

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ D'ORAN

FACULTÉ DES SCIENCES DE LA TERRE, DE GÉOGRAPHIE ET
D'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

LABORATOIRE GÉORESSOURCES, ENVIRONNEMENT & RISQUES NATURELS

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de
Magister en Sciences de la terre
Option : Hydrogéologie

Par

Mansour ACHOUR

VULNÉRABILITÉ ET PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES EN ZONE ARIDE : CAS DE LA VALLÉE DU M'ZAB (GHARDAIA – ALGÉRIE)

Soutenu publiquement le : **13 février 2014** devant le Jury composé de :

ZAÏDI - MEBROUK N.	: M.C. (A)	Université d'Oran	: Présidente
MANSOUR H.	: Pr.	Université d'Oran	: Rapporteur
HASSANI M. I.	: Pr.	Université d'Oran	: Co-Rapporteur
HAYANE S. M.	: M.C. (A)	Université d'Oran	: Examineur
SAFA A.	: M.C. (A)	Université d'Oran	: Examineur

Oran, 2014

*Je dédie ce modeste travail
A la mémoire de
mes parents,
A
mon frère
à qui je dois autant*



Il n'est pas dans le
pouvoir de
l'homme de
construire un
arbre, tout ce qu'il
peut faire c'est de
le planter, de
l'entretenir et
d'attendre qu'il se
développe petit à
petit.



REMERCIEMENTS

Au terme de ce long travail de magister, je voudrais adresser une pensée à tous ceux qui m'ont aidé de le mener à bien, que ce soit par un coup de main, un conseil, ou tout simplement leur amitié.

Je tiens à exprimer ici ma plus vive reconnaissance au Professeur Hamidi MANSOUR, le rapporteur de cette thèse, pour sa grande confiance, ses conseils, ses critiques et commentaires qui m'ont permis d'aboutir à mon but, en dépit de ses charges administratives très absorbantes.

Je remercie chaleureusement le Professeur Moulay Idriss HASSANI, mon Co-Rapporteur, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, ses suggestions et commentaires, sans oublier sa rigueur scientifique.

Mes vifs remerciements vont à Mme ZAÏDI-MEBROUK N. Maitre de conférences à l'université d'Oran qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

Que Messieurs, HAYANE S. M., SAFA Aissa, Maitres de conférences à l'université d'Oran, trouvent dans ces mots modestes toute ma reconnaissance et ma gratitude d'avoir accepté de lire et critiquer mon manuscrit et de faire partie des membres du jury, témoignant ainsi de l'intérêt qu'ils portent à ce travail.

Je ne dois oublier de remercier Mr M^{ed}. FOUKRACHE Maitre-assistant à la faculté d'Oran, pour les discussions fructueuses et l'analyse critique qu'il en a faite.

Je remercie également mes collègues du secteur de l'ANRH de Ghardaïa, Bakir SEKOUTI, Abla HADJ BRAHIM, Mme BENGHEZAL, Fouzia KOUADRI, pour leur compréhension, leur soutien discret et constant, en me libérant de maintes obligations mineures.

De la même manière, je souhaite faire part de mes remerciements à mes collègues de l'ANRH (Alger et Ouargla), l'ADE de Ghardaïa, la DRE et la DSA de Ghardaïa, qui ont contribué chacun à sa manière à la réalisation de ce travail.

Un tout grand merci à mon cher ami Atallah CHENAFI, pour les nombreuses et longues soirées consacrées à la mise au point des techniques du SIG, que ce soit à Ghardaïa, à Aflou ou à Oran.

Autour de moi enfin, je dois profondément remercier mes deux adorables garçons, Oussama et Abdelrrahim, ma femme qui m'a soutenue en tant de façon, et si continuer qu'il serait trop long de le dire. Ce n'est que des heures dérobées de mes charges familiales que j'ai pu trouver le temps d'achever ma maîtrise.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	II
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	XII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I	
GENERALITES	
1.1. Présentation géographique de la zone d'étude	4
1.2. Les activités dans la vallée du M'zab	5
1.3. Carte d'occupation des sols de la vallée du M'zab	5
CHAPITRE II	
ENVIRONNEMENT GEOLOGIQUE	
2.1. Introduction	8
2.2. Cadre géologique de la plate-forme saharienne	8
2.2.1. Trias	9
2.2.2. Jurassique	9
2.2.3. Crétacé inférieur	9
2.2.3.1. Néocomien	9
2.2.3.2. Barrémien	9
2.2.3.3. Aptien	9
2.2.3.4. Albien	10
2.2.4. Crétacé supérieur	10
2.2.4.1. Cénomaniens	10
2.2.4.2. Turonien	10
2.2.4.3. Sénonien	10
2.2.4.3.1. Sénonien inférieur lagunaire	10
2.2.4.3.2. Sénonien supérieur carbonaté	10
2.2.5. Tertiaire	11
2.2.5.1. Eocène inférieur	11
2.2.5.2. Eocène moyen	11
2.2.5.3. Mio-Pliocène	11
2.2.5.4. Pliocène continental "Croute calcaire saharienne"	11
2.2.6. Quaternaire	11
2.3. Le Continental intercalaire	13
2.4. Le Continental terminal	13

2.5.	Le Complexe terminal	13
2.6.	Cadre géologique de la dorsale du M'zab	13
	2.6.1. Lithostratigraphie	15
	2.6.1.1. Albien	15
	2.6.1.2. Cénomanién	15
	2.6.1.3. Turonien	15
	2.6.1.4. Sénonien inférieur	15
	2.6.1.5. Sénonien supérieur	15
	2.6.1.7. Pliocène continental	17
	2.6.1.8. Quaternaire	17
	2.6.2. Structure de la dorsale du M'zab	19
2.7.	Aperçu paléogéographique et tectonique	20
	2.7.1. Trias	20
	2.7.2. Jurassique inférieur	20
	2.7.3. Jurassique inférieur - Néocomien	20
	2.7.4. Barrémien	20
	2.7.5. Aptien	20
	2.7.6. Albien	20
	2.7.7. Cénomanién-Turonien	21
	2.7.8. Sénonien inférieur	21
	2.7.9. Sénonien supérieur - Eocène inférieur	22
	2.7.10. Eocène moyen	22
	2.7.11. Mio-Pliocène	22
	2.7.12. Quaternaire moyen	22
	2.7.13. Holocène - Actuel	23

CHAPITRE III

ENVIRONNEMENT PHYSIOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT

3.1.	Introduction	25
3.2.	Exploitation d'un SIG	25
3.3.	Le bassin versant de l'oued M'zab	25
3.4.	Caractéristiques géométriques	27
	3.4.1. Coefficient de compacité K_G de Gravelius (1914).....	27
	3.4.2. Le rectangle équivalent	27
3.5.	Caractéristiques du chevelu hydrographique	29
	3.5.1. Hiérarchisation du chevelu	29
	3.5.2. Les rapports morphométriques (lois de Horton)	32
	3.5.2.1. Rapport de confluence R_c	32
	3.5.2.2. Rapport de longueur moyenne R_L	33
	3.5.3. Densité des thalwegs élémentaires F_1	34
	3.5.4. La densité de drainage D_d	34
	3.5.5. Coefficient de torrentialité C_t	35
3.6.	Caractéristiques de relief	35
	3.6.1. Indice de pente de Roche I_p	35
	3.6.2. Etude de la fréquence altimétrique	36
	3.6.3. Etude de la répartition des surfaces en fonction de l'altitude	37

3.6.4.	Etude hypsométrique	38
3.6.5.	Altitude de fréquence du bassin $H_{1/2}$	39
3.6.6.	Altitude moyenne du bassin H_{moy}	39
	3.6.6.1. Calculée par formule	39
	3.6.6.2. Calculée à partir du MNT	39
3.6.7.	Indice de pente moyenne I_m	40
3.6.8.	Dénivelée utile D_u	41
3.6.9.	Indice de pente globale I_G	41
3.6.9.	Dénivelée spécifique D_s	42
3.6.10.	Etude des pentes	42
3.7.	Temps de concentration T_c	46
	3.7.1. Formule algérienne (1992)	46
	3.7.2. Formule de Giandotti	47
	3.7.3. Formule SCS (Soil Conservation Service)	47
3.8.	Vitesse d'écoulement de l'eau (V_c)	47

CHAPITRE IV

ENVIRONNEMENT CLIMATOLOGIQUE

4.1.	Les conditions climatiques de la région	50
4.2.	Température	50
	4.2.1. température moyenne annuelle	50
	4.2.2. température moyenne mensuelle	51
	4.2.3. température extrême	51
	4.2.4. L'amplitude thermique	53
4.3.	L'humidité relative	53
4.4.	Le vent et le sirocco	54
4.5.	Les précipitations	54
	4.5.1. Moyennes annuelles des précipitations	55
	4.5.2. Moyennes mensuelles des précipitations	55
	4.5.3. Ajustement à une loi statistique	56
4.6.	Evaporation	57
4.7.	Les indices climatiques	58
	4.7.1. Indice de De Martonne (IDM)	58
	4.7.2. Indice xérothermique de Bagnouls et Gausson (I_x)	59
	4.7.3. Quotient pluviométrique d'Emberger	60
	4.7.4. Climatogramme de Peguy	62
4.8.	Lame d'eau tombée sur le Bassin versant	63
	4.8.1. Méthode des polygones de Thiessen	63
	4.8.2. Méthode de la moyenne arithmétique	64
	4.8.3. Méthode de la variation altimétrique (analytique)	64
	4.8.4. Méthode des deux axes	65
	4.8.5. Discussion des résultats	66
4.9.	Lame d'eau ruisselée (Formule de Fersi (1979b))	66
4.10.	Calcul du débit de pointe d'une crue	67

CHAPITRE V

PRINCIPES THEORIQUES DE L'ANALYSE GEOSTATISTIQUE

5.1.	Introduction	72
5.2.	Interpolation spatiale	72
5.3.	Classes d'interpolation	72
5.3.1.	Interpolation globale	72
5.3.2.	Interpolation locale	72
5.3.3.	Interpolation exacte	72
5.3.4.	Interpolation approximative	72
5.4.	Méthodes d'interpolation spatiales	73
5.4.1.	Méthode déterministe	73
5.4.2.	Méthode géostatistique	73
5.5.	Le Krigeage	73
5.5.1.	Le Semi-variogramme	74
5.5.2.	Propriétés du semi-variogramme	74
5.5.2.1.	Le Palier (sill)	75
5.5.2.2.	La Portée (range)	75
5.5.2.3.	Effet pépité (Nugget effect)	75
5.5.2.4.	L'anisotropie	75
5.5.3.	La modélisation	76
5.5.3.1.	Les lags	77
5.5.3.2.	Les bins	77
5.5.4.	L'autocorrélation	77
5.5.5.	La validation croisée	78
5.6.	Analyse spatiale sous ArcGIS 10.0	79

CHAPITRE VI

ENVIRONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE

6.1.	Introduction	82
6.2.	Système aquifère du Sahara septentrional (SASS)	82
6.2.1.	La nappe du complexe terminal (CT)	84
6.2.2.	La nappe du continental intercalaire (CI)	85
6.2.2.1.	Limites et structure du CI	85
6.2.2.2.	Piézométrie et alimentation du CI	86
6.2.2.3.	Reserve et exploitation du CI	86
6.3.	L'aquifère du CI dans la région du M'zab	87
6.3.1.	Historique de recherche et d'exploitation du CI	87
6.3.2.	Structure du CI dans la région du M'zab	87
6.3.3.	Exploitation du CI dans la vallée du M'zab	88
6.3.4.	Piézométrie du CI dans la région du M'zab	89
6.3.4.1.	Exploration et distribution spatiale des données	89
6.3.4.2.	Interpolation spatiale	91
6.3.4.3.	Calcul du semi-variogramme	91
6.3.4.4.	Validation croisée	92
6.3.4.5.	Génération de la surface piézométrique	93
6.3.4.6.	Carte des courbes piézométriques	94

6.4.	La nappe phréatique de l'oued M'zab	96
6.4.1.	Piézométrie de la nappe phréatique	96
6.4.1.1.	Exploration et distribution spatiale des données	97
6.4.1.2.	Interpolation spatiale	97
6.4.1.3.	Calcul du semi-variogramme	97
6.4.1.4.	Validation croisée	98
6.4.1.5.	Génération de la surface piézométrique	99
6.4.1.6.	Carte des courbes piézométriques	101

CHAPITRE VII

CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE INTRINSEQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE DU M'ZAB

7.1.	Introduction	104
7.2.	Notion de vulnérabilité	104
7.3.	Types de vulnérabilité	104
7.3.1.	La vulnérabilité intrinsèque	104
7.3.2.	La vulnérabilité spécifique	105
7.4.	Les critères déterminant la vulnérabilité intrinsèque	105
7.4.1.	Critères liés au sol	105
7.4.2.	Critères liés à la zone non saturée (ZNS)	105
7.4.2.1.	Epaisseur de la zone non saturée	106
7.4.2.2.	Perméabilité verticale	106
7.4.2.3.	Structure de la zone non saturée	106
7.4.3.	Critères liés à la zone saturée	106
7.4.3.1.	Type de nappe	106
7.4.3.2.	Paramètres hydrodynamiques	106
7.4.3.3.	Piézométrie de la nappe	106
7.4.3.4.	Epaisseur de l'aquifère réservoir	106
7.4.3.5.	Limites d'écoulement	107
7.4.3.6.	Pouvoir filtrant de l'aquifère réservoir	107
7.5.	Méthodes de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque	108
7.5.1.	Introduction	108
7.5.2.	Méthodes de cartographie	108
7.5.2.1.	Méthode GOD	108
7.5.2.2.	Méthode DRASTIC	109
7.5.2.3.	Méthode SINTACS	110
7.5.2.4.	Méthode <i>SI (Susceptibility Index)</i>	111
7.5.3.	Conclusion	111
7.6.	Apport des SIG	112
7.7.	Outils SIG utilisés	112
7.8.	Base de données type Géodatabase	112
7.9.	Choix de la méthode	113
7.10.	Détermination des critères de la méthode GOD	115
7.10.1.	Type de nappe (Groundwater occurrence).....	115
7.10.2.	Impact de la ZNS (Overall aquifer class).....	115
7.10.3.	Profondeur à la nappe (Depth to groundwater table).....	115

7.11.	Notation et interpolation des critères	116
7.11.1.	Critère G "Type de nappe"	116
7.11.1.1.	Notation	116
7.11.1.2.	Interpolation	116
7.11.2.	Critère O "Impact de la ZNS"	118
7.11.2.1.	Notation	118
7.11.2.2.	Interpolation	118
7.11.3.	Critère D "Profondeur à la nappe"	120
7.11.3.1.	Notation	120
7.11.3.2.	Interpolation	120
7.12.	Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe du M'zab	122
7.13.	Discussion et conclusion générale	123
7.14.	Observations relatives à la protection des ressources en eau	126

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I GENERALITES

Figure : 1	Limites de la vallée de l'oued M'zab (Image IKONOS/2000)	4
Figure : 2	Répartition des surfaces d'occupation des sols dans la vallée	5
Figure : 3	Carte d'occupation des sols dans la vallée du M'zab	6

CHAPITRE II ENVIRONNEMENT GEOLOGIQUE

Figure : 4	Carte géologique du bassin septentrional du Sahara (OSS, 2003)	8
Figure : 5	Log géologique synthétique du bassin du Sahara septentrional (SONATRACH/Expl.)	12
Figure : 6	Carte géologique de la dorsale du M'zab (1951)	14
Figure : 7	Coupe lithologique du forage de Noumerat (ANRH/Ghardaïa)	16
Figure : 8	Coupe lithologique du forage de Foussaa à Guerrara, N-E de Ghardaïa (ANRH/Ghardaïa)	18
Figure : 9	Coupe géologique E-W à travers la dorsale du M'zab (in Ould Baba sy, 2005)	19
Figure : 10	Origine des sables du Continental Intercalaire (d'après Legrand et Guirand, 1990 in Ould. Baba Sy, 2005)	21

CHAPITRE III ENVIRONNEMENT PHYSIOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT

Figure : 11	Organigramme des étapes adoptées pour l'étude physiographique sous ArcGIS	11
Figure : 12	Rectangle équivalent du bassin versant de l'oued M'zab	28
Figure : 13	MNT en mode GRID du bassin versant de l'oued M'zab	29
Figure : 14	MNT avec effet d'ombre (shadow) du BV de l'oued M'zab	30
Figure : 15	Profil en long de l'oued M'zab	30
Figure : 16	Chevelu hydrographique du bassin versant de l'oued M'zab	31
Figure : 17	Nombre des thalwegs en fonction de leur ordre	33
Figure : 18	Longueurs des thalwegs en fonction de leur ordre	34
Figure : 19	fréquence altimétrique du bassin versant de l'oued M'zab	36
Figure : 20	Carte de la répartition des surfaces en fonction de l'altitude du bassin versant de l'oued M'zab	37

Figure : 21	Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued M'zab	38
Figure : 22	Histogramme de fréquence des pentes du bassin versant de l'oued M'zab	43
Figure : 23	Carte des pentes du bassin versant de l'oued M'zab	44
Figure : 24	Exemples de structure des chevelus hydrographiques en plan	45

CHAPITRE IV

ENVIRONNEMENT CLIMATOLOGIQUE

Figure : 25	Variation de la température mensuelle moyenne	51
Figure : 26	Variation des températures extrêmes moyennes mensuelles	52
Figure : 27	Carte des isohyètes (J. Dubief, 1953)	55
Figure : 28	Variation mensuelle moyenne de la hauteur des pluies	56
Figure : 29	Ajustement des précipitations annuelles à une loi log-normale (Ghardaïa 1986/2009)	57
Figure : 30	Diagramme ombrothermique (Station de Hassi R'mel)	59
Figure : 31	Diagramme ombrothermique (Station de Ghardaïa)	60
Figure : 32	Diagramme ombrothermique (Station de Ouargla)	60
Figure : 33	Climagramme du quotient pluviométrique (Q2) d'Emberger des stations d'étude	61
Figure : 34	Climagramme de Peguy	62
Figure : 35	Méthode de Theissen appliquée sur le bassin versant du M'zab	63
Figure : 36	Droite de régression Pluviométrie-Altitudes	64
Figure : 37	Méthode des deux axes appliquée sur le bassin versant du M'zab	65
Figure : 38	Sous-bassin versant de l'oued El Haimeur sous Google earth	67
Figure : 39	MNT du sous-bassin versant de l'oued El Haimeur	68
Figure : 40	Localisation du sous-bassin versant de l'oued El Haimeur	68
Figure : 41	Chevelu hydrographique du sous-bassin versant de l'oued El Haimeur	69
Figure : 42	Profil en travers de la section mouillée dans l'oued El Haimeur	70

CHAPITRE V

PRINCIPES THEORIQUES DE L'ANALYSE GEOSTATISTIQUE

Figure : 43	Semi-variogramme théorique à modèle sphérique (ESRI, 2010)	74
Figure : 44	Semi-variogramme à modèle sphérique (Gratton Y., 2002)	75
Figure : 45	Semi-variogramme et carte semi-variographique à anisotropie NNW-SSE sous ArcGIS (ESRI, 2010)	76
Figure : 46	Représentation des lags et des bins de la modélisation	76
Figure : 47	Semi-variogramme et représentation des bins et distance des lags sous ArcGIS (ESRI, 2010)	77
Figure : 48	Validation croisée et données statistiques du modèle ajusté sous ArcGIS (ESRI, 2010)	78
Figure : 49	Organigramme des étapes de l'analyse spatiale sous ArcGIS	80

CHAPITRE VI

ENVIRONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE

Figure : 50	limites du domaine SASS (ANRH)	82
Figure : 51	Log synthétique des principales unités géologiques et hydrogéologiques du bassin du SASS	83
Figure : 52	Piézométrie de la nappe du CT (OSS, 2003)	84
Figure : 53	Coupe hydrogéologique NE-SW du bassin SASS (ERESS, 1972)	85
Figure : 54	Piézométrie de la nappe du CI (OSS, 2003)	86
Figure : 55	Exploitation de la nappe albienne dans la vallée par usage	88
Figure : 56	Carte d'inventaire des forages exploitant la nappe albienne dans la vallée du M'zab (avril-mai, 2011)	89
Figure : 57	Courbe quantile-quantile et histogramme de fréquences des levées piézométriques avant transformation (nappe albienne)	90
Figure : 58	Courbe quantile-quantile et histogramme de fréquences des levées piézométriques après log-transformation	90
Figure : 59	Semi-variogramme à modèle sphérique des levées piézométriques (nappe albienne)	90
Figure : 60	Validation croisée du semi-variogramme ajusté des levées piézométriques (nappe albienne)	92
Figure : 61-a	Carte de la surface piézométrique de la nappe albienne dans la région du M'zab (avril-mai, 2011)	93
Figure : 61-b	Carte de la surface piézométrique de la nappe albienne dans la région du M'zab (avril-mai, 2011)	93
Figure : 62-a	Carte des courbes piézométriques de la nappe albienne dans la région du M'zab	94
Figure : 62-b	Carte des courbes piézométriques de la nappe albienne dans la région du M'zab (avril-mai, 2011)	95
Figure : 62-c	Carte des courbes piézométriques de la nappe albienne dans la région du M'zab (avril-mai, 2011)	95
Figure : 63	Carte d'inventaire des puits de la nappe phréatique de la vallée du M'zab (avril-mai, 2011)	96
Figure : 64	Semi-variogramme à modèle stable des levées piézométriques (nappe phréatique)	98
Figure : 65	Validation croisée du semi-variogramme ajusté des levées piézométriques (nappe phréatique)	98
Figure : 66	Carte de la surface piézométrique de la nappe phréatique de la vallée du M'zab (avril-mai, 2011)	100
Figure : 67	Carte des courbes piézométriques de la nappe phréatique de la vallée du M'zab (avril-mai, 2011)	102

CHAPITRE VII
CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE INTRINSEQUE
DE LA NAPPE PHREATIQUE DU M'ZAB

Figure : 68	Etapes d'estimation de la vulnérabilité par le système GOD (Foster, 1987)	109
Figure : 69	Structure d'une GéoDatabase sous ArcGIS (ESRI, 2010)	112
Figure : 70	Organigramme de la méthode GOD	114
Figure : 71	Carte de l'indice de vulnérabilité, représentation du critère G (maillage 30x30m)	117
Figure : 72	Carte de l'indice de vulnérabilité, représentation du critère O (maillage 30x30m)	119
Figure : 73	Carte de l'indice de vulnérabilité, représentation du critère D (maillage 30x30m)	121
Figure : 74	Répartition de l'indice de vulnérabilité GOD du secteur d'étude	122
Figure : 75	Fréquence de l'indice de vulnérabilité GOD du secteur d'étude	123
Figure : 76	Carte de l'indice de vulnérabilité de la nappe phréatique de l'oued M'zab (maillage 30x30m)	125

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE III

ENVIRONNEMENT PHYSIOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT

Tableau : 01	Calcul des largeurs des intervalles	28
Tableau : 02	Calcul du quotient des nombres des thalwegs	32
Tableau : 03	Calcul du quotient des longueurs des thalwegs	33
Tableau : 04	Calcul de l'indice de Roche	35
Tableau : 05	Répartition altimétrique des surfaces du bassin versant du M'zab	38
Tableau : 06	Nombre de valeurs d'altitude par classe d'altitude du bassin versant du M'zab	40
Tableau : 07	Classifications des reliefs selon l'indice de pente globale (O.R.S.T.O.M.)	41
Tableau : 08	Classifications des reliefs selon la dénivelée spécifique (O.R.S.T.O.M.)	42
Tableau : 09	Récapitulatif des paramètres physiographiques du bassin versant de l'oued M'zab	48

CHAPITRE IV

ENVIRONNEMENT CLIMATOLOGIQUE

Tableau : 10	Stations pluviométriques	50
Tableau : 11	Température moyenne mensuelle et annuelle	51
Tableau : 12	Températures moyennes extrêmes	52
Tableau : 13	Valeurs caractéristiques de la température mensuelle	53
Tableau : 14	Calcul de l'amplitude thermique des stations	53
Tableau : 15	L'humidité moyenne mensuelle et annuelle (station de Ghardaïa)	53
Tableau : 16	Vitesse moyenne du vent à la station de Ghardaïa	54
Tableau : 17	Précipitations moyennes annuelles	55
Tableau : 18	Précipitations moyennes mensuelles	55
Tableau : 19	Valeurs caractéristiques de la série des précipitations (Ghardaïa 1986/2009)	56
Tableau : 20	Périodes de retour des valeurs caractéristiques (Ghardaïa 1986/2009)	57

Tableau : 21	Evaporation moyenne mensuelle et annuelle (station de Ghardaïa)	57
Tableau : 22	Calcul de l'indice de De Martonne pour les 03 stations	58
Tableau : 23	Classification de De Martonne	59
Tableau : 24	Calcul des valeurs du quotient pluviométrique Q_2	61
Tableau : 25	Calcul de la lame d'eau tombée (méthode de Thiessen)	63
Tableau : 26	Calcul de la pluie moyenne sur le bassin du M'zab (méthode des deux axes)	66
Tableau : 27	Paramètres morphométriques du sous-bassin de l'oued El Haimeur	69

CHAPITRE VI ENVIRONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE

Tableau : 28	Nombre de forages et volumes d'exploitation de la nappe albienne dans la vallée du M'zab	88
Tableau : 29	Paramètres statistiques des levées piézométriques avant transformation (nappe albienne)	90
Tableau : 30	Paramètres statistiques des levées piézométriques après log-transformation (nappe albienne)	91
Tableau : 31	Paramètres d'ajustement optimal du semi-variogramme des levées piézométriques (nappe albienne)	92
Tableau : 32	Calculs statistiques de la validation croisée des levées piézométriques (nappe albienne)	92
Tableau : 33	Paramètres statistiques des levées piézométriques avant transformation (nappe phréatique)	97
Tableau : 34	Paramètres statistiques des levées piézométriques après log-transformation (nappe phréatique)	97
Tableau : 35	Paramètres d'ajustement optimal du semi-variogramme des levées piézométriques (nappe phréatique)	98
Tableau : 36	Calculs statistiques de la validation croisée des levées piézométriques (nappe phréatique)	99

CHAPITRE VII CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE INTRINSEQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE DU M'ZAB

Tableau : 37	Critères de vulnérabilités couramment pris en compte (BRGM, 2002)	107
Tableau : 38	Cotes attribuées au critère "Type de nappe"	116
Tableau : 39	Cotes attribuées au critère "Impact de la ZNS"	118
Tableau : 40	Cotes attribuées au critère "Profondeur à la nappe"	120
Tableau : 41	Classes GOD et intervalles des valeurs de l'indice	122

Introduction générale

Ce travail consiste à évaluer et identifier les modalités d'écoulement des eaux souterraines dans la vallée du M'zab, tout en examinant les conditions hydro-climatiques sous lesquelles sont soumises, d'évaluer ainsi leur éventuelle vulnérabilité à la pollution, et de dégager à la fin les principes de précaution qui consiste à prendre pour protéger ces ressources vitales.

