zwahlen., 2008:** Groundwater protection in fractured media: A vulnerability-based approach for delineating protection zones in Switzerland. Hydrogeology Journal 16, no. 7: 1267–81.
- **protection strategy – Vulnerability** of soil and groundwater to pollutants, RIVM, TNO
Souterraines au Québec. Mémoire de maîtrise, École des Gradués Université Laval, Faculté

Via GRID function._32 p.

<http://www.esri.com/lbase/commonluserconf/proc97/PROC97IT0600/PAP5911P591.HTM>

- **RAMADE F (2003)**, Eléments d'écologie, Ecologie fondamentale, Ed DUNOD, paris, p690
- **Ramos-Leal JA, Rodriguez-Castillo R., 2003:** Aquifer vulnerability mapping in the Turbio river valley, Mexico, a validation study. *GeofInt* 42:141–156
- **Ribeiro L., 2000 :** Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação, Nota interna, (não publicada), ER-SHA-CVRM, 8 p
- **Robins, N.S., Adams, B., Foster, S.S.D., Palmer, R.C., 1994.** Groundwater vulnerability mapping: the British perspective. *Hydrogeologie* 3, p. 35–42
- **.Rutsch M., Rieckermann J., Cullmann J., Ellis J. B., Vollertsen J. et Krebs P.** (2008). Towards a better understanding of sewer exfiltration. *Water Research* 42(10-11): 2385.
- **Schnebelen N., Platel J.P., Lenindre Y., Baudry D., Hoarau A., Dufour P. et Benhammouda S. 2002.** Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise – Rapport BRGM/RP-51178-FR. 75p.
- **Sotornikova, R., and J. Vrba., 1987:** Some remarks on the concept of vulnerability maps, *Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundwater to Pollutants, RIVM Proc. and Inf.* 38, pp. 471-475.
- **Stewart P. 1969** - Quotient pluviométrique et dégradation biosphérique. *Bull. Soc. Hist. Nat. Nord* .59 . 23-36
- **Thorntwait CW.(1948):**An approche toward a rational classification of climate. *geographical Review*, pp 55-94
Committee on Hydrogeological Research, pp. 69-86.

Commissioned Report 11/2005. CSIRO & AGK.

International Contributions to Hydrogeology, vol. 16. Heinz Heise GmbH. Hannover
- **Van Stempvoort, D., Ewert, L. and Wassenaar, L., 1993:** Aquifer Vulnerability Index (AVI): A GIS Compatible Method for Groundwater Vulnerability Mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18, 25-37.

- **Villumsen, A., Jacobsen, O.S. and Sonderskov, C., 1982:** Mapping the vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution , Geologic Survey of Denmark, Yearbook 1982, Copenhagen.
- **Vrana, M., 1984:** Methodology for construction of groundwater protection maps, Lecture for UNESCO/UNEP Proj. PLCE3/29, Moscow, September 1981, in Hydrogeological Principles of Groundwater Protection, vol. 1, E. A. Kazlovsky Edit. And Chief, pp. 147–149. UNESCO/UNEP, Moscow.
- **Vrba, J., Zaporozec, A., 1994:** Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Int. Association of Hydrogeologists. Int. Contributions to Hydrogeology; 16. Verlag Heinz Heise, Hannover.
- **Wolf L., DeSilva D., Klinger J., Moglia M., Held I., Burn S., Sadler P., Tjadraatmatdja**
Development for urban groundwater management and protection during tunnel road construction: a case study of urban hydrogeology in the city of Basel Switzerland.vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental Geology 39(6): 549-
- **YOUNSSI H.E (2009)**, Epuisement de la nappe aquifère de la région de F'kirina (W. Oum El Bouaghi) ; et ces répercussions sur la gestion des ressources en eau, Mémoire magister, Inst Géologie, Annaba ,124p
- **Zwahlen, F. (Ed.), 2004:** Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report COST Action 620, European Commission, Directorate- General for Research, EUR 20912, Luxemburg

Résumé

Les cartes de vulnérabilité des aquifères sont des outils utiles pour contribuer à la protection des ressources hydriques souterraines contre une éventuelle pollution.

Cette étude a pour objectif de déterminer la vulnérabilité intrinsèque de la nappe alluviale d'el mahmel en utilisant le modèle GOD. Les paramètres étudiés sont le Type de nappe (G) type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques(O), profondeur de la nappe (D).

Les résultats obtenues montrent quatre classes de vulnérabilité allant de très faible à fort. 1,23% de la zone d'étude est caractérisée par une vulnérabilité « très faible » et se localise aux alentours du forage TZ5, 51,5 % de la zone d'étude est caractérisée par une vulnérabilité faible, Classe de vulnérabilité modéré occupe 44,9% de la zone d'étude et une classe de vulnérabilité forte occupe 2,35 % de la zone d'étude, et qui coïncide avec Sebkhata ouled Ammara au nord.

Un système d'information géographique a été utilisé pour l'indexation et la superposition des différentes informations et la création de la carte finale de vulnérabilité.

Mots clés : eaux souterraine, vulnérabilité, GOD, SIG, Mahmel

Abstract

Vulnerability maps of aquifers are useful tools for contributing to the protection of groundwater resources against possible pollution.

The purpose of this study is to determine the intrinsic vulnerability of el mahmel alluvial aquifer using the GOD model. The parameters studied are Type of aquifer (G) type of aquifer in terms of lithological factors (O), depth of the aquifer (D).

The results obtained show four vulnerability classes ranging from very low to high. 1.23% of the study area is characterized by "very low" vulnerability and is located around the TZ5 well, 51.5% of the study area is characterized by low vulnerability, Moderate vulnerability class occupies 44,9% of the study area and a high vulnerability class occupies 2.35% of the study area and coincides with Sebkhata ouled Ammara in the north.

A geographic information system was used for indexing and overlying different layer and creating the final vulnerability map.

Keywords: groundwater, vulnerability, GOD, GIS, Mahmel

ANNEXE

Sondages	Coordonnées		Profondeur de la nappe	
	X	Y	PN	POIDS
TZ1	340697,52	3912598,1	6	0,8
TZ5	346332,05	3914490,12	5	0,9
TZ6	343489,12	3912368,09	7	0,8
TZ8	346879,15	3919867,18	30	0,6
TZ7	337115,12	3916888,32	24	0,6
TZ3	335890,02	3915764,49	10	0,7

Sondages	Coordonnées		TYPE DE NAPPE	
	X	Y	TDN	POIDS
TZ1	340697,52	3912598,1	Semi-captive	0,4
TZ5	346332,05	3914490,12	Captive	0,2
TZ6	343489,12	3912368,09	Libre	0,9
TZ8	346879,15	3919867,18	Libre	0,6
TZ7	337115,12	3916888,32	Libre	0,8
TZ3	335890,02	3915764,49	Libre	0,8

Sondages	Coordonnées		Facteurs Lithologiques	
	X	Y	ZNS	POIDS
TZ1	340697,52	3912598,1	Argile	0,4
TZ5	346332,05	3914490,12	Argile	0,4
TZ6	343489,12	3912368,09	Argile gravier	0,5
TZ8	346879,15	3919867,18	Gravier calcaire	0,8
TZ7	337115,12	3916888,32	Calcaire	0,5
TZ3	335890,02	3915764,49	Calcaire	0,5