En outre, cette étude a permis de montrer l'avantage que peut apporter l'utilisation des techniques du SIG sous environnement d'ArcGIS, pour le traitement par le modèle numérique de terrain (MNT), l'interpolation des données spatiales, ainsi que l'élaboration des diverses cartes thématiques.

La vallée du M'zab, située dans le sud algérien, est soumise à un climat saharien aride. La nappe superficielle d'Inféro-flux (phréatique) ainsi que la nappe profonde du Continental Intercalaire (CI) constituent les principales ressources en eau de la région. L'accroissement démographique et le développement agro-industriel ont engendré une très forte demande en eau, nécessitant une grande mobilisation de cette ressource. A cet effet, les eaux souterraines dans les zones arides représentent les principales ressources en eau exploitables. En raison de leur rareté ainsi que la multiplication des sources de pollution (eaux usées et industrielles, décharges brutes, engrais chimiques ...etc.), ces ressources nécessitent un certain degré de protection.

L'approche cartographique de la vulnérabilité demeure dans ce cas un outil adéquat pour l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque de la nappe phréatique de la vallée du M'zab. Les conditions hydrogéologiques, la quantité d'information disponible et le nombre de paramètres utilisés, nous a conduit à opter à utiliser la méthode paramétrique GOD.

A la fin de ce travail, nous avons essayé de dégager quelques mesures de précaution pour mieux protéger ces ressources tant plan qualitatif que quantitatif, dans un éco-système très sensible et fragile.

La démarche suivie dans le cadre de cette étude est la suivante :

la présentation générale de la vallée du M'zab, avec la réalisation à l'aide des outils SIG d'une carte d'occupation des sols de la vallée. L'étude géologique régionale et locale, qui s'est appuyée sur les travaux de nombreux auteurs, notamment G. Busson (1970) et J. Fabre (1976), avait pour but non seulement de comprendre l'histoire géologique et paléogéographique de la région, et de leur influence sur sa structure physiographie, et de situer la zone étudiée dans son contexte géologique régional.

Etude physiographique du bassin versant de l'oued M'zab. Le bassin présente un réseau très ramifié, drainant les eaux de surface vers sebkhet Sefioune exutoire du bassin. Une étude morphologique semble être très utile, elle nous a permis en particulier, de classer les cours d'eau selon leur importance et de déceler leur développement. En se basant sur l'analyse spatiale détaillée du modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude, ainsi que de l'image multispectrale du satellite américain IKONOS à 4 m de résolution, nous avons pu étudier les diverses caractéristiques physiographiques du bassin versant de l'Oued M'zab, et cela avec une grande précision.

Etude des paramètres et indices climatiques, qui ont confirmé le caractère aride du climat régissant la région d'étude. En outre, nous avons procédé à la détermination de la lame d'eau tombée sur le bassin versant de l'Oued M'zab, suivie par un essai de calcul du débit de pointe d'une crue exceptionnelle par la méthode de Manning-Strickler.

Etude des principes théoriques de l'analyse géostatistique, consacrée aux rappels de la méthode statistique de l'interpolation spatiale (krigeage), et au calcul du semi-variogramme et ces paramètres, ainsi que le processus de la validation croisée qui nous permet de valider les paramètres de l'ajustement du modèle géostatistique. L'ensemble a permis l'élaboration des différentes cartes thématiques (piézométrie et vulnérabilité à la pollution).

Etude hydrogéologique détaillée nous a permis de localiser les couches aquifères aux différentes profondeurs, leur piézométrie, modalité d'écoulement et leur relation avec les eaux de surface.

Etude de la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque, consacrée à la nappe phréatique de la vallée du M'zab. Dans ce chapitre nous avons essayé de cartographier le degré de protection à la pollution des eaux de la nappe, tout en appliquant l'une des méthodes paramétriques développées pour la détermination du degré de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. L'incorporation des données dans un SIG sous forme de Géodatabase, a permis de calculer les divers indices de vulnérabilité et d'identifier par la suite les zones à risque de contamination, indépendamment du type de polluant.

CHAPITRE I

GENERALITES

1.1. Présentation géographique de la zone d'étude

La région du M'zab, située à 600 km au sud de la capitale est considérée comme l'une des grandes oasis du Sahara algérien. Administrativement, elle fait partie de la wilaya de Ghardaïa, regroupant trois chefs lieu de communes ; Ghardaïa chef-lieu de la wilaya occupant l'amont et le centre de la vallée, Bounoura et El Atteuf occupant la partie aval de la vallée.

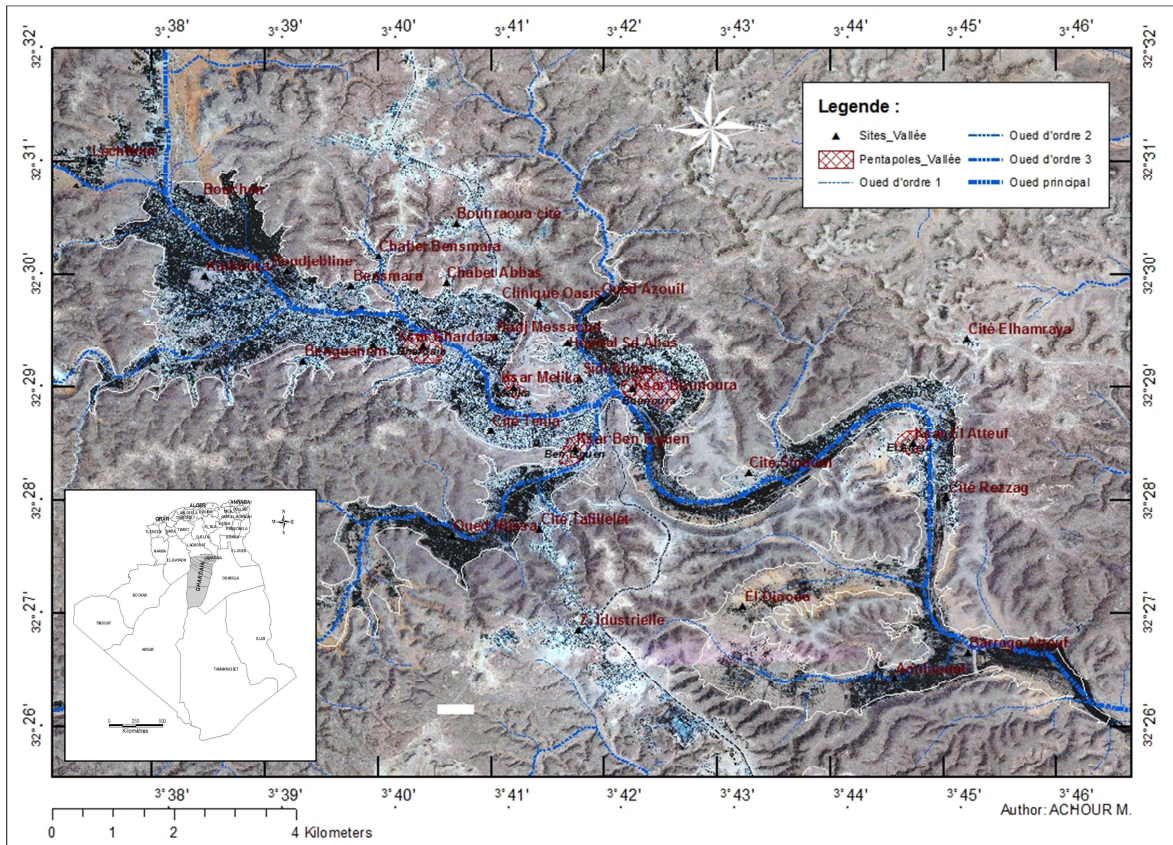


Figure 1 - Limites de la vallée de l'oued M'zab
(Image IKONOS/2000)

Géographiquement la vallée du M'zab est comprise entre $32^{\circ} 26'$ et $32^{\circ} 31'$ de latitude Nord et $3^{\circ} 37'$ et $3^{\circ} 46'$ de longitude Est. Elle est alignée approximativement NW-SE, en partant de Bouchen, zone de confluence de l'oued El Haimeur (Laadira) avec l'oued Touzouz, jusqu'à El Atteuf sur une longueur de 23,50 km. La largeur de la vallée varie entre 2,35 et 1,50 km en amont et diminue au fur et à mesure vers l'aval pour atteindre 0,55 km tout au sud de la ville d'El Atteuf.

Les altitudes quant à elles sont relativement faibles, elles diminuent progressivement de l'amont vers l'aval, 514 à 508 mètres à Bouchen, 505 à 485 mètres au niveau de la ville de Ghardaïa, 455 à 450 mètres au niveau d'El Atteuf, et 435 mètres à Ahbas point le plus bas de l'oasis d'El Atteuf.

1.2. Les activités dans la vallée du M'zab

La population pour l'ensemble des trois communes regroupées est estimée de 161 202 habitants (DPAT, 2008). L'agriculture oasienne représente la principale activité de la vallée, dont le sol est occupé en trois modes de culture ;

- Culture des palmeraies en premier lieu (phoenicultures)
- Culture des arbres fruitiers
- Culture maraîchère et fourragère en intercalaire.

Le système d'irrigation se fait par submersion traditionnelle (seguias), rare sont ceux pratiquant le mode d'aspersion et la goutte à goutte.

D'autres activités portant notamment sur le négoce, l'artisanat des tapis, ainsi que des petites et moyennes industries (verres, textiles, agro-alimentaires, cosmétiques ...etc.).

1.3. Carte d'occupation des sols de la vallée du M'zab

La carte a été élaborée par digitalisation de l'image satellitaire IKONOS de l'an 2000 (multi spectrale à 4m de résolution) de la zone étudiée en utilisant les outils du logiciel ArcGIS 10 d'ESRI. La carte montre que sur une surface totale de la vallée digitalisée de 31,18 km² soit 3118,8 hectares ; 30% est occupée par l'urbanisme soit 10,63 hectares. Les oasis dans la vallée occupent une surface de 14,10 hectares, soit 40% de la surface totale (fig. 2).

Les oasis sont localisées principalement en amont (Touzouz ,Bouchen) et en aval de l'oued M'zab (Djaoua, Aouleouel), ainsi que le long des deux principaux affluents de la vallée du M'zab ; oued N'tissa et oued Azouil. Les zones mixtes (urbanisme et oasis) représentent 11% de la surface totale soit 3,83 hectares (fig. 3). Les zones urbaines sont localisées principalement, autours des vieux ksars (pentapole) et s'étendent progressivement vers les oasis environnantes.

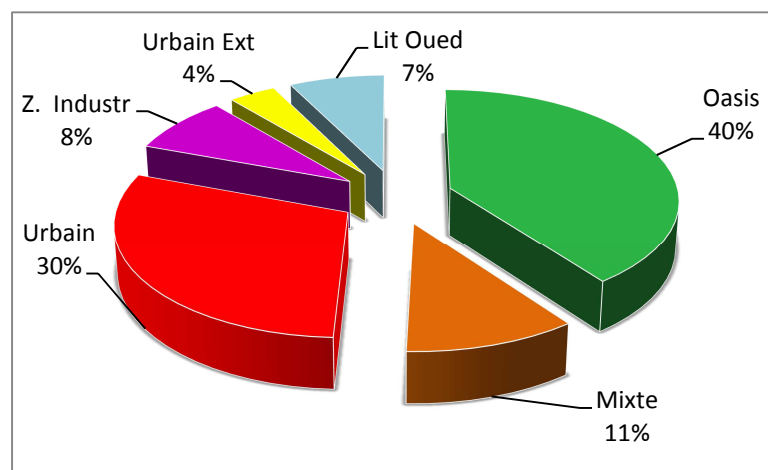


Figure 2 - Répartition des surfaces d'occupation des sols dans la vallée du M'zab

En aval de la vallée une zone inoccupée de 2,66 hectares correspond à la zone d'épandage de l'oued M'zab, elle représente 7% de la surface totale de la vallée.

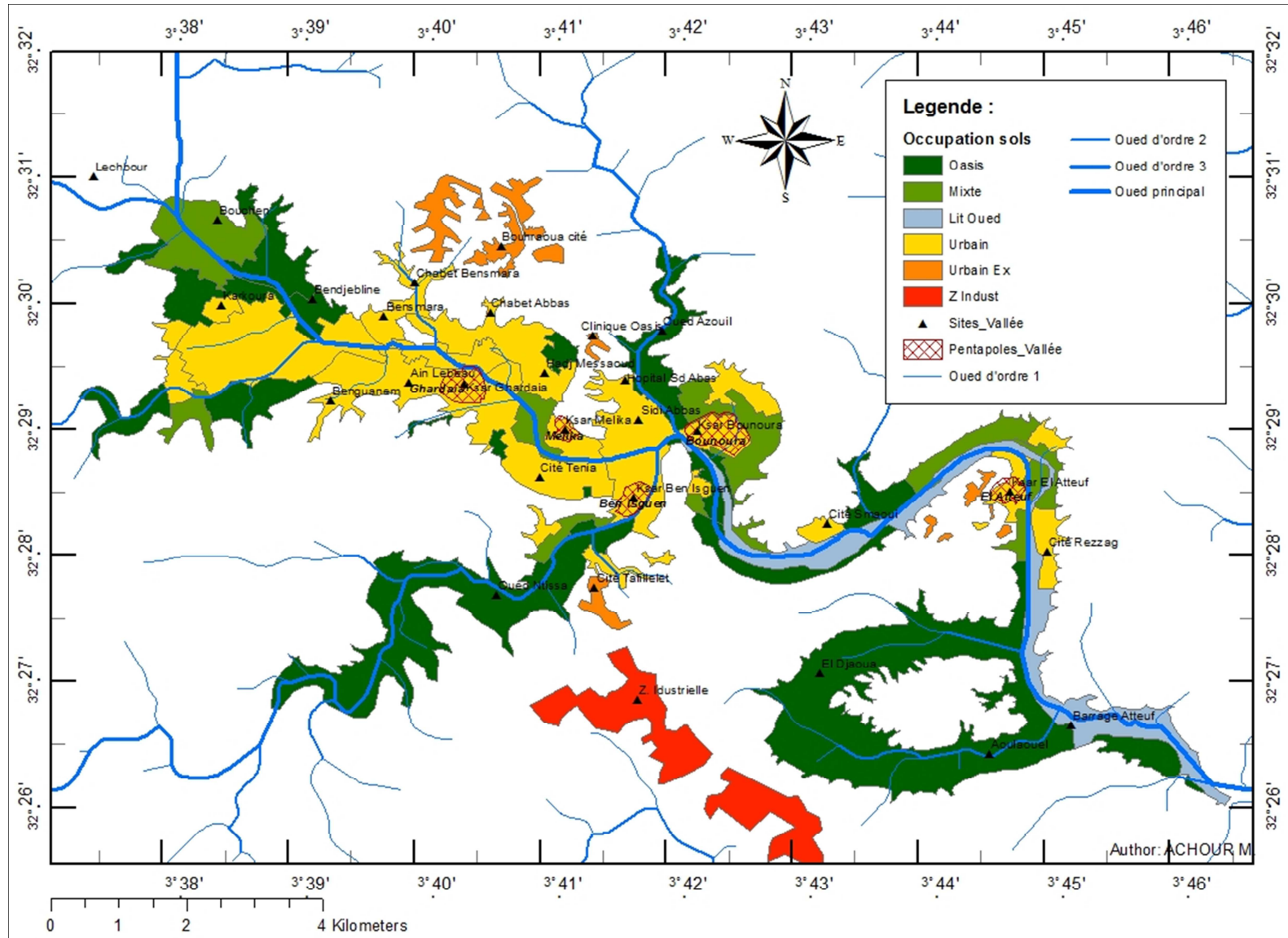


Figure 3 - Carte d'occupation des sols dans la vallée du M'zab (ACHOUR M. / 2013)

CHAPITRE II

ENVIRONNEMENT GEOLOGIQUE

2.1. Introduction

La région du M'zab, fait partie du grand domaine de la plateforme saharienne. G. Busson (1970) et J. Fabre (1976), ont largement consacré leurs travaux sur l'étude de dépôts mésozoïques et tertiaires de la plateforme du Sahara septentrional, lesquels une grande partie de notre synthèse géologique s'est inspirée.

2.2. Cadre géologique de la plate-forme saharienne

Le domaine de la plate-forme saharienne correspond à une immense assise de roches sédimentaires d'âge Secondaire et Tertiaire subhorizontale, reposant en discordance sur un socle primaire (Paléozoïque) fortement plissé et érodé au cours de l'orogénèse hercynienne.

L'ensemble de ces assises comble une vaste cuvette synclinale qui forme le bassin du bas-Sahara, ou bassin du Chaamba (Conrad, 1948). Le centre de la cuvette est occupé par les dunes du Grand Erg oriental. Par contre le Grand Erg occidental couvre en grandes parties ces bordures occidentales et sous ces dunes de sables le bassin correspond à un vaste bombement anticlinal à axe situé approximativement le long de la dorsale du M'zab. C'est le domaine du Haut-Sahara (J. Flandrin, 1957). La plate-forme saharienne s'étend du massif cristallophyllien du Hoggar au Sud jusqu'au piémont méridional de la chaîne montagneuse de l'Atlas Saharien au Nord. Les deux domaines ; saharien et atlasique, sont nettement séparés par un grand accident structural complexe dit flexure sud atlasique (fig. 4).

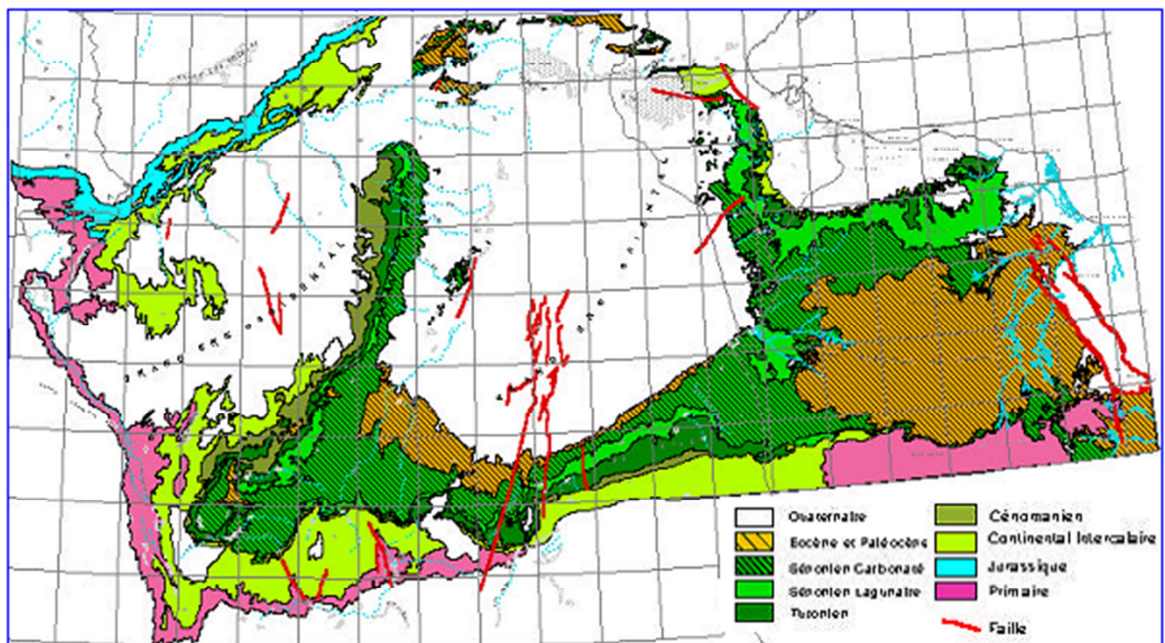


Figure 4 - Carte géologique du bassin septentrional du Sahara (OSS, 2003)

Mise à part les affleurements localisés sur le plateau de Tademaït et de Tinrhert au Sud, et le versant occidental de la dorsale du M'zab, le bassin du bas-Sahara à géologie

assez simple, ses traits géologiques en détail ne sont connus que grâce aux sondages profonds de recherche et de prospection des hydrocarbures.

2.2.1. Trias

À l'exception de ses affleurements au Sud tunisien à la Jeffara, on pensait que la mère triasique n'a pas atteint le Sahara. Ce n'est qu'à l'occasion d'un sondage de prospection exécuté à Berriane (au Nord de Ghardaïa) en 1953, puis un autre sondage réalisé à Hassi R'mel en 1956, ont révélé son existence à une profondeur de 2200 mètres. Il correspond à de dépôts épais de grès perméable d'environ de 500 mètres d'épaisseur, surmontés par une puissante série salifère de 500 mètres composée de sel gemme, d'anhydrite, de dolomite et d'argile.

Le Trias s'étend donc dans tout le bassin et repose sur une surface de pédiplanation (J. Fabre, 1976) du socle primaire.

2.2.2. Jurassique

Ses limites inférieures et supérieures ne sont repérées que sur les diagraphies. Il est formé essentiellement de bancs de calcaires et de calcaires dolomitiques à fossiles. Au sondage de Berriane (1953) il a été recoupé sur une épaisseur de 689 mètres.

2.2.3. Crétacé inférieur

Affleurant seulement aux bordures du bassin du bas-Sahara ; Tademaït et Tinhret au Sud et Sud-Est, à l'Ouest formant la dorsale du M'zab, et plus loin sous les dunes du Grand Erg occidental. A l'Est, il forme les massifs du Dahar en Tunisie et Djebel Nefusa en Lybie. Il a été recoupé dans tous les sondages exécutés dans le bassin du bas-Sahara (G. Busson, 1967, 1970 et 1971), (J. Fabre, 1976). Il correspond à une énorme série détritique fluvio-deltaïque de 200 à 1100 mètres de puissance (fig. 5).

En partant des séries les plus anciennes, le Crétacé inférieur comprend ;

2.2.3.1. Néocomien

Correspond à de dépôts argileux rouges et vertes à anhydrite à la base puis d'alternance de dolomite et d'argile, l'ensemble est surmonté par des couches sablo-gréseuses à lignite (dépôt lagunaire).

2.2.3.2. Barrémien

Marqué par un énorme épandage détritique généralisé sur tout le bassin du Sahara, formé de grès, sable fin à grossier, d'argile à intercalations de calcaire. Au centre du bassin, son épaisseur atteint 1100 mètres, sur les bordures, il est moins épais, compris entre 300 et 600 mètres.

2.2.3.3. Aptien

Sur les sondages, il représente un bon repère lithologique sur une grande partie du bassin (J. Fabre, 1976), composé de dolomite, alternance d'anhydrite et d'argile. L'épaisseur moyenne de cette barre aptienne est de l'ordre de 20 à 30 mètres.

2.2.3.4. Albien

Il correspond à la masse gréso-argileuse comprise entre la barre aptienne et les argiles sus-jacentes attribuées au Cénomaniens. Il est composé de grès et sable très fin à argile, avec quelques intercalations de bancs carbonatés calcaires. L'épaisseur peut atteindre 400 mètres.

2.2.4. Crétacé supérieur

Cette période est marquée par la prédominance de dépôts carbonatés de calcaires et calcaires dolomitiques à faune benthique (fig. 5), invoquant une transgression marine.

2.2.4.1. Cénomaniens

A faciès laguno-marin, il est formé d'argile grise et verte à gypse et anhydrite avec intercalation au sommet de banc de calcaire dolomitique. Ces dépôts marquent la fin de l'émergence albienne et le début d'une transgression marine. L'épaisseur varie entre 300 à 500 mètres.

Sur les bordures du bassin (Tademaït et Tinrhert), le Cénomaniens révèle un changement de faciès. Il présente des roches carbonatées à calcaires dolomitiques (J. Fabre, 1976). La présence de nombreux bancs d'évaporites et d'argiles rendent le Cénomaniens imperméable (BEL et CUCHE, 1969).

2.2.4.2. Turonien

Il est représenté par de calcaire massif compact et lité, plus ou moins dolomitique, à nodule de silex. Il forme la dorsale du M'zab, le plateau du Tinrhert et du Tademaït. L'épaisseur de l'ensemble atteint 120 mètres en moyenne.

2.2.4.3. Sénonien

Les sédiments de cet étage présentent deux faciès bien individualisés, il s'agit d'un milieu lagunaire suivi d'un autre franchement marin.

2.2.4.3.1. Sénonien inférieur lagunaire

Il correspond à une formation argileuse, rouge et jaunâtre à bancs de gypse et d'anhydrite et de sel gemme, avec quelque intercalation de marne dolomitique. L'épaisseur est de l'ordre de 120mètre. La nature de ces dépôts évoque un milieu confiné de golfe à demi fermé (J. Fabre, 1976).

2.2.4.3.2. Sénonien supérieur carbonaté

Il est représenté par de calcaires crayeux perméables, dolomies et des marnes carbonatées à anhydrite. L'épaisseur est d'environ 100 mètres.

2.2.5. Tertiaire

En continuité lithologique avec le Crétacé supérieur, l'homogénéité de faciès rend délicat la séparation. L'Eocène marque la fin du dernier épisode marin du Sahara (G. Busson, 1970)(fig. 5).

2.2.5.1. Eocène inférieur

Il est formé par des calcaires, calcaires dolomitiques et des marnes carbonatées à fossiles (Operculines, Nummulites). Il s'étend sur une grande partie du bassin du Sahara, notamment au centre, on le retrouve en affleurement au Nord-Est de la dorsale du M'zab et sur le versant septentrional des plateaux de Tinrhert et Tademaït. A la limite orientale de la dorsale du M'zab, l'Eocène inférieur carbonaté et le Sénonien carbonaté sont pratiquement indifférenciés. L'épaisseur moyenne est de l'ordre de 100 mètres.

2.2.5.2. Eocène moyen

Il s'agit d'une série lagunaire composée d'argiles et d'anhydrites et de gypses à rare intercalation carbonatée. La série constitue le dernier épisode marin du Sahara septentrional algérien (Busson, 1970), et le début de l'émersion définitive de ce dernier. L'épaisseur moyenne de la série est d'environ 180 mètres.

2.2.5.3. Mio-Pliocène

Formations continentales détritiques recouvrant tout le bassin du bas-Sahara, dont l'épaisseur maximal se situant dans la zone des chotts (Merouane, Melghir, Djerid et Fedjaj) centre du bassin. Elles sont constituées d'argiles sableuse et de sables moyens à grossiers rougeâtre, plus moins consolidés en grès. Il affleure au Nord-Est de la dorsale du M'zab le long de l'oued Zegrir jusqu'au sud de l'oasis du Guerrara. La puissance de la formation est variable de l'ordre de 150 à 200 mètres.

2.2.5.4. Pliocène continental "Croute calcaire saharienne"

Il s'agit d'une formation continentale conglomératique coiffant les dépôts gréseux du Mio-Pliocène, constituée par l'agglomération d'éléments rocheux (poudingues, galets de calcaires lacustres, sables) au sein d'un ciment carbonaté. L'origine de cette croute saharienne est liée essentiellement à l'action d'agents atmosphériques et à des réactions physico-chimiques sur les sédiments (Gouscov, 1952). D'une épaisseur variant entre 2 à 10 mètres, on la retrouve sur tout le bassin du bas-Sahara et au-dessous des dunes de l'Erg oriental. Dans la région du M'zab elle forme une auréole entourant la dorsale du M'zab.

2.2.6. Quaternaire

Dépôt détritique de remblaiement constitué de sables fin à moyen parfois gypseux. Au centre du bas-Sahara l'ensemble est surmonté par une formation argilo-sableuse et gypseuse qui résulte d'une sédimentation en milieu lacustre durant la phase d'assèchement des lagunes des chotts (Busson, 1970).

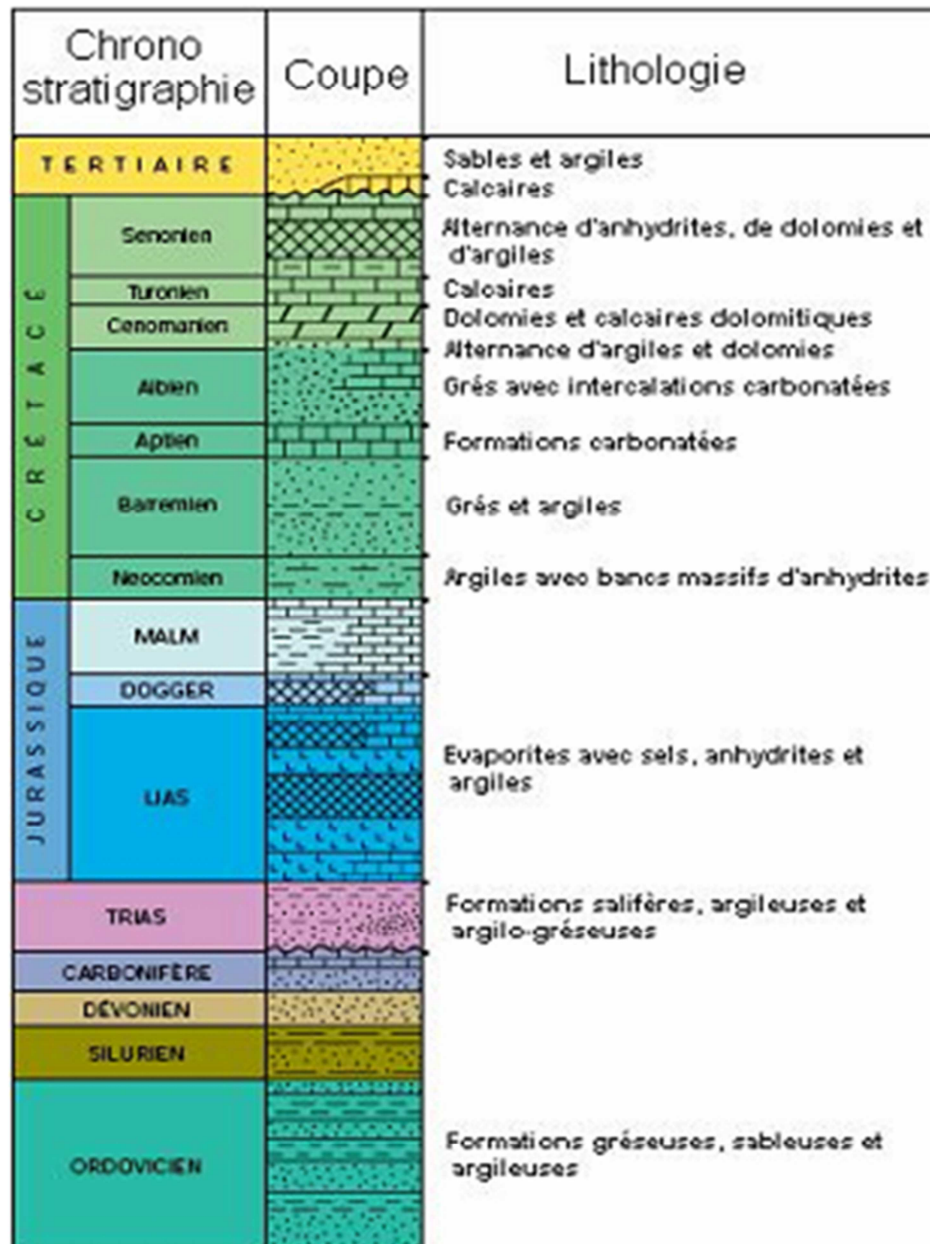


Figure 5 - Log géologique synthétique du bassin du Sahara septentrional (SONATRACH/Expl.)

2.3. Le Continental intercalaire

Le terme continental intercalaire (CI) évoqué par Conrad en 1931, désigne la série de formations détritiques groupées du Crétacé inférieur intercalée entre deux séries marines ; celle du Paléozoïque au-dessous, et la série du Crétacé supérieur au-dessus.

La série marine de base du Paléozoïque achève l'orogénèse hercynienne, par contre la série marine du sommet résulte de la transgression de la mer Téthysienne au cours du Cénomaniens.

2.4. Le Continental terminal

Dans l'étude OSS (2003), il est noté que d'après Kilan (1931), le terme continental terminal désignait les formations continentales, sables et argiles d'âge Mio-Pliocène. Définie ainsi à l'échelle de l'ensemble du bassin du Sahara par opposition au continental intercalaire.

2.5. Le Complexe terminal

Le terme du Complexe Terminal désigne l'ensemble assez peu homogène incluant les formations carbonatées du Crétacé supérieur et les dépôts sablo-gréseux du Tertiaire, principalement du Miocène (Busson, 1970) et (Fabre, 1976).

Le complexe terminal *stricto sensu* ne groupe pas à sa base les assises carbonatées lagunaires sénono-turonniennes.

2.6. Cadre géologique de la dorsale du M'zab

La carte géologique du bassin du Sahara (au 1/500.000) établie par le Service de la Carte Géologique de l'Algérie (SCG) 1951 (fig. 6), montre que la dorsale du M'zab correspond aux affleurements des formations du Crétacé supérieur (Cénomano-turonniennes et sénoniennes), dessinant ainsi une lanière allongée sur une direction subméridienne, laquelle est entourée par de dépôt continental d'âge Mio-pliocène. Les immenses dunes de l'Erg occidental recouvrent en grande partie la dorsale au Sud-Ouest.

Ces assises carbonatées et marneuses du Crétacé supérieur s'épaississent et s'approfondissent progressivement vers l'Est, et se couvrent par des couches plus récentes d'âge Tertiaire (Mio-pliocène et Pontien)(Fig. 6).

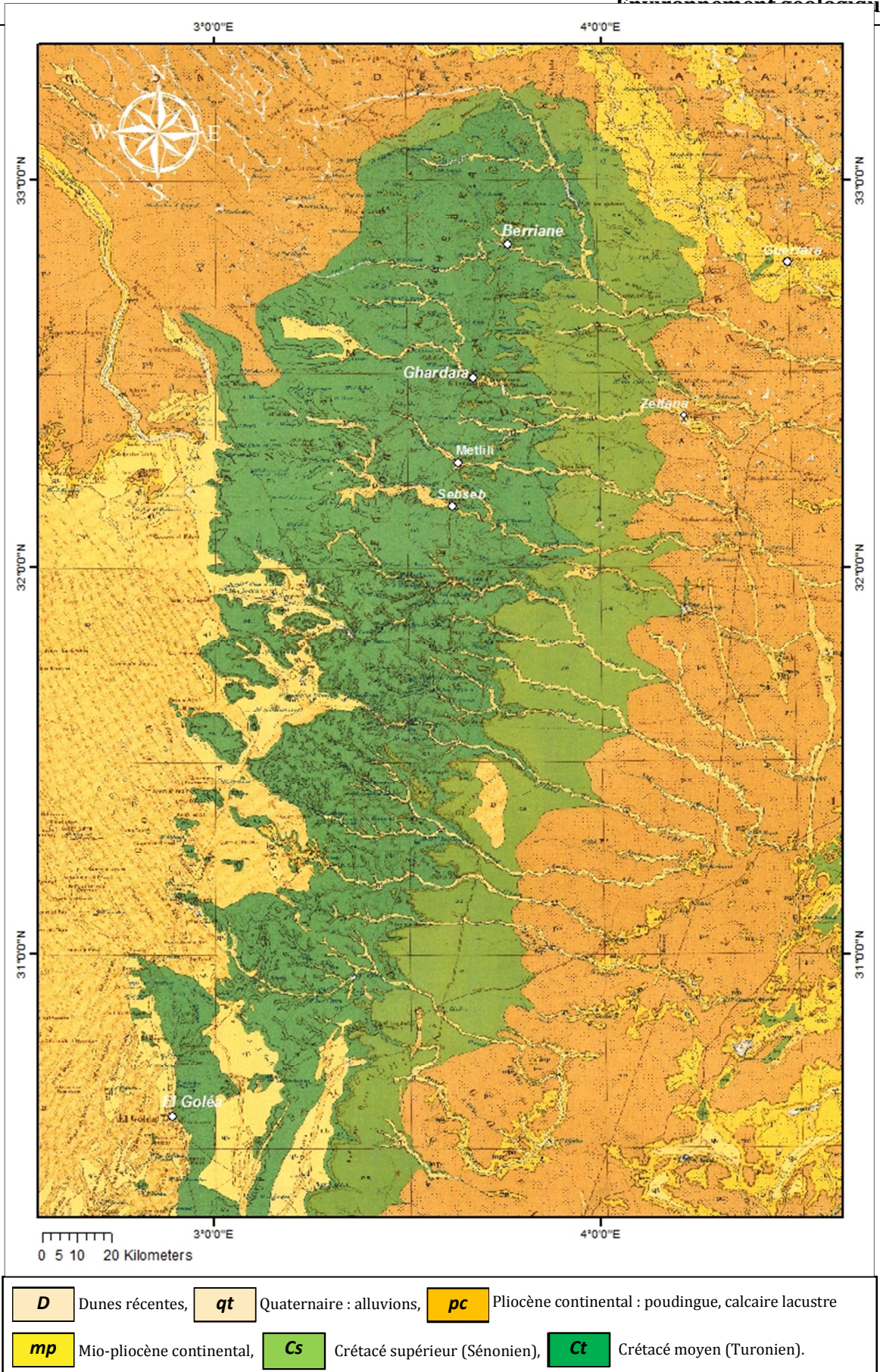


Figure 6 - Carte géologique de la dorsale du M'zab (SCG, 1951)

2.6.1. Lithostratigraphie

La zone d'étude présente à l'affleurement une succession de formations géologiques allant du Cénomaniens au Mio-pliocène continental. Le Quaternaire correspond au dépôt de recouvrement alluvionnaire de la plus part des vallées des oueds de la dorsale du M'zab.

2.6.1.1. Albien

Recoupé par les sondages sur une épaisseur de 500 mètres (fig.7 et 8), il représente une grande importance hydraulique pour la région. Il est composé de sables fins à moyens jaunâtres parfois rougeâtres à rose. Des intercalations d'argiles verdâtres à vertes sont fréquentés.

2.6.1.2. Cénomaniens

Cet étage présente un faciès argileux, formé essentiellement par des argiles vertes, grises et noirâtres, plus ou moins plastique à couches lenticulaires. Des minces intercalations de couches calcaires et des intercalations plus importantes de gypses massifs fibreux blancs et de l'anhydrite (fig. 7 et 8).

Des argiles bariolées (marron, verte et rouge) prédominent dans la partie basale du Cénomaniens, elles sont attribuées par certains géologues (M. J. Savornin) au sous-étage Vraconien. L'épaisseur moyenne du Cénomaniens dans la région du M'zab est de 230 mètres.

2.6.1.3. Turonien

Constitue le plateau rocheux de la dorsale du M'zab (110m) parsemé par de nombreux oueds. Il est composé d'assises calcaires et calcaires dolomitiques massifs à patine ocre, souvent fossilifères ; avec de nombreux nodules de silex. On note aussi des structures d'endokarst fossiles, occasionnant des pertes totales ou partielles de la boue lors de l'exécution des sondages hydrauliques (Fig. 7).

2.6.1.4. Sénonien inférieur

Affleure sur la versant oriental de la dorsale et correspond à des argiles marneuses jaunâtres et rouges, à intercalations de bancs importants de gypses et d'anhydrites. Dans les forages hydrauliques exécutés dans la région de Guerrara et Zelfana, il est recoupé sur une épaisseur de 79mètres (Fig. 8).

2.6.1.5 Sénonien supérieur

Il affleure seulement dans la partie orientale de la dorsale du M'zab et coiffe l'ensemble des buttes témoins de celle-ci. Il est formé de calcaire marneux à argiles.

Le Sénonien supérieur et l'Eocène inférieur sont pratiquement in-distinguables dans la région de M'zab, ils présentent une épaisseur de 36 mètres (fig. 8).

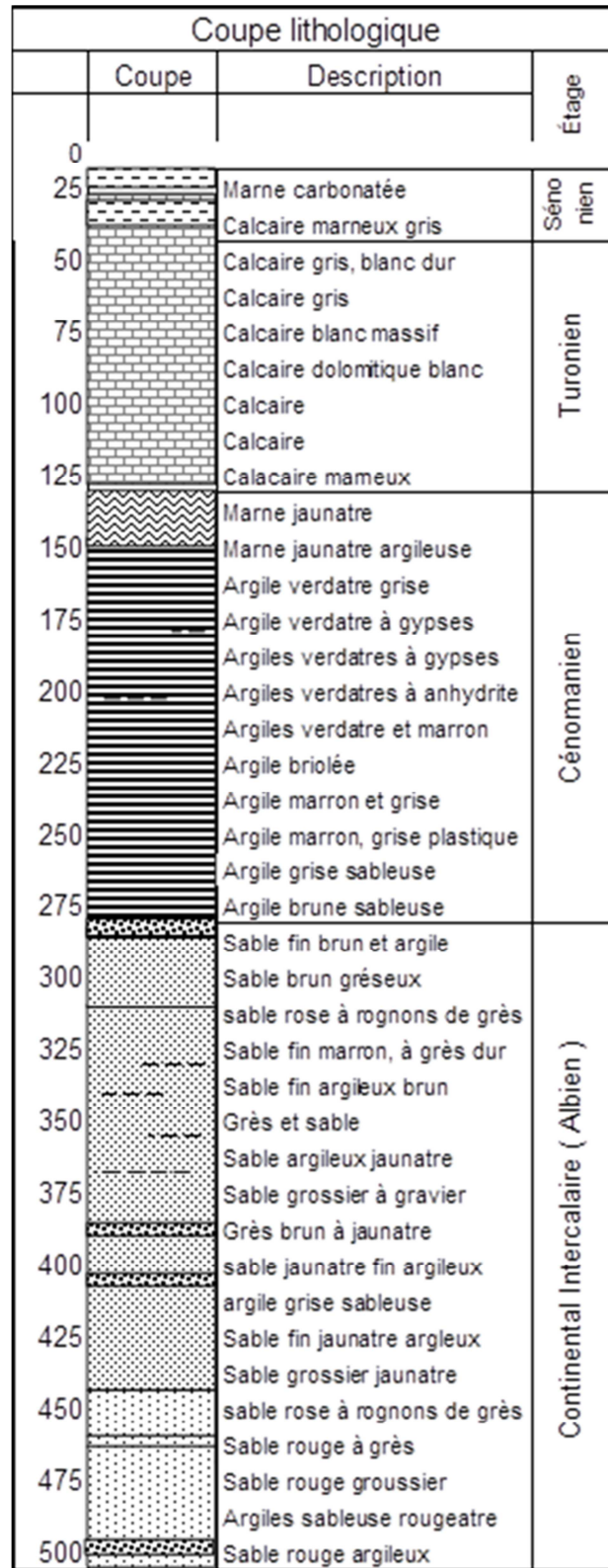


Figure 7 - Coupe lithologique du forage de Noumerat (ANRH/Ghardaïa)

2.6.1.6. Mio-pliocène (Pontien)

Formé de dépôt de sables rouge plus moins consolidés. Grès dur à tendre rose, à lits argileux. Sur les sondages exécutés à l'Est du M'zab (Guerrara), il est recoupé sur une profondeur de 65 mètres (fig. 8).

2.6.1.7. Pliocène continental

Formé d'éléments rocheux de calcaires lacustres et poudingues au sein d'un ciment carbonaté, il compose la fameuse croute saharienne. Il entoure les formations marines carbonatées de la dorsale du M'zab. L'épaisseur moyenne de la croute dans la région est de 5 mètres.

2.6.1.8. Quaternaire

Dans la région du M'zab le Quaternaire formé d'alluvions et de sables plus moins grossiers, argileux, remplissant les bas-fonds des vallées des oueds. De l'amont en aval, les épaisseurs variant entre 20 à 30 mètres.

Les alluvions quaternaires, jouent d'important rôle hydrogéologique en abritant les inféro-flux de la plus part des oueds de la Chebkat M'zab.

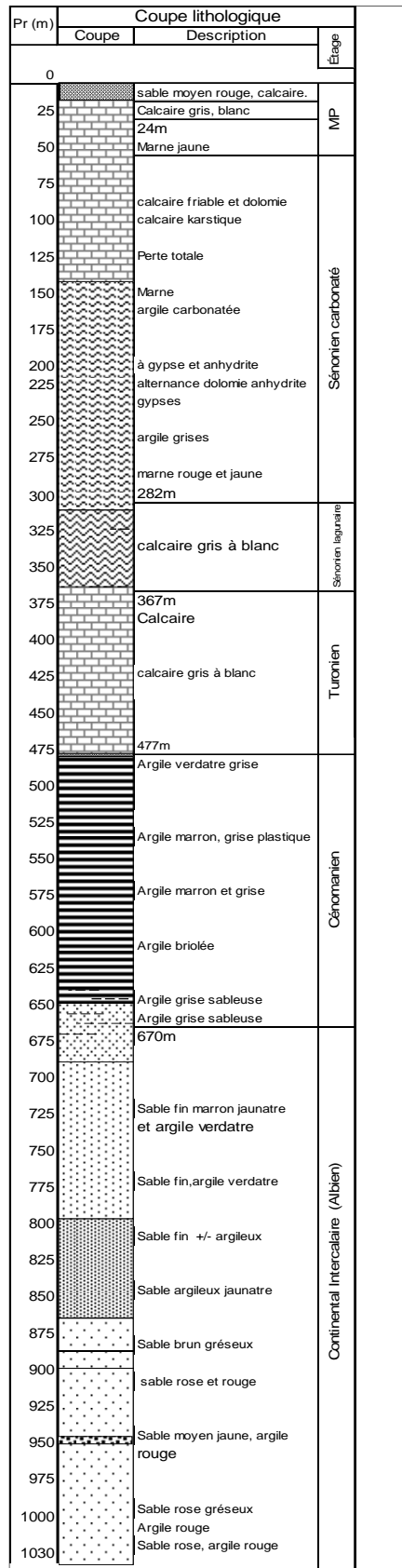


Figure 8 - Coupe lithologique du forage de Foussaa à Guerrara, N-E de Ghardaïa (ANRH/Ghardaïa)

2.6.2. Structure de la dorsale

La dorsale du M'zab constituée par des couches argilo-marneuses d'âge Cénomaniennes surmontées par une importante couche de calcaires dolomitiques massifs (fig. 9), correspond à un pli anticlinal d'un très grand rayon de courbure. Elle consiste selon G.B.M. Flamond (J. Fabre, 1976) à une ondulation de quelques mètres d'amplitude et de 50 à 100 mètres de large, imitant en surface l'écho de rejeux des accidents du socle primaire fracturé du bassin Sahara lors de la phase de l'orogénèse atlasique.

Les assises de la dorsale présentent des pendages modestes (30° à 20°) vers l'Est (centre du bassin)(fig. 9).

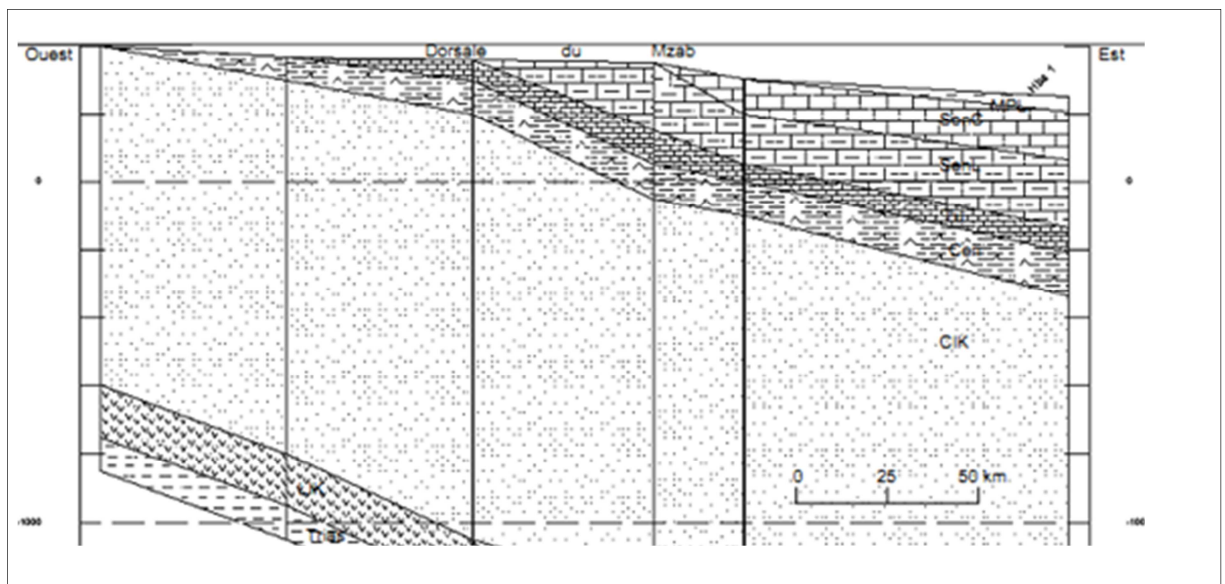


Figure 9 - Coupe géologique E-W à travers la dorsale du M'zab (in Ould Baba sy, 2005)

2.7. Aperçu paléogéographique et tectonique

Le domaine de la plate-forme saharienne représente un grand bassin sédimentaire dont la zone la plus profonde est située dans la région des chotts (centre du bassin), il correspond à des immenses séries marines et continentales d'âge Crétacé et Tertiaire, reposant en discordance angulaire sur un socle d'âge Primaire plissé et pénéplané.

La tectonique du bassin est relativement stable et moins prononcée. Il était le siège de mouvements épirogéniques au cours du Crétacé et le Tertiaire. La plate-forme se trouvait ainsi parfois immergée sur laquelle se déposait de formations marines carbonatées, et parfois émergée favorisant de dépôt continental détritique.

2.7.1. Trias

Le matériel gréseux surmonté par de dépôts évaporitiques du Trias, supposent un milieu fluvio-deltaïque avec un faible apport d'eau douce avec une forte évaporation, sous un climat chaud et sec (Fabre, 1972).

2.7.2. Jurassique inférieur

Transgression marine généralisée marquée sur le plan lithologique par le développement de dépôt des carbonates, des argiles et l'extinction des évaporites.

2.7.3. Jurassique inférieur - Néocomien

Les dépôts lagunaires de dolomie et d'anhydrite déclarent le début de l'installation d'un régime continentale.

2.7.4. Barrémien

Évoque un milieu terrigène fluvio-deltaïque, marqué par un énorme épandage de dépôt gréseux continental détritique, couvrant l'ensemble du bassin, et ayant pour origine les reliefs nourriciers du massif du Hoggar au sud du bassin (Busson, 1970)(fig. 10).

2.7.5. Aptien

Installation d'un régime lagunaire ou marin peu profond, qui s'étale sur tout le bassin du Sahara. Cette transgression de la mer aptienne est déchainée par des légères variations du fond déjà voisin du niveau zéro marin. Intercalé au sein de la série détritique du Crétacé inférieur, la barre carbonatée de l'Aptien constitue un excellent repère lithologique dans les sondages.

2.7.6. Albien

Retour du régime purement continental par le dépôt d'une remarquable série terrigène. Il représente le dernier épisode d'émission détritique de l'ère Mésozoïque sur l'ensemble du bassin du Sahara.

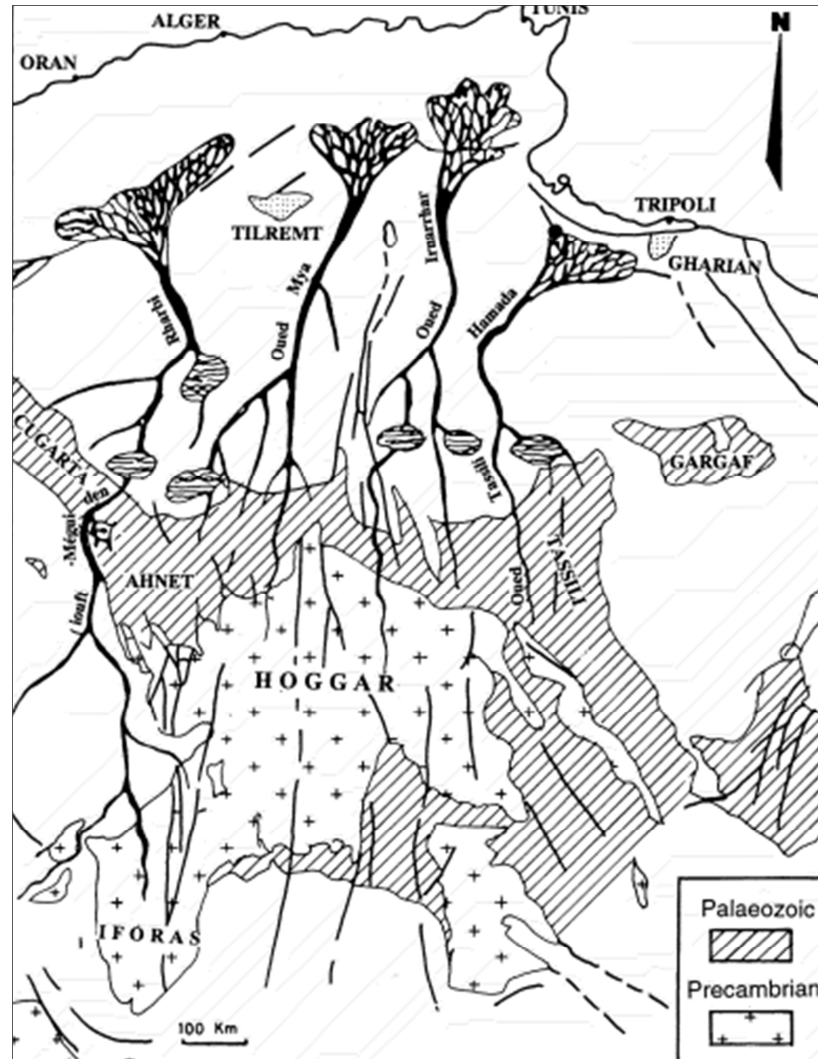


Figure 10 - Origine des sables du Continental Intercalaire (d'après Legrand et Guirand, 1990 in O. Baba Sy, 2005)

2.7.7. Cénomanién-Turonien

Transgression de la mer téthysienne plus loin vers le Sud, faisant du Sahara un bassin unique et homogène. Le régime marin de cet épisode est bien marqué par les dépôts d'argiles et des calcaires dolomitiques.

La puissance considérable de la série au centre du bassin, accuse que le fond de la plate-forme dans cette partie, tendait vers un effondrement progressif.

2.7.8. Sénonien inférieur

Marqué par une légère régression de la mer où le régime devient plus lagunaire, évoquant un milieu confiné de golfe à demi fermé (J. Fabre, 1976). Sur le plan lithologique il est marqué par la présence de gypse, d'anhydrite et de sel gemme, avec intercalation de marne dolomitique.

Le mouvement de la descente du fond du bassin se poursuit encore, mais de faible ampleur.

2.7.9. Sénonien supérieur – Eocène inférieur

Un régime marin de plate-forme néritique s'installe de nouveau ; suite à une transgression généralisée sur toute l'étendue du bassin. Les dépôts Sénono-Eocène déterminent les dernières formations marines connues du Sahara.

L'uniformité de faciès (calcaires et marnes) et d'épaisseur de ces deux étages, révèle qu'ils correspondent à une période d'arrêt des mouvements épirogéniques de la plate-forme.

2.7.10. Eocène moyen

La mer se retire et s'est le régime confiné lagunaire qui s'installe avec le dépôt d'évaporites. Il correspond au période du comblement définitif de la dépression du bassin du Sahara (Gouscov, 1952)

2.7.11. Mio-Pliocène

Marque l'installation définitive du régime continental désertique, représenté par de dépôts à faciès sableux argileux.

Au plan tectonique, la plate-forme saharienne subissait dès le Miocène inférieur, les répercussions des différentes phases orogéniques affectant le sillon subsidant du Nord, où à la chaîne de l'Atlas Saharien prend naissance.

Selon Gouscov (1952), Ces mouvements de répercussions sont marqués par ;

- 1- Un exhaussement d'ensemble de la plate-forme, ce qui explique l'absence de l'Oligocène dans tout le Sahara.
- 2- Un mouvement de descente qui dure encore actuellement, correspond à la sédimentation détritique continentale du Mio-Pliocène et du Quaternaire.

En outre, des ondulations à grande ampleur de courbure ont été repérées dans le bassin du Sahara. La dorsale du M'zab ; alignée en longue lanière et ayant une direction subméridienne, constitue un exemple.

Ces ondulations sont contemporaines à la formation de la chaîne intracratonique de l'Atlas Saharien (J. Fabre, 1976), et paraissent comme l'écho en surface de re-jeux d'accidents du socle primaire (J. Fabre, 1976).

2.7.12. Quaternaire moyen

Le régime continental devient définitif, le Sahara voit la succession des périodes humides et d'autres désertiques. Le réseau hydrographique prend la forme actuelle, dont les versants des vallées témoignent de leur activité intense (J. Fabre, 1976).

La dernière période pluviale qu'a connu le Sahara, relativement froid et humide, correspond à la glaciation Würm ayant affectée l'Europe occidentale.

2.7.13. Holocène – Actuel

Vers -10.000 ans, une période aride s'installe ce qui a permis la formation des massifs dunaires actuels.

Vers -4000 à -1500 ans, un retour d'une courte période pluviale due aux mouvements vers le Nord des moussons soudanaises, ce qui permet le développement d'une importante civilisation néolithique.

Cette courte période humide représente aussi la dernière recharge des nappes aquifères du Sahara (J. Fabre, 1976). Puis c'est le régime du désert qui s'installe et qui dure jusqu'à l'actuel.

CHAPITRE III

ENVIRONNEMENT PHYSIOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT

3.1. Introduction

Le bassin versant de l'oued M'zab présente un chevelu hydrographique important et très ramifié, drainant les eaux de surface vers sebkhet Sefioune exutoire du bassin. Une étude morphologique semble être très utile, elle nous permettra, en particulier, de classer les cours d'eau selon leur importance et de déceler leur développement. L'ensemble des paramètres calculés sert surtout à comparer les bassins versants entre eux.

3.2. Exploitation d'un SIG

Pour réaliser l'étude physiographique du bassin versant du M'zab, on a exploité la technique du SIG (système d'information géographique). C'est une méthode très développée de cartographie, permettant la manipulation et le traitement informatisé de données géographiques. Le SIG permet ainsi de faire de la cartographie et de l'analyse spatiale de façon précise et en fonction de l'échelle désirée.

Les sources de données utilisées sont ;

- Image multispectrale du satellite américain IKONOS à 4m de résolution
- Modèle numérique de terrain (SRTM) de 90 mètres de résolution
- Cartes topographiques d'état-major numérisées de 1/200.000ème.

Et comme programme informatique (logiciel), on a utilisé l'ArcGIS version 10.0 édité par ESRI (Environmental System Research Institute), ce logiciel à langage de développement évolué, est doté d'outils simples et très puissants pour analyser les bases de données spatiales (Géodatabase) ; géométriques et attributaires (fig. 10).

3.3. Le bassin versant de l'oued M'zab

Le bassin versant de l'oued M'zab fait partie de l'ensemble du réseau hydrographique de la dorsale du M'zab, communément appelé " la chebkat du M'zab". En fait, les bassins de la dorsale eux même, se confondent avec le grand bassin versant du chott Melrhir, codifié par le n° 13 selon la classification de l'ANRH.

Le bassin versant de l'oued M'zab présente une superficie totale de 6114 km², l'oued coule sensiblement d'Ouest en Est de la région de Botma Rouila (source), à la Sebkhet Safioune (exutoire du bassin).

Les principaux affluents du M'zab, alias El Abiod, sont en amont de Ghardaïa ; sur la rive gauche, l'oued El Haimeur qui conflue à la Daya ben Dahoua au méridien 3°37', sur la rive droite l'oued Touzouz qui rejoint le M'zab en amont de la palmeraie de Ghardaïa (Bouchen) au méridien 3°38'. En aval de la ville de Ghardaïa on rencontre, à droite, au niveau de Beni Isguen, le N'tissa au méridien 3°41', le côté gauche, au méridien 3°42' ; l'oued Azouil.

Plus loin de la pentapole mozabite en aval, on trouve sur la rive droite oued Noumerat, sur la rive gauche et en amont de Zelfana oued Nessaimou. Plus en aval on rencontre l'oued Hassei sur la rive droite, qui draine la partie Nord du bassin du M'zab.

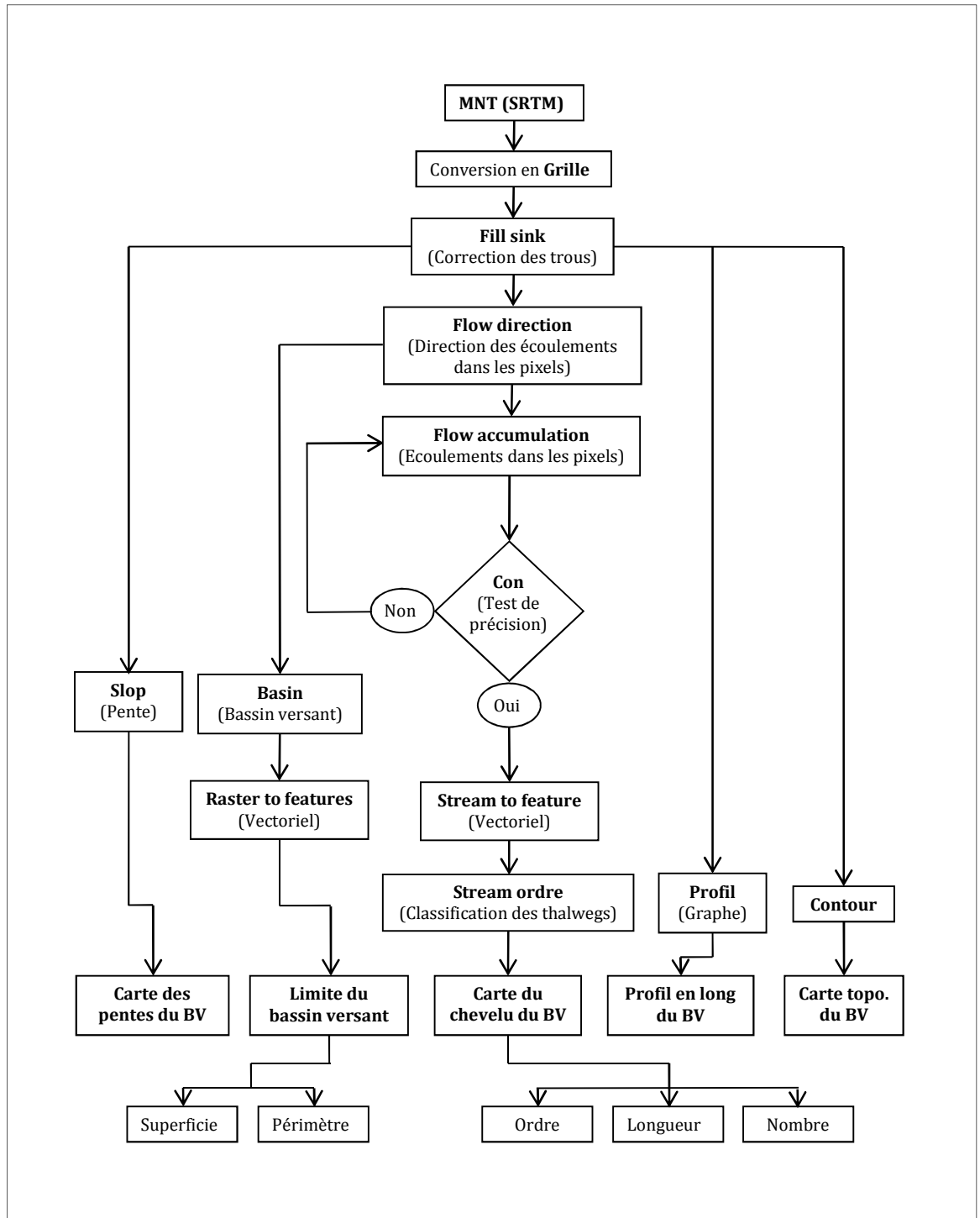


Figure 11 - Organigramme des étapes adoptées pour l'étude physiographique sous ArcGIS

3.4. Caractéristiques géométriques

Extraites du modèle numérique de terrain (MNT) à l'aide du programme ArcGIS, on a obtenu ;

- Surface du bassin versant : $S = 6114 \text{ km}^2$
- Périmètre du bassin versant $P = 480,88 \text{ km}$
- La plus grande longueur $L_{\max} = 211,3 \text{ km}$
- Le plus grand largeur $l_{\max} = 40,23 \text{ km}$
- Distance "Exutoire-Centre de gravité" $D_g = 105,6 \text{ km}$
- Longueur du plus long thalweg $L_t = 301,40 \text{ km}$
- Centre de gravité du bassin versant : $C_g = (04^{\circ}8'28", 32^{\circ}27'28)$

3.4.1. Coefficient de compacité K_G de Gravelius (1914)

Caractérisant la morphologie d'un bassin versant, ce coefficient est défini comme le rapport du périmètre du bassin réel (P) au périmètre d'un bassin circulaire ayant la même surface. Il s'obtient en appliquant la formule ;

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Pour le bassin versant du M'zab, le coefficient de compacité de Gravelius $K_G = 1,72$.

Cette valeur indique bien que notre bassin a une forme allongée, ce qui induit un temps important d'acheminement de l'eau vers l'exutoire, et les débits de pointe des crues sont dans ce cas faibles.

3.4.2. Le rectangle équivalent

Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même surface et le même périmètre du bassin versant. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles à la largeur du rectangle (fig. 12).

Si L_r et l_r représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent, on a $S = L_r.l_r$ et $P_r = 2.(L_r+l_r)$; il se réduit à un carré pour un coefficient de compacité $K_G = 1,12$.

On calcule la longueur L_r et la largeur l_r du rectangle équivalent en appliquant :

$$L_r = K_G \frac{\sqrt{S}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G}\right)^2} \right]$$

$$l_r = K_G \frac{\sqrt{S}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G}\right)^2} \right]$$

Les résultats du calcul pour le bassin versant du M'zab nous donnent :
 $L_r = 211,53$ km et $l_r = 28,91$ km.

Tableau 01. - Calcul des largeurs des intervalles

<i>Altitude de l'intervalle (m)</i>	<i>Surface de l'intervalle (km²)</i>	<i>Pourcentage de la surface (%)</i>	<i>Largeur de l'intervalle (km)</i>
124 - 170	51,85	0,85	1,79
170 - 225	242,80	3,97	8,40
225 - 275	1002,50	16,39	34,68
275 - 345	1119,81	18,31	38,74
345 - 400	680,63	11,13	23,55
400 - 450	566,09	9,26	19,58
450 - 500	347,82	5,69	12,03
500 - 550	382,03	6,25	13,22
550 - 620	501,16	8,20	17,34
620 - 685	756,72	12,38	26,18
685 - 772	463,33	7,58	16,03
<i>Total</i>	6114,74		211,53

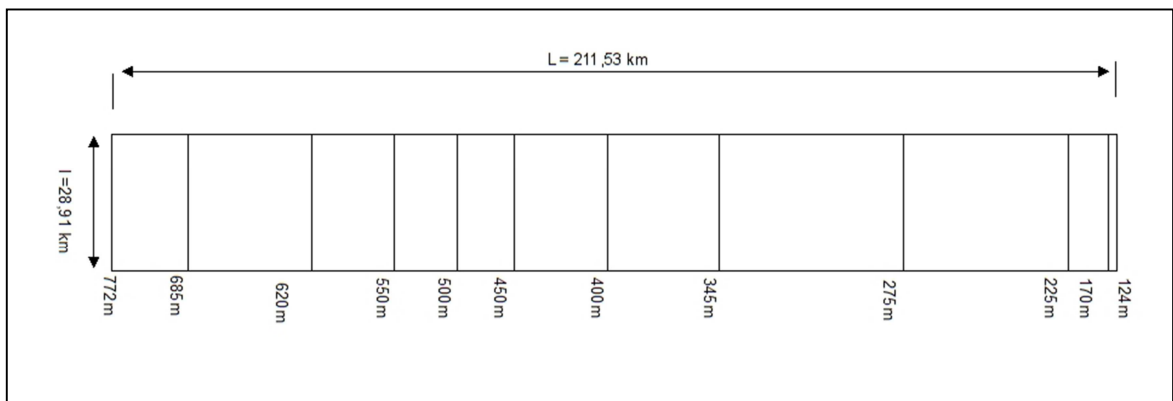


Figure 12 - Rectangle équivalent du bassin versant de l'oued M'zab

3.5. Caractéristiques du chevelu hydrographique

3.5.1. Hiérarchisation du chevelu

La hiérarchisation nous permet d'étudier la ramification du réseau, pour laquelle chaque cours d'eau reçoit un numéro fonction de son importance appelé ordre du cours d'eau.

Parmi les méthodes de numérotation élaborées, on a adopté celle de Shumm-Strahler (1952) basée sur trois règles;

- tout thalweg sans affluent est dit d'ordre 1
- au confluent de deux thalwegs d'ordre n, le résultant est d'ordre n+1
- un thalweg recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre.

L'exploitation des outils d'analyses (Toolbox-Spatial Analyst-Hydrology) du logiciel ArcGIS 10 d'ESRI, nous a permis de traiter numériquement les données du MNT (fig. 13, 14, 15), d'établir la classification et de dresser la carte du chevelu hydrographique du bassin versant (Fig.16).

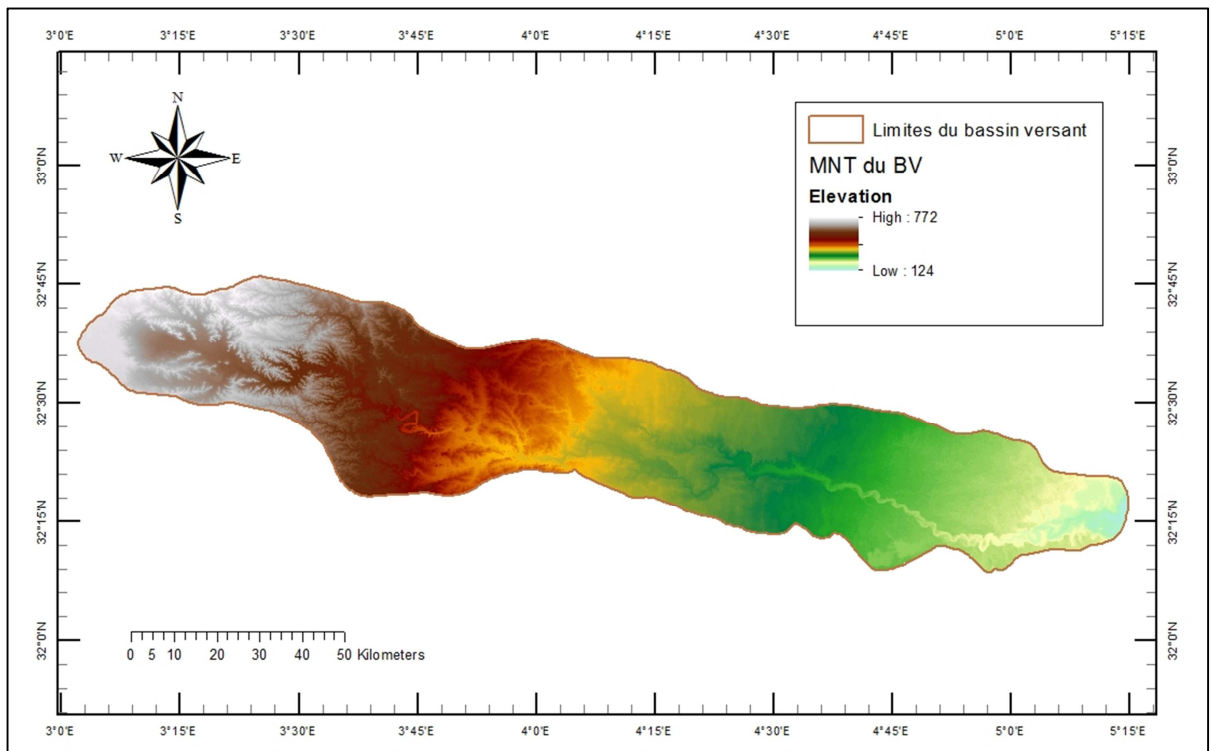


Figure 13 - MNT en mode GRID du bassin versant de l'oued M'zab.

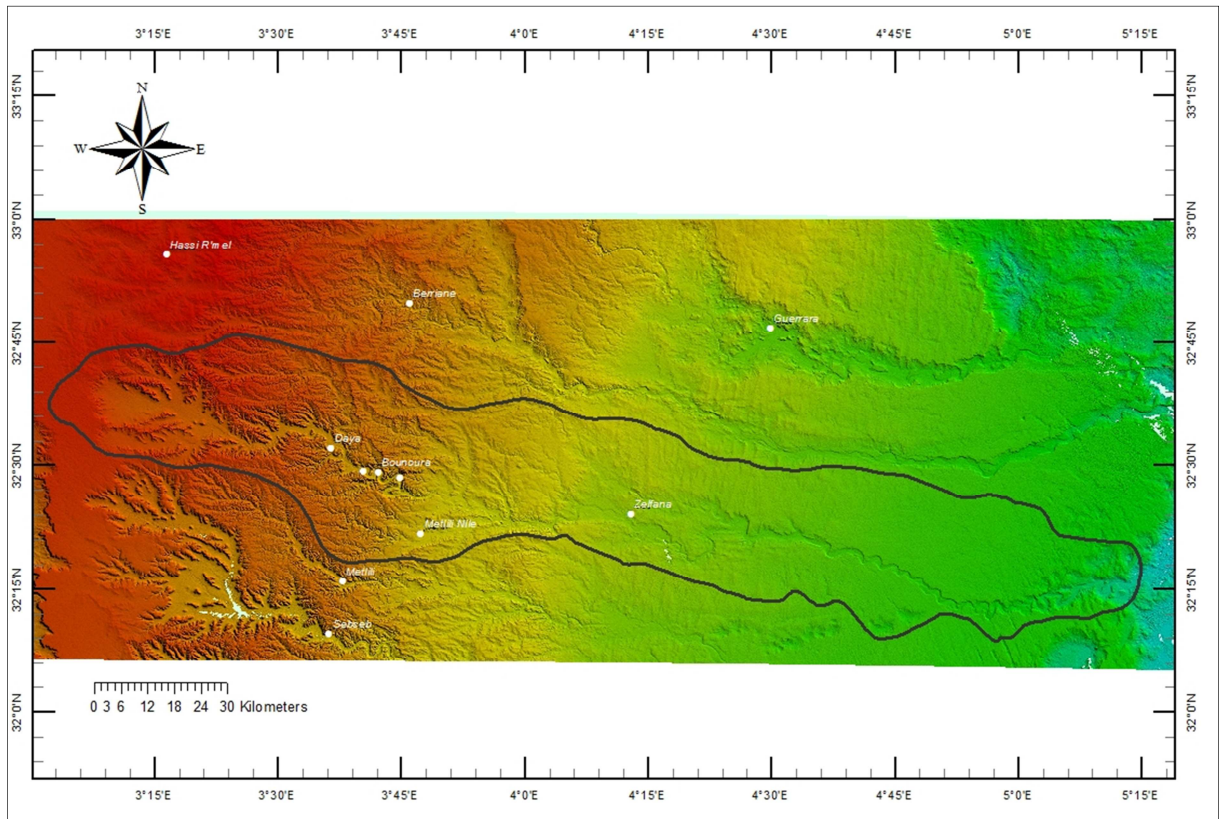


Figure 14 - MNT avec effet d'ombre (shadow) du bassin versant de l'oued M'zab.

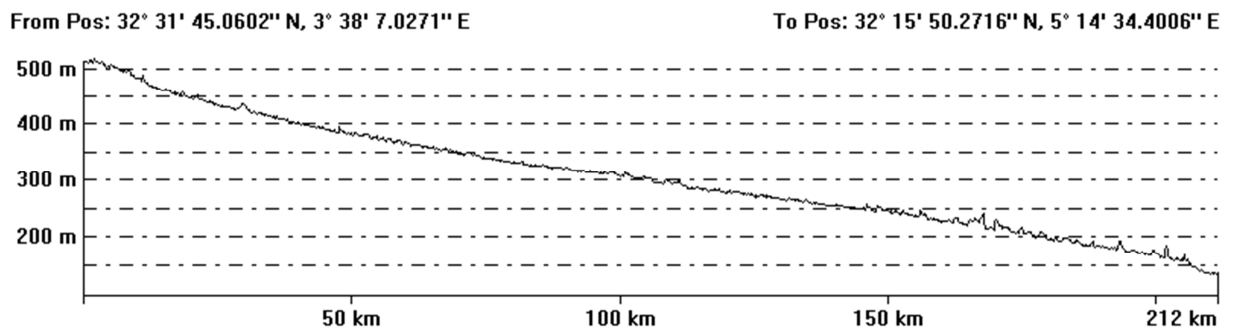


Figure 15 - Profil en long de l'oued M'zab.

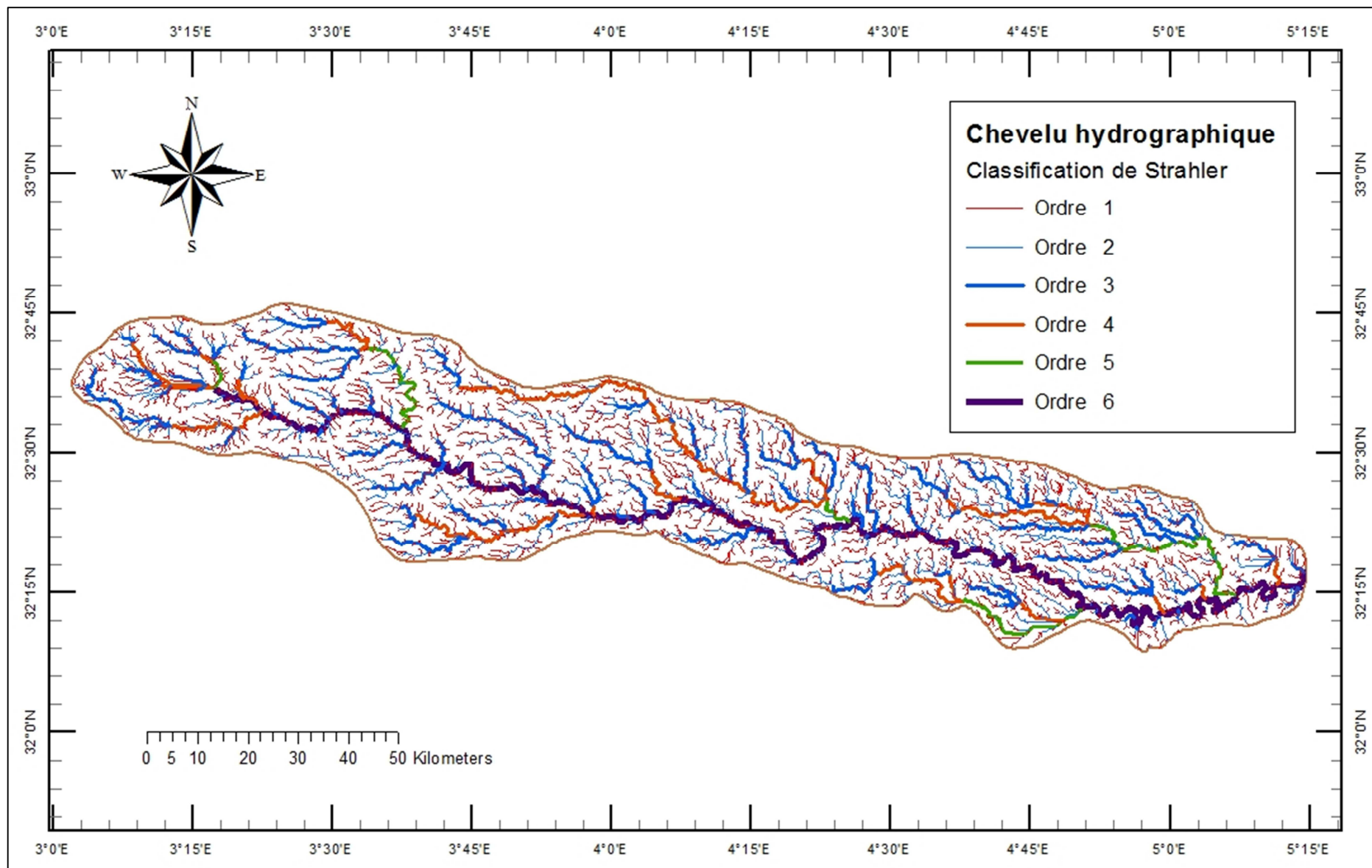


Figure 16 - Chevelu hydrographique du bassin versant de l'oued M'zab

3.5.2. Les rapports morphométriques (lois de Horton)

Horton a formulé des lois empiriques reliant le nombre, la longueur moyenne et l'ordre des thalwegs, il s'agit du rapport de confluence (R_c), et le rapport des longueurs moyennes (R_l).

Sur un bassin versant relativement homogène, les deux rapports sont sensiblement constants.

3.5.2.1. Rapport de confluence R_c

Appelé aussi rapport de bifurcation (bifurcation ratio), il se définit par le quotient du nombre de thalwegs (N) d'ordre x par celui des thalwegs d'ordre supérieur ($x+1$). Les valeurs grandes du R_c indiquent qu'il y a beaucoup d'affluents d'ordre peu élevé, les petites signifient qu'il y a une hiérarchisation des thalwegs.

Il se calcule par la formule ;

$$R_c = \frac{N_x}{N_{(x+1)}}$$

Tableau 02. - Calcul du quotient des nombres des thalwegs

Ordre x	Nombre N_x	N_x/N_{x+1}
1	2220	
2	425	5,224
3	75	5,667
4	18	4,167
5	5	3,600
6	1	5,000
	<i>Moyenne</i>	4,731

D'après le tableau ci-dessus, le rapport de confluence pour le bassin versant du M'zab $R_c = 4,731$. Valeur relativement faible indique que, le bassin présente une bonne hiérarchisation des ces thalwegs ; caractérisant les réseaux hydrographiques de type dendritique, pour lesquels R_c est faible.

En portant sur un graphe semi logarithmique, en abscisse les rangs (ordres) des thalwegs et en ordonnée leur nombre (Fig. 17), on peut aisément constater un bon alignement des points et l'ajustement d'une droite.

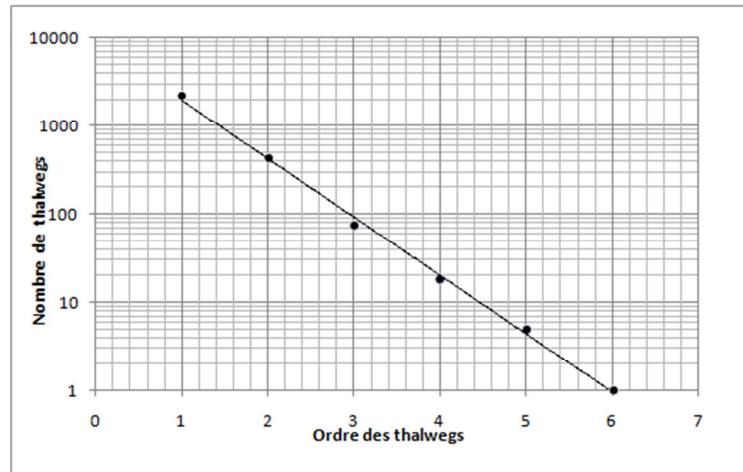


Figure 17 - Nombre des thalwegs en fonction de leur ordre

Selon la formulation de Horton, on peut écrire ;

$$N_x = R_c^{k-x} \Rightarrow \log N_x = (k - x) \log R_c$$

Avec ;

k = ordre du thalweg principal

Pour notre cas on a ; k=6 et $\log(R_c) = \log(4,731) = 0,675$, donc l'équation du nombre d'affluents du bassin versant de l'oued M'zab s'écrit ;

$$\log N_x = 0,675(6 - x)$$

3.5.2.2. Rapport de longueur moyenne R_L

Il se définit par le quotient de la longueur moyenne (L_m) des thalwegs d'ordre (x) par celle des thalwegs d'ordre immédiatement inférieur (x-1). Il se calcule par la formule ;

$$R_L = \frac{L_{m(x)}}{L_{m(x-1)}}$$

Tableau 03. - Calcul du quotient des longueurs des thalwegs

Ordre x	Longueurs L_x (km)	Longueurs moyennes L_m (km)	$L_{m(x)}/L_{m(x-1)}$
1	2701,53	1,22	2,592
2	1340,37	3,15	2,921
3	690,99	9,21	2,049
4	339,81	18,88	1,275
5	120,31	24,06	12,526
6	301,40	301,40	
<i>Total</i>	5494,40		<i>Moyenne</i> 4,273

Pour le bassin versant du M'zab, le rapport des longueurs moyennes $R_L = 4,273$.

Les couples (L_x, x) portés sur un graphe semi log nous permet d'ajuster approximativement une droite (Fig. 18).

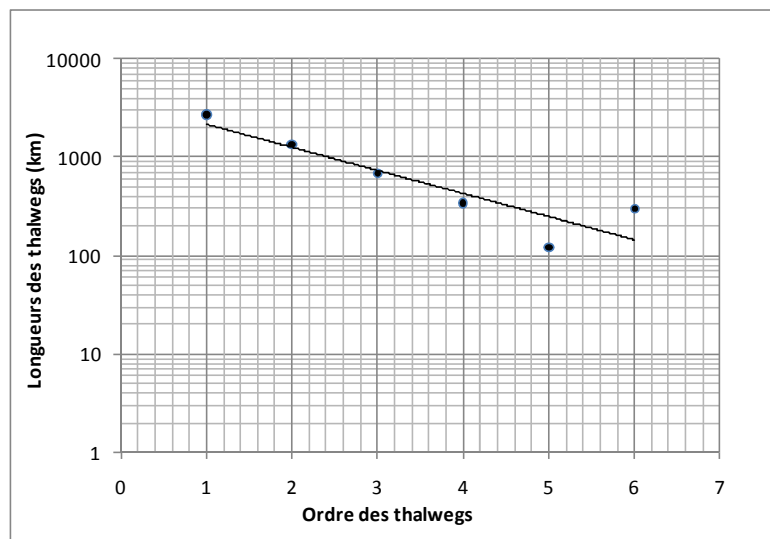


Figure 18 - Longueurs des thalwegs en fonction de leur ordre

Horton relie le rapport des longueurs avec les longueurs moyennes par la formule ;

$$L_{m(x)} = L_{mp} L_c^{k-p} \Rightarrow \log L_{m(x)} = (k - p) \log L_{mp}$$

3.5.3. Densité des thalwegs élémentaires F_1

Elle se définit par le rapport du nombre des thalwegs d'ordre 1 (N_1) à la surface totale (S) du bassin versant.

$$F_1 = \frac{N_1}{S}$$

La densité des thalwegs élémentaires calculée pour le bassin versant du M'zab nous donne $F_1 = 0,36$ thalwegs/km².

3.5.4. La densité de drainage D_d

Elle se définit par le rapport de la longueur totale des cours d'eau (L_x) à la superficie (S) du bassin versant.

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^x L_x}{S}$$

Pour une longueur totale des thalwegs du bassin versant du M'zab $L_x = 5494,40$ km et une superficie de $6114,74$ km², on obtient une densité de drainage $D_d = 0,899$ km/km².

3.5.5. Coefficient de torrentialité C_t

Il se définit comme le produit de la densité des thalwegs élémentaires (F_1) d'un bassin versant par sa densité de drainage (D_d)

$$C_t = F_1 \cdot D_d$$

Le résultat du calcul nous donne pour notre bassin versant du M'zab un coefficient de torrentialité $C_t = 0,33$.

3.6. Caractéristiques de relief

3.6.1. Indice de pente de Roche I_p

L'indice proposé par M. Roche, représente la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées entre les lignes de niveau, et pondérée par les surfaces

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_1^i \sqrt{(a_i d_i)}$$

Avec ;

I_p : indice de pente de Roche

L : largeur du rectangle équivalent (km)

a_i : fraction de la surface comprise entre deux courbes de niveau voisines (%)

d_i : distance séparant les deux courbes de niveau voisines (m)

Tableau 04. - Calcul de l'indice de Roche

Altitude de l'intervalle (m)	Dénivelée d_i (m)	Surface de l'intervalle (km^2)	Fraction de la surface a_i (%)	$(a_i \cdot d_i)^{1/2}$
124 - 170	46	51,85	0,0085	0,62
170 - 225	55	242,80	0,0397	1,48
225 - 275	50	1002,50	0,1639	2,86
275 - 345	70	1119,81	0,1831	3,58
345 - 400	55	680,63	0,1113	2,47
400 - 450	50	566,09	0,0926	2,15
450 - 500	50	347,82	0,0569	1,69
500 - 550	50	382,03	0,0625	1,77
550 - 620	70	501,16	0,0820	2,40
620 - 685	65	756,72	0,1238	2,84
685 - 772	87	463,33	0,0758	2,57

L'indice de pente de Roche calculé pour le bassin versant du M'zab est $I_p = 1,68$.

3.6.2. Etude de la fréquence altimétrique

Cette étude nous permet de mettre en évidence l'influence de l'altitude sur les facteurs climatiques, notamment la température et les précipitations qui régissent les écoulements de surface.

En utilisant le logiciel ArcGIS 10 d'ESRI, on a pu traiter numériquement les données du modèle numérique de terrain (MNT) générés par les techniques d'interférométrie et couvrant l'ensemble de notre bassin versant du M'zab.

Le traitement nous a permis de dégager onze classes d'altitude, leur report sur un graphe sous forme des histogrammes de fréquence (Fig.19) nous fournit une vue synthétique du relief et de la pente du bassin.

Sur l'axe des ordonnées, ont été reportés les nombres des pixels de l'MNT raster ayant les mêmes valeurs d'altitude.

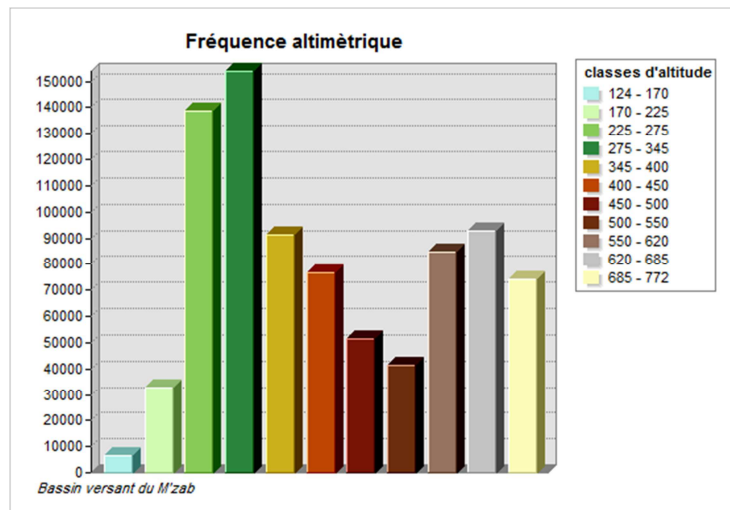


Figure 19 - fréquence altimétrique du bassin versant de l'oued M'zab

On remarque clairement que les altitudes les plus fréquentes sur le bassin du M'zab sont comprises entre 225 et 345m. Par contre les altitudes comprises entre (345-450) m et (550-772) m représentent environ 50% de fréquences.

Les fréquences les plus faibles concernent les altitudes comprises entre 124 et 225m.

3.6.3. Etude de la répartition des surfaces en fonction de l'altitude

La carte de la répartition des surfaces en fonction de l'altitude (Fig.20), a été élaborée par le logiciel ArcGis 10 d'ESRI à partir du traitement de la grille de l'MNT.

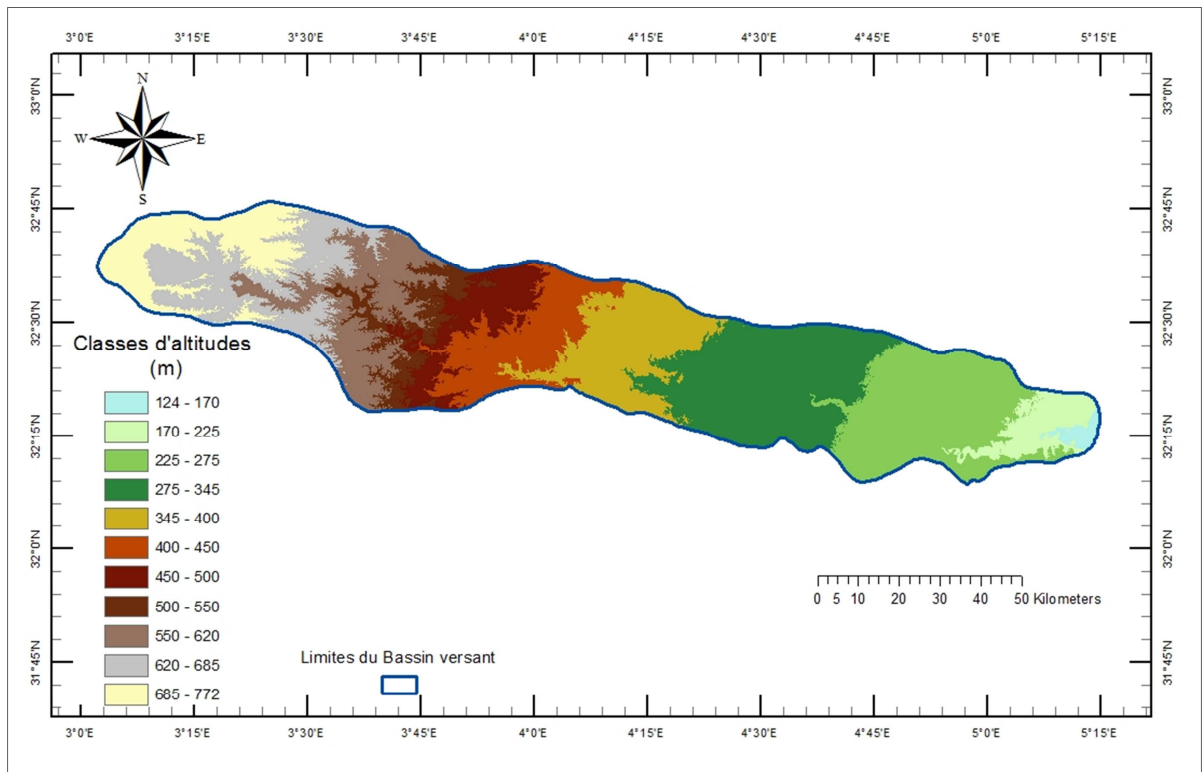


Figure 20 - Carte de la répartition des surfaces en fonction de l'altitude du bassin versant de l'oued M'zab

La carte montre que les surfaces les plus dominantes sont comprises entre l'altitude 225m et l'altitude 345m, elles occupent la partie orientale du bassin versant sur une surface totale de 2122 km². Du point de vue géomorphologique, elle correspond à des plaines types hamadas formées par des dépôts continentaux de calcaires lacustres et poudingues d'âge Pliocène.

Dans les régions occidentales du bassin versant sur une superficie de 1988 km², les altitudes varient entre 450m et 685m avec un relief plus contrasté. Elles correspondent à l'affleurement des calcaires turoniens de la dorsale du M'zab à réseau hydrologique très ramifié.

Les points culminants sont localisés sur les bordures occidentales du bassin avec des altitudes comprises entre 685 et 772mètres.

Des faibles altitudes (124-170m) sont situées en aval du bassin, occupant une petite superficie de 52 km². Cette zone constitue l'exutoire des eaux du bassin versant du M'zab, lequel coïncide avec la dépression de la sebkha Sefioune.

3.6.4. Etude hypsométrique

L'étude hypsométrique nous permet d'analyser la dispersion des altitudes en fonction des surfaces comprises entre les courbes niveaux.

Le mode opératoire consiste à déterminer par planimétrie la superficie de toutes les surfaces situées au-dessus de la courbe de niveau correspondante, et cela pour les différentes altitudes du bassin versant.

Dans un contexte géomorphologique, la courbe renseigne sur la pente, le relief du bassin versant, ainsi que le niveau de maturité du cours d'eau.

Le traitement numérique du MNT du bassin versant de l'oued M'zab avec l'ArcGIS 10 d'ESRI, nous a permis de générer automatiquement les intervalles d'altitudes et les surfaces correspondantes. Les résultats sont figurés dans le tableau ci-dessous (Tableau 05).

Tableau 05. – Répartition altimétrique des surfaces du bassin versant du M'zab

Altitude de l'intervalle (m)	Surface de l'intervalle (km ²)	Pourcentage de la surface (%)
124 - 170	51,85	0,85
170 - 225	242,80	3,97
225 - 275	1002,50	16,39
275 - 345	1119,81	18,31
345 - 400	680,63	11,13
400 - 450	566,09	9,26
450 - 500	347,82	5,69
500 - 550	382,03	6,25
550 - 620	501,16	8,20
620 - 685	756,72	12,38
685 - 772	463,33	7,58
<i>Total</i>	6114,74	100,00

Les données ci-dessus permettent de tracer la courbe hypsométrique (Fig.21) du bassin versant du M'zab.

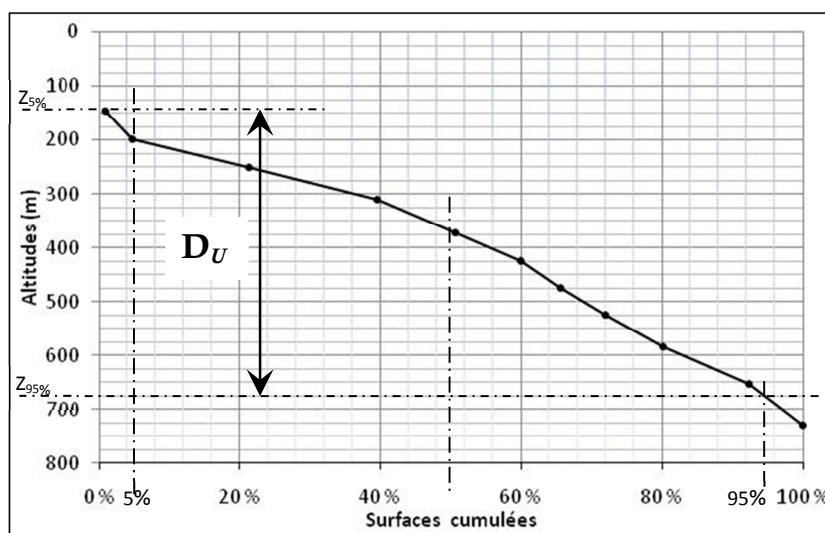


Figure 21 - Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued M'zab

L'allure de la courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued M'zab, montre que sa plus grande partie est caractérisée par des altitudes moyennes à faibles, et à reliefs modérés à faibles.

3.6.5. Altitude de fréquence du bassin $H_{1/2}$

Calculée à partir de la courbe hypsométrique, elle correspond à l'altitude à laquelle la surface soit égale à 50% de la surface totale du bassin versant. La lecture de la courbe nous donne une altitude moyenne $H_{50\%} = H_{1/2} = 375$ mètres.

3.6.6. Altitude moyenne du bassin H_{moy}

3.6.6.1. Calculée par formule

$$H_{moy} = \frac{\sum_1^i S_i H_i}{S}$$

Avec ;

S_i : Surface entre deux courbes (km^2)

H_i : Elévation moyenne entre deux courbes (m)

S : Surface totale du bassin (km^2)

Pour notre bassin versant de l'oued M'zab, les calculs ont donné une altitude moyenne $H_{moy} = 431,4$ mètres.

3.6.6.2. Calculée à partir du MNT

En traitant la grille de l'MNT de la région du M'zab par l'ArcGIS version 10 d'ESRI, on a construit l'histogramme de fréquence et calculé les nombres de valeurs d'altitude par classe (Tableau 06); qui nous permet de calculer l'altitude moyenne.

L'Altitude maximale du bassin versant du M'zab $H_{max} = 772$ mètres

L'Altitude minimale du bassin versant du M'zab $H_{min} = 124$ mètres

L'altitude moyenne du bassin est calculée par la formule suivante ;

$$H_{moy} = \frac{\sum N_i H_i}{\sum N_i}$$

Avec ;

N_i : le nombre de valeurs d'altitude par classe

H_i : la moyenne d'altitude de la classe

Tableau 06. – Nombre de valeurs d'altitude par classe d'altitude du bassin versant du M'zab

Altitude (m)		Nombre de N_i
Classe	H_i	
124 - 170	147	6583
170 - 225	197,5	32976
225 - 275	250	138576
275 - 345	310	153833
345 - 400	372,5	91504
400 - 450	425	76498
450 - 500	475	51596
500 - 550	525	41586
550 - 620	585	84732
620 - 685	652,5	93014
685 - 772	728,5	73919

L'application de la formule nous donne une altitude moyenne du bassin versant du M'zab **$H_{moy} = 434,2$ mètres**.

Nous retenons la valeur de **434,2 mètres** comme altitude moyenne du bassin versant de l'oued M'zab. Cette valeur est la plus précise, car elle est calculée directement du modèle numérique de terrain (MNT) de la zone.

On constate que l'altitude moyenne est supérieure à l'altitude de fréquence 1/2, ce qui montre une légère asymétrie des altitudes à l'échelle du bassin versant.

3.6.7. Indice de pente moyenne I_m

L'indice de pente donne une bonne indication sur le temps de ruissellement des eaux, il se calcule par le quotient du dénivelée totale par la longueur du rectangle équivalent, soit ;

$$I_m = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_r}$$

Avec ;

I_m : indice de pente moyenne (m/km)

H_{max} : altitude maximale du bassin versant (m)

H_{min} : altitude minimale du bassin versant (m)

L_r : longueur du rectangle équivalent (km)

Pour notre bassin versant du M'zab, le calcul qu'on a effectué à donner un indice de pente moyenne **$I_m=3,06$ m/km**.

3.6.8. Dénivelée utile D_u

Elle est déterminée directement de la courbe hypsométrique du bassin versant, tel que,

$$D_u = (H_{95\%} - H_{5\%})$$

Avec ;

$H_{95\%}$: altitude à laquelle la surface soit égale à 95% de la surface totale du bassin (m)

$H_{5\%}$: altitude à laquelle la surface soit égale à 5% de la surface totale du bassin (m)

D'après la courbe on a $H_{95\%} = 725\text{m}$ et $H_{5\%} = 150\text{m}$. La dénivelée utile déterminée pour le bassin versant de l'oued M'zab est $D_u = 575$ mètres.

3.6.9. Indice de pente globale I_G

L'indice de pente globale est l'un des plus utilisés, il sert de base à la classification d'O.R.S.T.O.M. il s'obtient à partir de la dénivelée utile ($D_u = H_{95\%} - H_{5\%}$) déterminée directement de la courbe hypsométrique du bassin versant.

$$I_G = \frac{D_u}{L_r} = \frac{(H_{95\%} - H_{5\%})}{L_r}$$

Avec ;

I_G : indice de pente globale (m/km)

D_u : dénivelée utile (m)

$H_{95\%}$: altitude à laquelle la surface soit égale à 95% de la surface totale du bassin (m)

$H_{5\%}$: altitude à laquelle la surface soit égale à 5% de la surface totale du bassin (m)

Les valeurs de $H_{95\%}$ et $H_{5\%}$ déterminées de la courbe hypsométrique sont respectivement, 723 et 225m.

Le bassin versant du M'zab a un indice de pente globale $I_G = 2,31$ m/km.

Tableau 7. - Classifications des reliefs selon l'indice de pente globale (O.R.S.T.O.M.)

<i>Classe</i>	<i>Relief</i>	<i>I_G</i>
R ₁	Relief très faible	$I_G < 2$
R ₂	Relief faible	$2 < I_G < 5$
R ₃	Relief assez faible	$5 < I_G < 10$
R ₄	Relief modéré	$10 < I_G < 20$
R ₅	Relief assez modéré	$20 < I_G < 50$
R ₆	Relief fort	$50 < I_G < 100$
R ₇	Relief très fort	$100 < I_G$

Selon la classification d'O.R.S.T.O.M. (tableau 7), le bassin versant du M'zab appartient à la classe R₂ ($2 < I_G < 5$) à relief faible.

3.6.9. Dénivelée spécifique D_s

La dénivelée spécifique dérive de la pente globale (I_G) en la corrigeant de l'effet de superficie. Sa détermination permet de définir les différents types de reliefs des bassins versants indépendamment de leurs superficies.

La dénivelée spécifique s'obtient en appliquant la formule ;

$$D_s = I_G \sqrt{S} = \frac{D_u}{L_r} \sqrt{L_r l_r} = D_u \sqrt{\frac{l_r}{L_r}}$$

La classification d'O.R.S.T.O.M. en fonction de la dénivelée spécifique, a défini sept classes (Tableau 8) ;

Tableau 8. – Classifications des reliefs selon la dénivelée spécifique (O.R.S.T.O.M.)

Classe	Relief	D_s
R ₁	Relief très faible	$D_s < 10$
R ₂	Relief faible	$10 < D_s < 25$
R ₃	Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
R ₄	Relief modéré	$50 < D_s < 100$
R ₅	Relief assez modéré	$100 < D_s < 250$
R ₆	Relief fort	$250 < D_s < 500$
R ₇	Relief très fort	$500 < D_s$

La dénivelée spécifique calculé pour le bassin versant du M'zab $D_s = 180,40m$.

D'après les classifications de l'O.R.S.T.O.M. , notre bassin versant appartient à la classe R₅ ($100 < D_s < 250$) à relief assez modéré.

3.6.10. Etude des pentes

La pente est un facteur capital régissant le régime des écoulements superficiels, ainsi que la dynamique de l'érosion au sien du bassin versant.

A partir du modèle numérique de terrain de la région d'étude et en exploitant les outils puissants de l'ArcGIS 10 d'ESRI (Toolbox-Spatial Analyst-Surface), nous avons pu réaliser une carte des pentes du bassin versant de l'oued M'zab (Fig. 23), sur laquelle cinq classes de pentes ont été mises en évidence (fig. 22) ;

- Classe A, de pentes variant entre 0° et 0,6°
- Classe B, de pentes variant entre 0,6° et 2,8°
- Classe C, de pentes variant entre 2,8° et 5°
- Classe D, de pentes variant entre 5° et 7,5°
- Classe E, de pentes variant entre 7,5° et 25°.

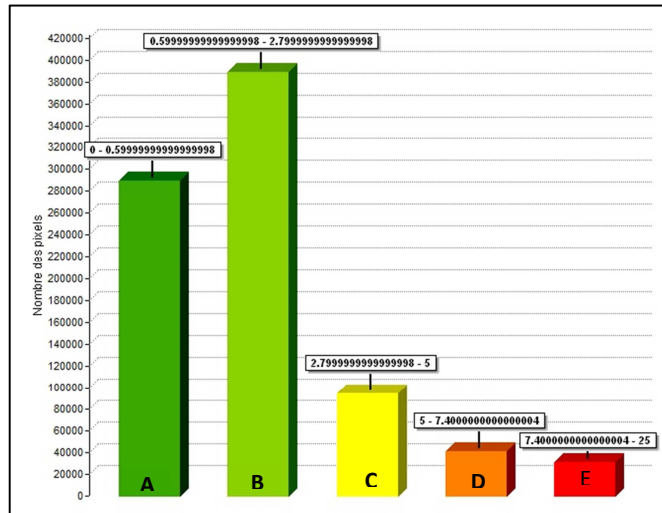


Figure 22 - Histogramme de fréquence des pentes du bassin versant de l'oued M'zab

La carte des pentes du bassin versant du M'zab montre que les valeurs les plus élevées sont localisées dans la partie occidentale de [5 à 7,4]°, elles correspondent au relief du massif calcaire turonien de la dorsale du M'zab à chevelu orographique dense. Les fortes pentes atteignant jusqu'à 25° représentent les versants abruptes de l'oued M'zab à son passage au niveau du massif calcaire du Turonien.

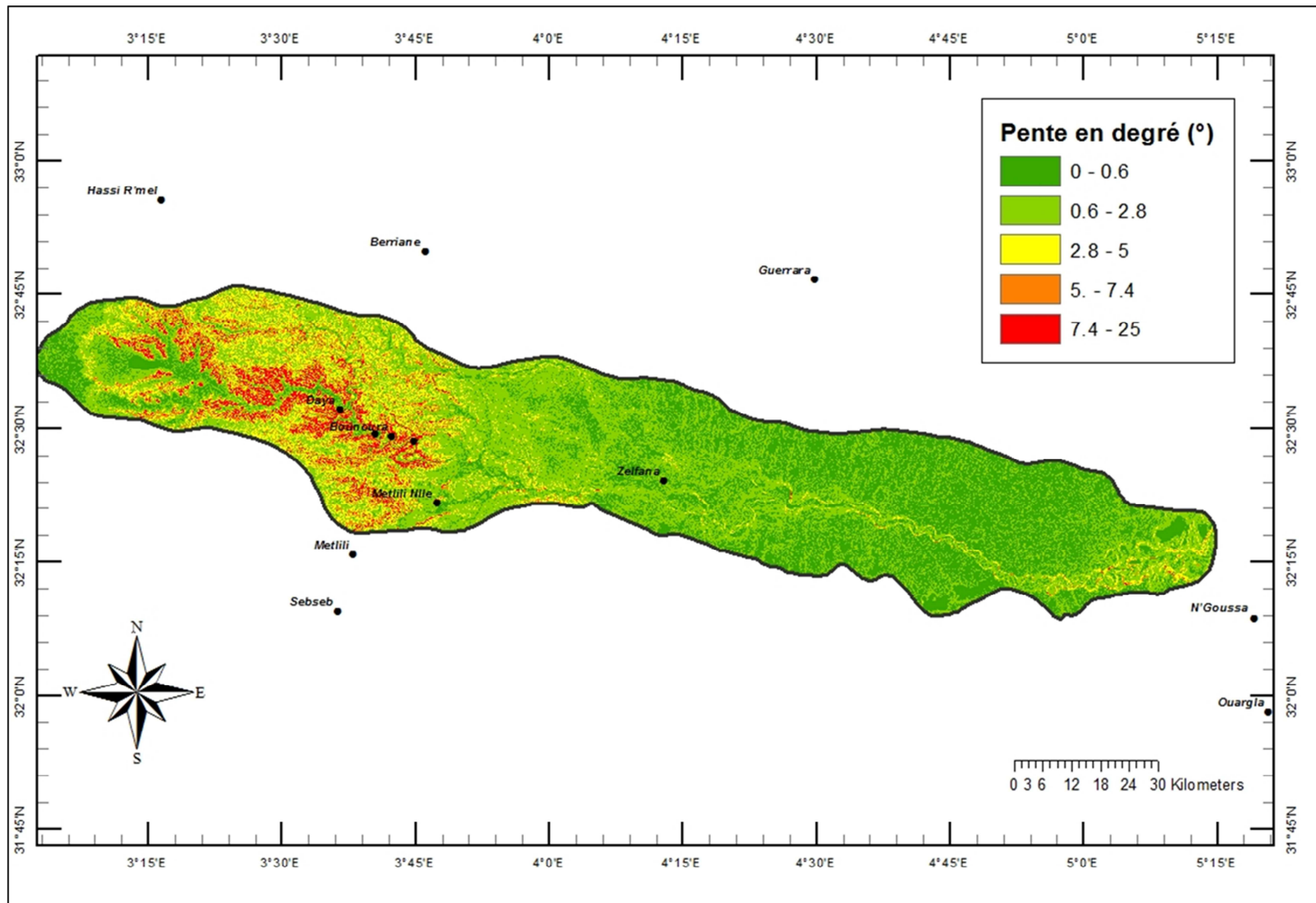


Figure 23 - Carte des pentes du bassin versant de l'oued M'zab

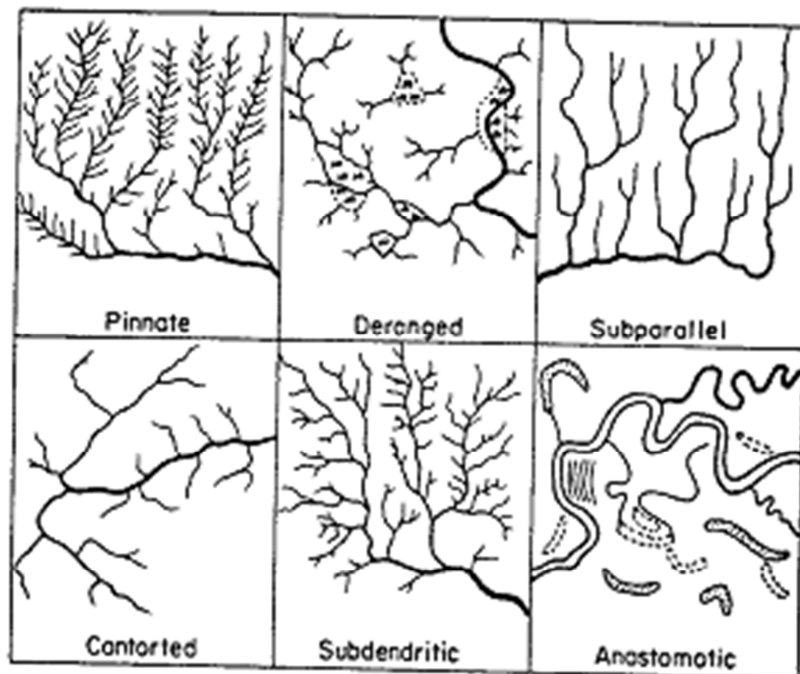
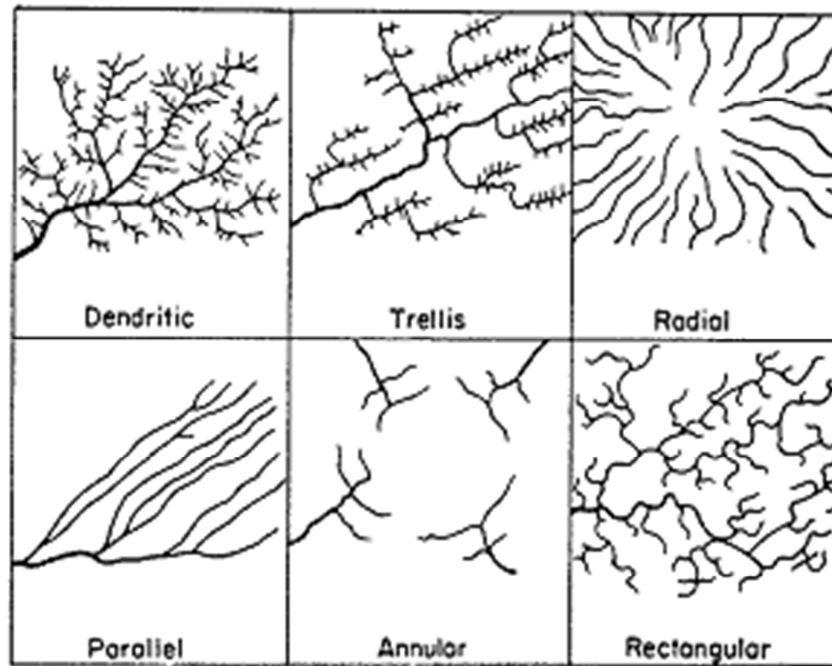


Figure 24 - Exemples de structure des chevelus hydrographiques en plan

3.7. Temps de concentration T_c

Le temps de concentration T_c est considéré comme un temps caractéristique de l'écoulement sur un bassin versant donné. Il est défini comme le temps que met l'eau tombée au point le plus éloigné en amont du bassin versant pour atteindre l'exutoire.

Le temps de concentration est composé de :

Temps d'humectation (T_h) :

Temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle.

- *Temps de ruissellement et d'écoulement (T_r) :*

Temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface ou dans les premiers horizons de sol jusqu'au système de collecte d'eau naturel (thalwegs).

- *Temps d'acheminement T_a :*

Temps de cheminement de l'eau du système de collecte (thalwegs) jusqu'à l'exutoire.

On considère, théoriquement, que le temps de concentration représente la durée comprise entre la fin de la pluie nette tombée sur le bassin et la fin du ruissellement. Il est déduit par des mesures *in situ* sur le bassin, comme il peut être estimé par des formules empiriques.

Pour estimer le temps de concentration de notre bassin, et face aux nombreuses formules empiriques existantes, on a décidé d'utiliser les trois formules suivantes ;

3.7.1. Formule Algérienne (1992)

Cette formule a été élaborée à partir de l'analyse des événements averse-crues, relevés sur plus de 15 bassins versants du pays.

$$T_c = 0,0055.S + 0,1657.L_t + 0,0078.D_H + 0,821$$

Avec ;

T_c : temps de concentration (h)

S : surface du bassin (km^2)

L_t : Longueur du cours d'eau principal (km)

D_H : différence entre l'altitude moyenne et l'altitude minimale du Bassin Versant (m).

L'application numérique, nous donne pour le bassin versant du M'zab un temps de concentration $T_c=86,8$ heures, soit 3 jours et 6 heures. Cette valeur du temps est relativement élevée, se prouve par la forme très allongée du bassin versant.

3.7.2. Formule de Giandotti

$$T_c = \frac{4.\sqrt{S} + 1,5.L_t}{0,8.\sqrt{D_H}}$$

Avec ;

- S: Superficie du bassin (km²)
- L_t: Longueur du thalweg principal (km)
- D_H: différence entre l'altitude moyenne et l'altitude minimale du BV (m)

Après l'application numérique nous obtenons **Tc = 54,3** heures, soit 2 jours et 3 heures.

3.7.3. Formule SCS (Soil Conservation Service)

$$T_c = \left[\frac{0,87.L_t^3}{H} \right]^{0,385}$$

Avec ;

- L_t: longueur du thalweg principal (km)
- H: différence de cote entre les points extrêmes du thalweg principal (m).

Après l'application numérique nous obtenons Tc = **57,2** heures, soit 2 jours et 4h.

Comme temps de concentration du bassin versant de l'oued M'zab, on va prendre en considération la valeur moyenne, donc **Tc = 66,1** heures, soit 2 jours et 8 heures.

3.8. Vitesse d'écoulement de l'eau (V_c)

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_c = \frac{L_t}{T_c}$$

Après l'application, nous obtenons une vitesse d'écoulement de l'eau dans le bassin versant du M'zab **V_c=1,27m/s**.

Le tableau 09 ci-dessous récapitule les paramètres morphométriques et géométriques obtenus du bassin versant de l'oued M'zab.

Tableau 09. – Récapitulatif des paramètres physiographiques du bassin versant de l'oued M'zab

Caractéristiques géométriques du bassin versant		
Surface du bassin	S	6114,74 km ²
Périmètre du bassin	P	480,88 km
La plus grande longueur du bassin	L _{max}	211,3 km
La plus grande largeur	l _{max}	40,23 km
Distance Exutoire-Centre de gravité	Dg	105,6 km
Longueur du plus long thalweg	Lt	301,40 km
Centre de gravité du bassin	Cg	(04°08'28", 32°27'28")
Longueur du rectangle équivalent	Lr	211,53 km
Largeur du rectangle équivalent	lr	28,91 km
Coefficient de compacité de Gravelius	K _G	1,72
Caractéristiques du chevelu hydrographique du bassin versant		
Nombre d'ordre des thalwegs		6
Nombre total des thalwegs		2744
Longueur totale des thalwegs	L	5494,40 km
Rapport de confluence	Rc	4,731
Rapport de longueur moyenne	R _L	4,273
Densité des thalwegs élémentaires	F ₁	0,36 thalwegs/km ²
Densité de drainage	D _d	0,899 km/km ²
Coefficient de torrentialité	Ct	0,33
Temps de concentration	Tc	
- Formule algérienne (1992)	Tc ₁	86,8 heures
- Formule de Giandotti	Tc ₂	54,3 heures
- Formule SCS	Tc ₃	57,2 heures
Vitesse d'écoulement de l'eau	Vc	1,27 m/s
Lame d'eau ruisselée (Fersi (1979b))	L _R	2,08mm (12,7 Mm ³ /an)
Caractéristiques de relief du bassin versant		
Indice de pente de Roche	I _p	1,68
Indice de pente moyenne	I _m	3,06 m/km
Indice de pente globale	I _G	2,31 m/km
Dénivelée spécifique	Ds	180,40 m
Dénivelée utile	Du	575 m
Altitude de fréquence du bassin	H _{50%}	375 m
Altitude maximale du bassin	H _{max}	772 m
Altitude minimale du bassin	H _{min}	124 m
Altitude moyenne du bassin (formule)	H _{moy}	431,4 m
Altitude moyenne du bassin (MNT)	H _{moy}	434,2 m

CHAPITRE IV

ENVIRONNEMENT CLIMATOLOGIQUE

4.1. Les conditions climatiques de la région

L'intérêt de l'étude des conditions hydroclimatiques réside principalement, à l'estimation du bilan hydrique d'un système hydraulique, où la pluviométrie demeure le paramètre le plus important, car elle conditionne l'écoulement superficiel des cours d'eau, l'infiltration dans le sous-sol et par-delà l'alimentation des nappes d'eau souterraines.

Les stations météorologiques étudiées dans notre zone concernent celle de ; Ghardaïa localisée approximativement au centre du bassin, Hassi R'mel située à l'extérieur du bassin à environ 20km de l'amont, et Ouargla à 10 km de l'aval à l'extérieur du bassin versant. L'altitude des stations varie de 764m à Hassi R'mel, 136m à Ouargla, en passant par la station de Ghardaïa à 450m.

L'emplacement ainsi de ces stations, nous permettra de suivre ipso facto l'évolution du régime climatique le long du bassin en espace qu'en altitude.

Tableau 10. – Stations pluviométriques

<i>Station</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Altitude</i>
SP ₁ – Hi R'mel	32,93N	3,28E	764m
SP ₂ – Ghardaïa	32,40N	3,81E	450m
SP ₃ – Ouargla	31,93N	5,40E	136m

Les données ont été tirées des annuaires de l'Office Nationale de la Météorologie (ONM), après leur examen, on révèle que les trois stations Hassi R'mel, Ghardaïa, Ouargla, présentent des séries complètes allant successivement, de 1998 à 2008, 1986 à 2009 et 1990 à 2009.

4.2. Température

La température est un facteur important régissant les conditions climatiques, il intervient essentiellement dans l'évaluation du déficit d'écoulement.

L'analyse des températures sera faite à partir des données recueillies de l'ONM pour les stations de Hassi R'mel (1998/08), Ghardaïa (1990/09) et Ouargla (1990/09).

4.2.1. Température moyenne annuelle

Dans un climat aride comme le nôtre, les valeurs de la température moyenne annuelle ne semblent guère remporter une grande signification. Seules, les températures moyennes mensuelles ainsi que les amplitudes thermiques peuvent remporter quelques indications sur l'aridité de la région, et aussi les conditions auxquelles sont soumis les différents éléments de l'écosystème.

Les valeurs moyennes annuelles enregistrées pour la période considérée sont, 21°C à Hassi R'mel, 22,3 °C à Ghardaïa et 23,3 °C à Ouargla. Il apparait nettement que Hassi R'mel est la plus froide, par contre la station de Ouargla est la plus chaude. Ceci peut s'expliquer par les effets conjugués de l'altitude et de la latitude des trois stations.

4.2.2. Température moyenne mensuelle

Le tableau ci-dessous récapitule les températures moyennes mensuelles des stations de Hassi R'mel, Ghardaïa et Ouargla (Tableau 11).

Tableau 11. – Température moyenne mensuelle et annuelle

Température (°C)	Sp	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Mr	Av	Ma	Jn	Jt	At	Année
Hi R'mel	28,5	19,4	12,3	8,6	10,2	12,5	16,3	21,6	25,5	29,5	33,3	34,2	21,0
Ghardaïa	28,8	22,9	16,2	11,7	10,7	13,1	16,8	20,6	25,9	31,0	34,4	33,9	22,3
Ouargla	30,7	24,6	16,9	12,3	11,8	13,6	18,0	22,6	27,5	32,5	34,8	34,1	23,3

Du tableau ci-dessus il ressort que, pour les stations de Ghardaïa et Ouargla, la période chaude s'étend du mois de mai à octobre, pendant lesquels les températures mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle. La période froide commence du mois de novembre jusqu'au mois d'Avril. A l'exception de la station de Hassi R'mel où la période chaude débute du mois d'avril jusqu'au mois de septembre, et la période froide s'étend du mois d'octobre jusqu'au mois de mars (fig. 24).

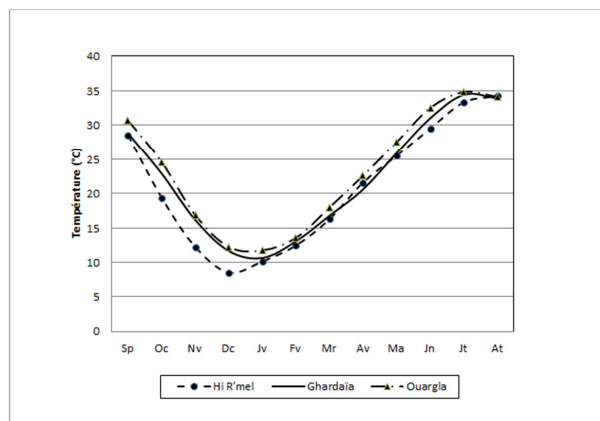


Figure 25 - Variation de la température mensuelle moyenne

4.2.3. Température extrême

Les écarts observés dans les valeurs de la température mensuelles nous incitent à étudier la dispersion des températures extrêmes moyennes. Nous indiquons ci-dessous la moyenne mensuelle des maximas et des minimas.

Tableau 12. – Températures moyennes extrêmes

Station	T (°C)	Sp	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Mr	Av	Ma	Jn	Jt	At
Hi R'mel	T _{max}	32,6	27,4	19,0	14,6	14,0	16,6	21,7	25,4	30,7	35,8	39,6	38,5
	T _{min}	19,4	15,2	7,4	3,7	1,9	4,1	8,2	11,5	16,6	21,6	25,1	24,3
	Ecart	13,2	12,2	11,6	10,9	12,1	12,5	13,5	13,9	14,1	14,2	14,5	14,2
Ghardaïa	T _{max}	34,9	28,8	21,9	17,1	16,3	18,9	22,9	26,8	32,2	37,3	40,8	40,1
	T _{min}	22,6	17,4	11,1	7,0	5,9	7,6	10,8	14,1	19,1	23,9	27,2	27,1
	Ecart	12,3	11,4	10,8	10,0	10,4	11,3	12,1	12,7	13,1	13,4	13,6	13,0
Ouargla	T _{max}	37,6	31,6	23,7	19,0	18,7	20,8	25,5	30,0	34,8	39,0	42,4	42,9
	T _{min}	23,6	17,6	10,1	5,8	4,9	6,5	10,1	15	19,9	24,8	27,7	27,3
	Ecart	14,0	14,0	13,6	13,2	13,8	14,3	15,4	15,0	14,9	14,2	14,7	15,6

La figure 26 ci-dessous, représente la variation mensuelle des températures moyennes extrêmes (maximas et minimas) de Hassi R'mel, Ghardaïa et Ouargla.

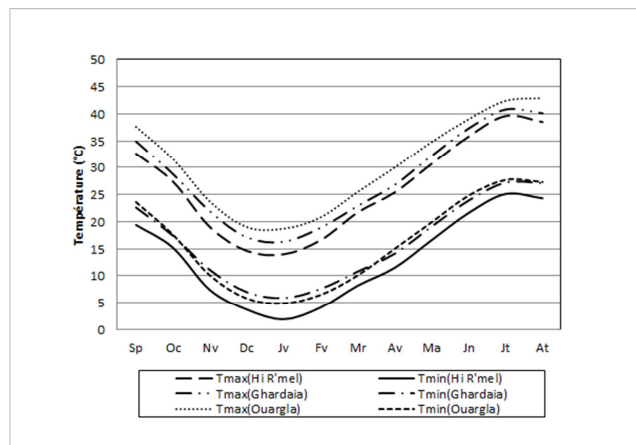


Figure 26 - Variation des températures extrêmes moyennes mensuelles

En étudiant le tableau et les courbes ci-dessus, on constate que ;

- Les valeurs des températures maximales sont les plus élevées en mois de juillet et août (39,6 – 42,4 °C).
- Les valeurs les plus faibles des minimales sont enregistrées en mois de décembre et janvier (1,9 – 7,0 °C).
- Les écarts de la température sont en générale assez élevées variant entre 10 à 15,6 °C.
- Les plus fortes amplitudes thermiques sont rencontrées en période estivale oscillant entre 13 à 15 °C. Ceci est l'une des caractéristiques du climat du domaine continental du Sahara septentrional.

Tableau 13. – Valeurs caractéristiques de la température mensuelle

Station	Température (°C)		
	maximum	minimum	moyenne
Hi. R'mel	39,6	1,95	20
Ghardaïa	40,5	5,53	22,2
Ouargla	42,9	4,9	23,3

4.2.4. L'amplitude thermique

Il représente l'écart entre la température du mois le plus chaud et celle du mois le plus froid de l'année.

Le tableau ci-dessous résume les moyennes des amplitudes thermiques des différentes stations.

Tableau 14. – Calcul de l'amplitude thermique des stations

Station	T_{moy} (°C)	Amplitude (°C)
Hi. R'mel	20,0	25,6
Ghardaïa	22,2	22,7
Ouargla	23,3	23,0

L'amplitude thermique à la station de Hassi R'mel est de 25,6°C, moins élevé à la station de Ghardaïa avec 22,7°C pour atteindre une valeur de 23°C à la station de Ouargla.

La répartition spatiale d'amplitude thermique nous montre une diminution progressive le long du bassin versant de l'oued M'zab de l'amont vers l'aval. Ceci indique l'influence de la continentalité sur ce facteur, ainsi que le contraste thermique entre l'amont et l'aval du bassin versant de l'oued M'zab.

4.3. L'humidité relative

L'humidité relative représente le rapport de la tension de vapeur à la tension maximum correspondant à la même température.

Les données recueillies de la station de Ghardaïa donnent une moyenne annuelle de l'ordre de 39,2% (Tableau IV).

Les moyennes mensuelles varient de 46,6% à 58,1% en hiver et de 22,9 à 26,2% en été.

Tableau 15. – L'humidité moyenne mensuelle et annuelle (station de Ghardaïa)

Mois	Sp	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Mr	Av	Ma	Jn	Jt	At	Année
Humidité (%)	34,5	44,0	52,8	58,1	56,3	46,6	40,4	34,7	29,9	26,2	22,9	24,4	39,2

Grosso modo, on constate que les valeurs de l'humidité mensuelle sont inversement proportionnelles à la température moyenne mensuelle. La température, parmi d'autres facteurs, demeure le principal facteur influençant sur la capacité de l'air à contenir de l'eau.

4.4. Le vent et le sirocco

Le vent est un des facteurs caractéristiques du climat. Il se caractérise par sa vitesse et sa direction. La région de Ghardaïa est régie d'une part, par les circulations des masses d'air propres à la méditerranée occidentale amenant l'humidité de l'Atlantique nord, et d'autre part, à l'ouverture des vents sahariens chauds (Sirocco).

Les vents dominants soufflent du Nors-Ouest. Les vitesses moyennes mensuelles observées au niveau de la station de Ghardaïa, montrent une répartition assez régulière comprise entre 3,3 et 4,8 m/s sur toute l'année, ce qui les classe dans la catégorie des vents modérés.

Tableau 16. – Vitesse moyenne du vent à la station de Ghardaïa

Mois	Sp	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Mr	Av	Ma	Jn	Jt	At	Année
Vitesse moy (m/s)	3,6	3,2	3,3	3,5	3,6	3,7	4,4	4,8	4,5	4,2	3,6	3,3	3,8

Les vitesses les plus élevées s'observent en printemps avec des pics en mois d'avril de 4,8 m/s. En période sèche le sirocco prédomine, il s'agit d'un vent sec et chaud qui souffle du continent vers la méditerranée desséchant ainsi l'atmosphère.

4.5. Les précipitations

La faiblesse et l'irrégularité des précipitations sont les principaux facteurs du climat saharien. Une pluie peut tomber durant toute l'année, et pendant le même mois des années de sécheresse peuvent se produire (J. Dubief, 1953).

Les systèmes perturbants entraînant des précipitations sur la région sont liés, généralement, aux déplacements des fronts polaires, méditerranéens et des alizés méridionaux. Les précipitations engendrées peuvent être des importantes averses orageuses.

J. Dubief (1953) a localisé notre région entre l'isohyète 100 et 50mm (Fig.27). Conventionnellement, l'isohyète 100mm est pris comme limite nord du domaine du désert. Le trait essentiel qui s'en dégage, une évolution latitudinale des précipitations avec une diminution du Nord vers Sud.

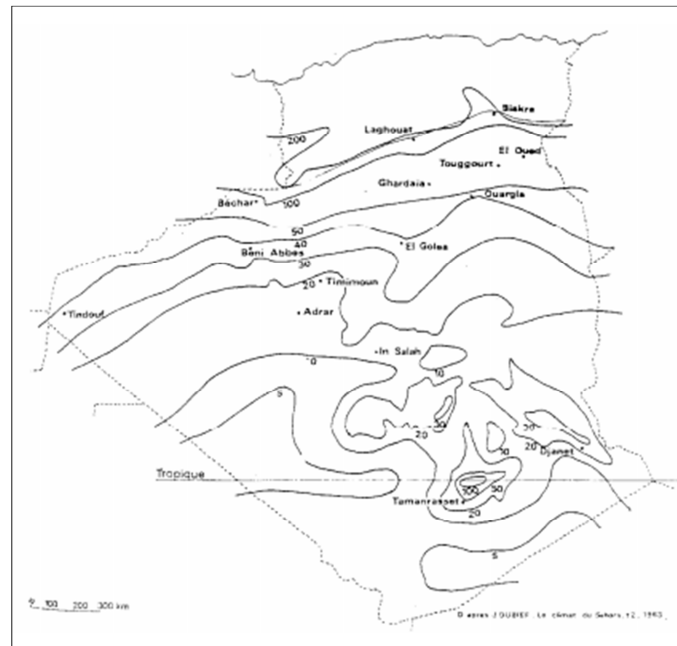


Figure 27 - Carte des isohyètes (J. Dubief, 1953)

4.5.1. Moyennes annuelles des précipitations

Les moyennes annuelles calculées au niveau des stations de Hassi R'mel, Ghardaïa et Ouargla sont mentionnées sur le tableau 17 ci-dessous. On observe une moyenne annuelle plus élevée de la pluviosité à Hassi R'mel 115,5mm, la plus faible étant à Ouargla avec 37mm. Ceci est conforme au schéma général, la station de Hassi R'mel qui en position plus au Nord. Par contre celle de Ouargla est plus au Sud.

La valeur moyenne enregistrée à Ghardaïa est de l'ordre de 80,6 mm/an.

Tableau 17. - Précipitations moyennes annuelles

Station	Altitude (m)	Période	Moyenne annuelle (mm)
Hi R'mel	764	1998-2008	115,5
Ghardaïa	450	1986-2009	80,6
Ouargla	136	1990-2009	37,1

4.5.2. Moyennes mensuelles des précipitations

Le tableau 18 et la figure 28 ci-dessous montrent la répartition des hauteurs moyennes mensuelles des précipitations pour les trois stations considérées.

Tableau 18. - Précipitations moyennes mensuelles

Précipitations (mm)	Sp	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Mr	Av	Ma	Jn	Jt	At	Année
Hi R'mel	17,5	21,6	11,2	13,6	20,4	2,9	3,6	8,1	3,5	6,0	1,4	5,7	115,5
Ghardaïa	16,3	8,2	7,6	4,9	10,9	3,3	9,2	7,4	3,3	3,4	1,0	5,1	80,6
Ouargla	3,7	8,3	7,0	2,0	5,6	1,3	4,3	1,6	1,2	0,1	0,6	1,4	37,1

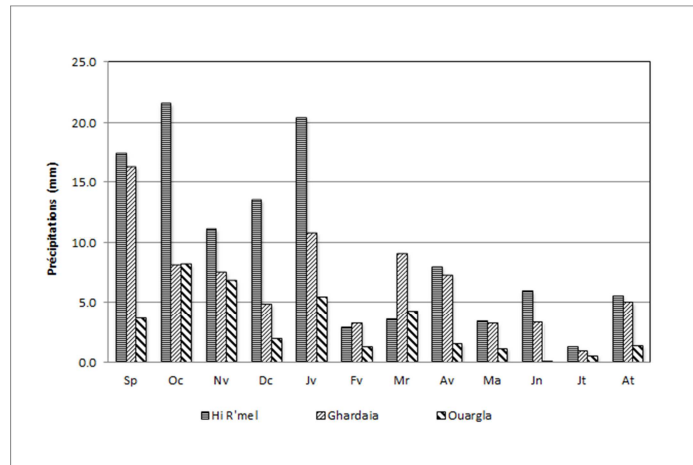


Figure 28 - Variation mensuelle moyenne de la hauteur des pluies

On constate clairement l'irrégularité de la pluie mensuelle sur les différentes stations. La période allant du mois de septembre jusqu'au mois de janvier est la plus arrosée de toute l'année. Les faibles hauteurs de la pluie sont enregistrées en été.

Sur les trois stations pluviométriques étudiées, seule la station de Hassi R'mel, suite à sa position latitudinale et son altitude élevée, paraît la plus humide.

4.5.3 Ajustement à une loi statistique

Une analyse statistique des totaux annuels des précipitations de la station de Ghardaïa a été réalisée sur une série de 24 années (1986/2009) à l'aide du programme informatique HYDROGNOMON, qui ajuste les lois statistiques sur des variables hydro-pluviométriques (Tableau 19).

Tableau 19 – Valeurs caractéristiques de la série des précipitations (Ghardaïa 1986/2009)

Paramètres	Valeur
Taille de la série	24
Moyenne arithmétique	80,57
Standard déviation	55,26
Skewness (asymétrie)	1,60
Kurtosis (aplatissement)	2,26
Médiane	62,2
Moyenne log(P)	4,193
Standard déviation log(P)	0,635

La loi log-normale donne les meilleurs critères d'ajustement statistique de la série. Les données sont portées sur un diagramme de Gauss, sur lequel l'axe des abscisses représente les probabilités et l'axe des ordonnées les logs des modules pluviométriques. Les bornes ; supérieure et inférieure représentent les limites de l'intervalle de confiance à 95% (fig. 29).

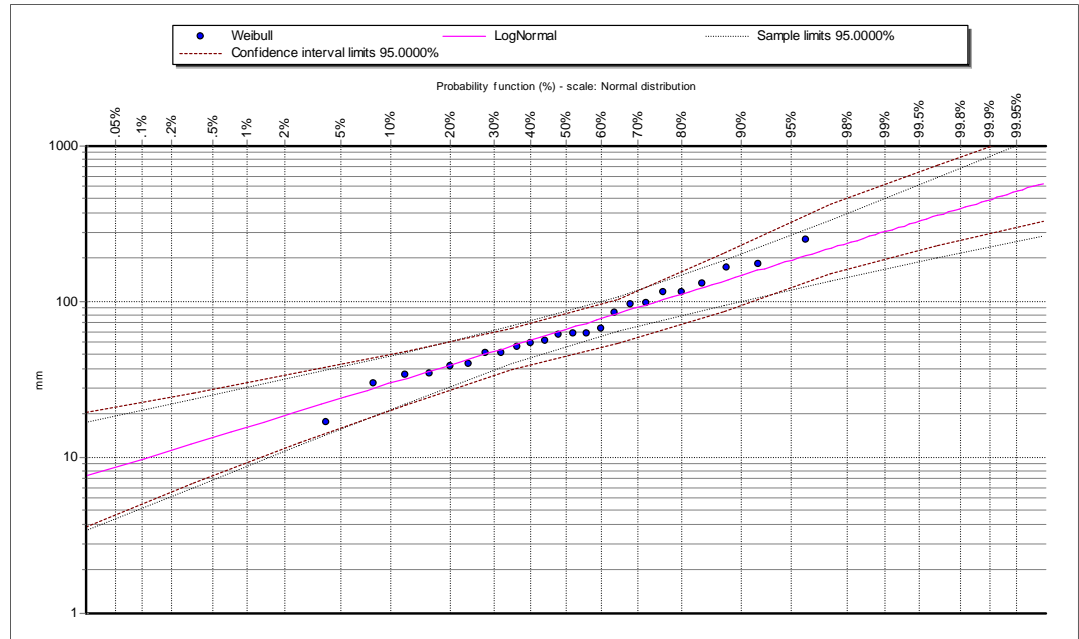


Figure 29 - Ajustement des précipitations annuelles à une loi log-normale (Ghardaïa 1986/2009)

Par cette méthode, nous avons également évalué les fréquences au non dépassement et les temps de retour dont les résultats sont illustrés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 20 – Périodes de retour des valeurs caractéristiques (Ghardaïa 1986/2009)

Temps de retour (an)	Pluie (mm)
5	39,4
10	29,9
50	18,5
100	15,6

4.6. Evaporation

L'évaporation est un élément climatique important à considérer, compte tenu de son rôle dans des divers processus hydro-climatiques, notamment son influence sur les précipitations. Elle est exprimée en millimètres d'eau évaporée.

Dans le tableau ci-dessous, sont figurées les valeurs moyennes mensuelles de la station de Ghardaïa pour la période de 1990/2009.

Tableau 21. -Evaporation moyenne mensuelle et annuelle (station de Ghardaïa)

Mois	Sp	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Mr	Av	Ma	Jn	Jt	At	Année
Evaporation (mm)	305,0	215,6	138,0	142,0	110,4	138,0	201,3	266,1	329,8	397,9	452,4	413,4	3110

On constate généralement des valeurs élevées (398 - 413 mm) pendant les périodes chaudes (Juin, juillet et aout). Les valeurs les moins élevées sont enregistrées au cours du mois de janvier.

L'évaporation annuelle à la station de Ghardaïa est de l'ordre de 3110 mm.

4.7. Les indices climatiques

Les indices climatiques permettent d'étudier les combinaisons arithmétiques des différents éléments du climat. Ils se basent en général sur les moyennes des paramètres météorologiques, tels que ; la température, la pluviométrie, l'humidité

Les indices les plus connues et auxquels nous avons eu recours dans notre étude sont ceux ;

- Emmanuel de De Martonne (1923), traitant l'aridité
- Quotient pluviométrique d'Emberger-Stewart (1969)
- la représentation graphique de Bagnouls-Gausson (1957) traitant la sécheresse
- la représentation graphique de Peguy.

4.7.1. Indice de De Martonne (I_{DM})

Cette formule est caractérisée par sa simplicité dans laquelle le chiffre 10 ajouté à la température, permet d'éviter d'avoir un indice négatif. L'indice est d'autant plus grand que le climat est plus humide.

$$I_{DM} = \frac{P}{T + 10}$$

Avec ;

P : précipitations annuelles (mm)

T : les températures moyennes annuelles (°C).

Nous avons appliqué cette formule aux trois stations climatiques couvrant notre zone d'étude ; nous avons obtenu la classification suivante (Tableau 22 et 23);

Tableau 22 – Calcul de l'indice de De Martonne pour les 03 stations

Station	Indice I_{DM}
Hi. R'mel	3,85
Ghardaïa	2,50
Ouargla	1,11

Tableau 23 – Classification de De Martonne

Indice I_{DM}	Type de climat
$0 < I_{DM} < 5$	Hyper - aride
$5 < I_{DM} < 7,5$	Aride
$7,5 < I_{DM} < 10$	Steppique
$10 < I_{DM} < 20$	Semi - aride
$20 < I_{DM} < 30$	Tempéré

En plaçant les indices calculés sur le tableau De Martonne, on s’aperçoit que toutes les stations étudiées sont régies d’un climat hyper aride.

4.7.2. Indice xérothermique de Bagnouls et Gausson (I_x)

Ce diagramme ombro-thermique fait intervenir les pluies et les températures moyennes mensuelles. Selon les auteurs, un mois est dit sec si le total mensuel des précipitations en mm est égal ou inférieur au double à la température mensuelle moyenne : $P \leq 2T$.

La formule permet de construire des diagrammes ombro-thermique traduisant la durée de la saison sèche d’après les intersections des courbes.

Il en résulte que la saison sèche s’étend durant toute l’année où la courbe de la pluie demeure largement écartée de celle de la température. A l’exception de celle de Hassi R’mel où une courte période humide est observée durant le mois de janvier (Fig.30, 31 et 32).

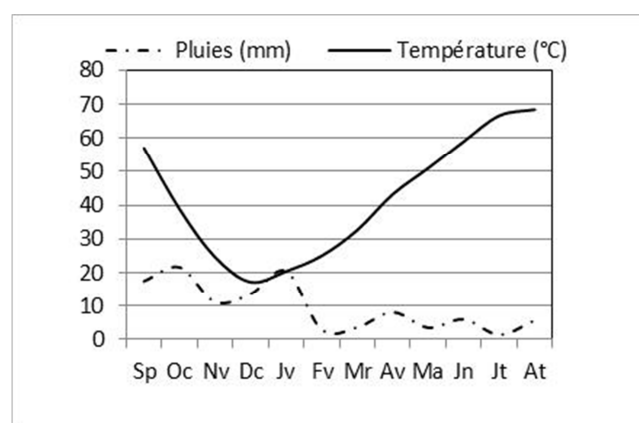


Figure 30 - Diagramme ombrothermique (Station de Hassi R’mel)

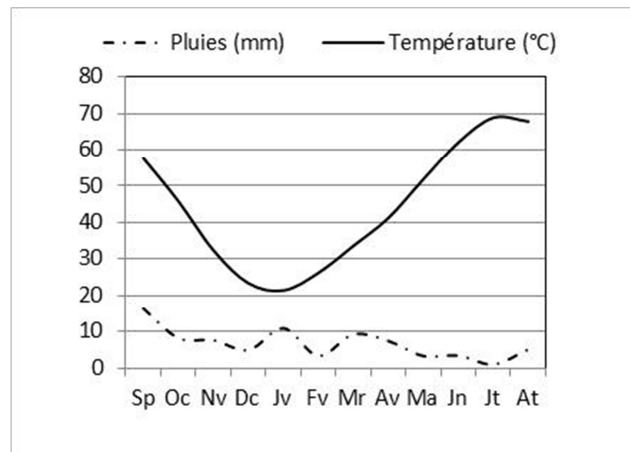


Figure 31 - Diagramme ombrothermique (Station de Ghardaïa)

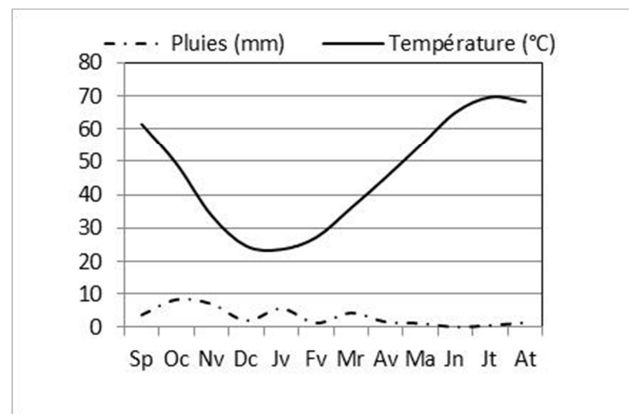


Figure 32 - Diagramme ombrothermique (Station de Ouargla)

4.7.3. Quotient pluviométrique d'Emberger

Pour l'étude du climat méditerranéen, Emberger en 1939, préconisa l'emploi d'un climagramme synthétisant les différents types de climats aux quels sont associés des groupes végétaux de même aptitude écologique, appelés étages bioclimatiques.

- Sur l'axe des ordonnées est portée la valeur du quotient pluviométrique (Q_2), qui se calcule par la formule suivante ;

$$Q_2 = \frac{P}{\frac{M + m}{2} (M - m)} 1000$$

Avec ;

- Q_2 : quotient pluviométrique d'Emberger
- M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (en kelven)
- m : moyenne des minima du mois le plus froid (en kelven)
($1^\circ\text{k} = 1^\circ\text{C} + 273,2$).

- Sur l'axe des abscisses, est portée la valeur de m .

La formule du Q_2 du climagramme a été, par la suite, améliorée par SAUVAGE en 1963, puis par STEWART en 1969., qui parait la plus adaptée pour l'Algérie ;

$$Q_2 = 3,43 \cdot \left(\frac{P}{M - m} \right)$$

Après calcul nous obtenons les résultats reportés dans le tableau ci-dessous ;

Tableau 24 - Calcul des valeurs du quotient pluviométrique Q_2

Station	P (mm)	M (°k)	m (°k)	Q_2
Hi. R'mel	115,5	312,8	275,1	10,50
Ghardaïa	80,6	314	279,1	7,92
Ouargla	37,1	315,6	278,1	3,39

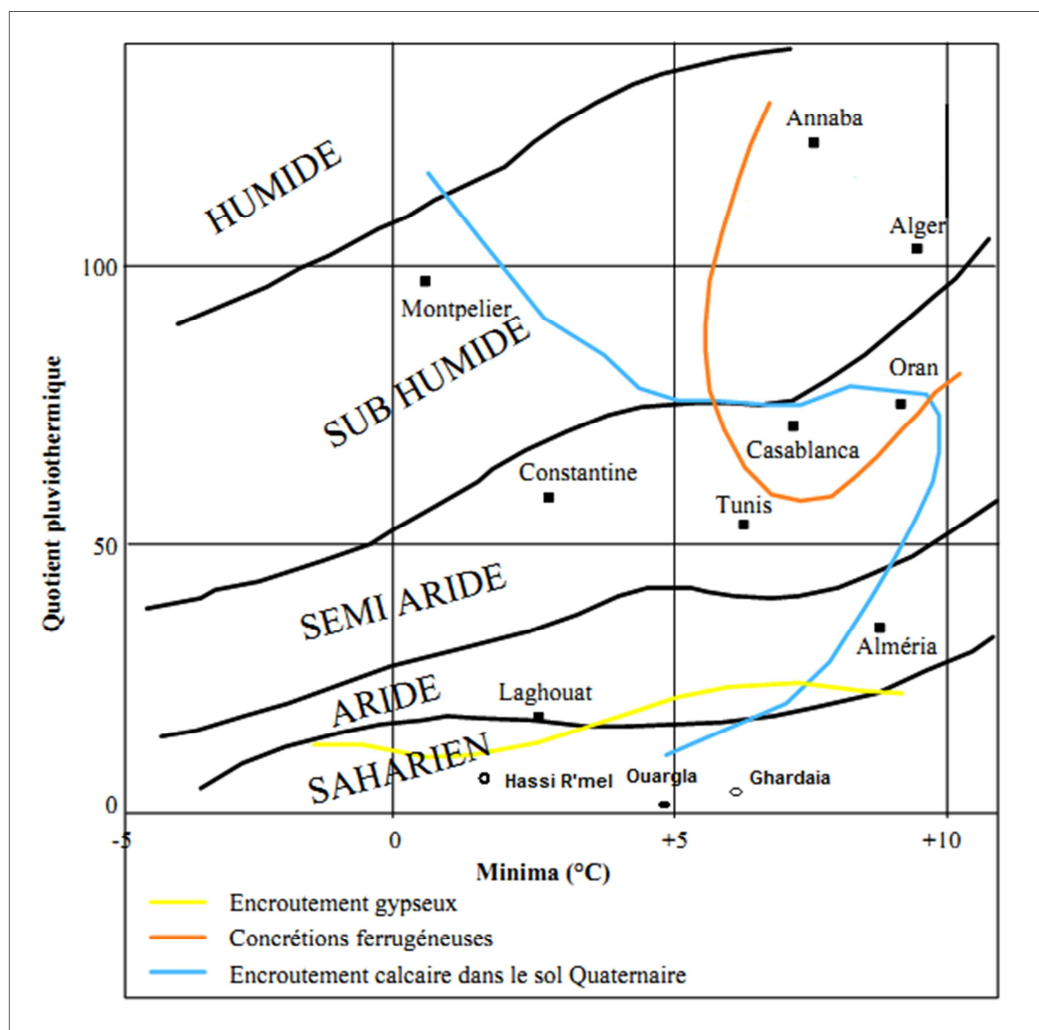


Figure 33 - Climagramme du quotient pluviométrique (Q_2) d'Emberger des stations d'étude

Le report des valeurs du quotient pluviométrique des stations de Hassi R'mel, Ghardaïa et Ouargla sur l'abaque d'Emberger, indique l'influence du régime saharien sur toute les stations. De même, l'abaque nous révèle la fréquence des concrétions gypseuses et les encroutements calcaires dans le sol Quaternaire au niveau de Ghardaïa et Ouargla (fig. 33).

4.7.4. Climatogramme de Peguy

Cette méthode permet de déterminer le régime climatique d'une région. En abscisses du graphe sont portées les températures moyennes mensuelles, et en ordonnées les précipitations enregistrées.

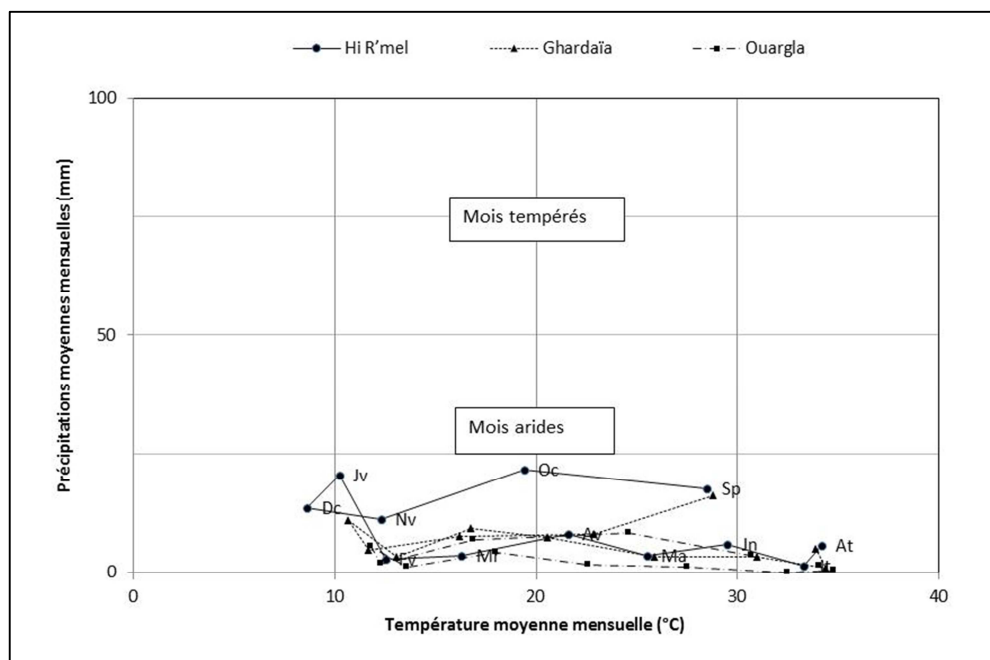


Figure 34 - Climagramme de Peguy

Appliquée aux stations de Hassi R'mel, Ghardaïa et Ouargla, le climatogramme révèle que toutes les stations sont prédominées par un climat aride (fig. 34). Hassi R'mel parait la zone la plus humide notamment du mois de septembre jusqu'au mois de janvier. Son période hivernale est légèrement plus froide (> 10°C en Décembre). Ghardaïa et Ouargla sont les zones les moins humides.

4.8. lame d'eau tombée sur le bassin versant

4.8.1. Méthode des polygones de Thiessen

Basée uniquement sur les pluies observées aux pluviomètres, la méthode consiste d'attribuer à chaque pluviomètre un poids proportionnel à une zone d'influence définie géométriquement. Les surfaces de ces zones sont déterminées par le réseau des médiatrices des segments joignant les postes deux à deux.

La hauteur de pluie choisie est celle relevée à la station située à l'intérieur du polygone, tous en considérant les précipitations uniformément réparties. La lame d'eau tombée sur le bassin est égale à :

$$P = \frac{\sum(P_i S_i)}{S}$$

Avec ;

P_i : précipitations au poste pluviométrique i

S_i : surface du polygone

S : surface totale du bassin versant

Tableau 25. - Calcul de la lame d'eau tombée (méthode de Thiessen)

Station	Surface des polygones (km ²)		$P_i \cdot S_i$
Hi. R'mel	S1	979,50	113132,3
Ghardaïa	S3	3670,50	295842,3
Ouargla	S2	1464,63	54337,8
	<i>Total</i>	6114,63	463312,3

Nous obtenons ainsi une valeur de la lame d'eau précipitée sur le bassin versant du M'zab de l'ordre de **76 mm** par an.

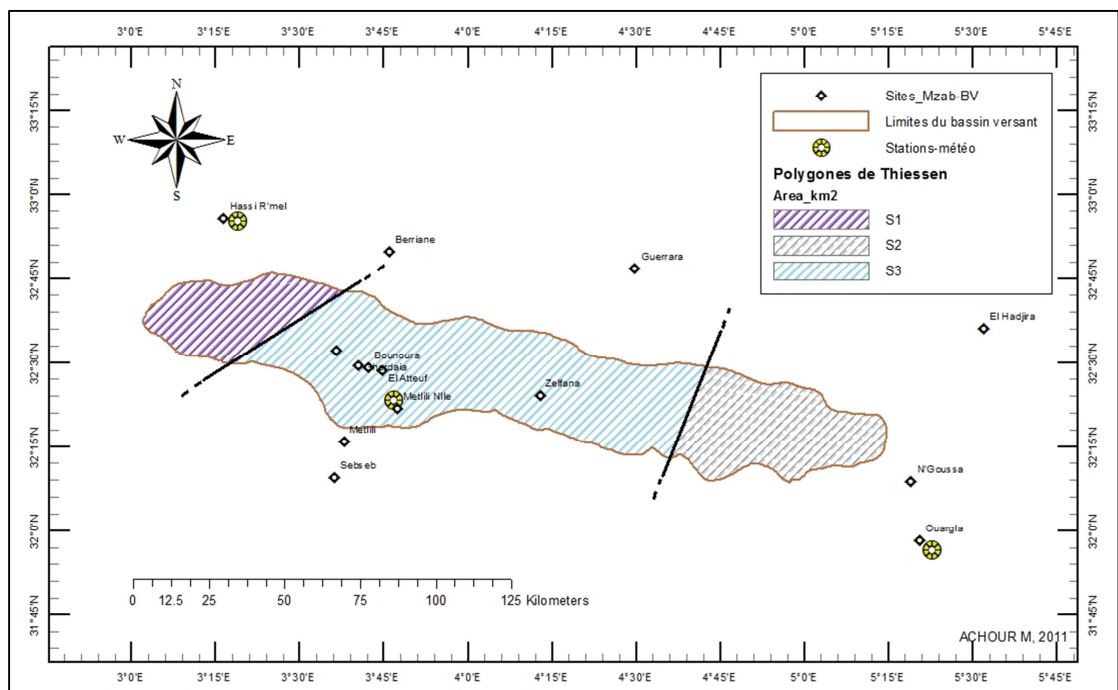


Figure 35 - Méthode de Thiessen appliquée sur le bassin versant du M'zab

4.8.2. Méthode de la moyenne arithmétique

Cette méthode est simple à manipuler, elle consiste à calculer la moyenne des précipitations (\bar{P}) de tous les postes pluviométriques intéressant la surface en question.

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

Avec ;

P_i : précipitation au poste pluvio i .

n : nombre total des postes pluvio.

Le calcul nous donne une lame d'eau tombée sur le bassin versant du M'zab de l'ordre de **78 mm/an**.

4.8.3. Méthode de la variation altimétrique (analytique)

La méthode prend en considération l'influence du relief sur le mouvement des masses d'air, car les précipitations sont fortement liées à celui-ci. Elle utilise la corrélation qui existe entre les précipitations et les altitudes.

On porte les sur un graphe les couples (précipitations, altitudes) pour chaque station, puis on ajuste une droite aux points obtenus. L'altitude moyenne (H_{moy}) correspond à la pluviométrie moyenne précipitée sur le bassin.

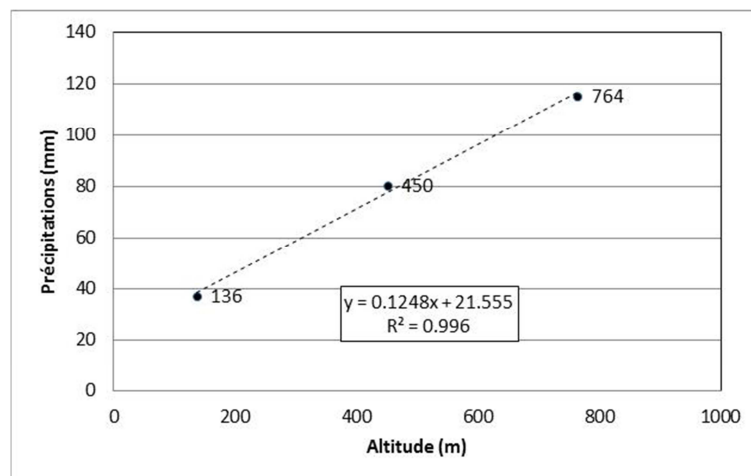


Figure 36 - Droite de régression Pluviométrie-Altitudes

Avec un coefficient de corrélation (R^2) de 0,996, les points ainsi reportés des stations Ghardaïa, Ouargla et Hassi R'mel s'alignent très bien sur la droite de régression.

Pour une altitude moyenne H_{moy} de 434,2m, la pluviométrie moyenne sur le bassin versant de l'oued M'zab est **P= 75,7 mm/an**.

4.8.4. Méthode des deux axes

La méthode permet de déterminer la moyenne des précipitations sur le bassin versant, en tenant en considération les distances séparant le centre de gravité du bassin versant par rapport aux différentes stations.

Le mode opératoire consiste à,

1. Tracer une droite AB de l'exutoire au point le plus éloigné situé sur la limite du bassin et suivant le cours d'eau principal ;
2. Tracer un axe CD médiatrice de AB, c'est l'axe mineur ;
3. Tracer un axe EF médiatrice CD, c'est l'axe majeur.

On définit ainsi un coefficient de pondération pour chaque station par la formule suivante ;

$$Y_i = B_i / \sum_{i=1}^k B_i$$

Avec ;

Y_i : coefficient de pondération pour la station i

K : nombre des stations

B_i : angle en (°) formé par la station i et chacune des extrêmes la plus éloignée des deux axes.

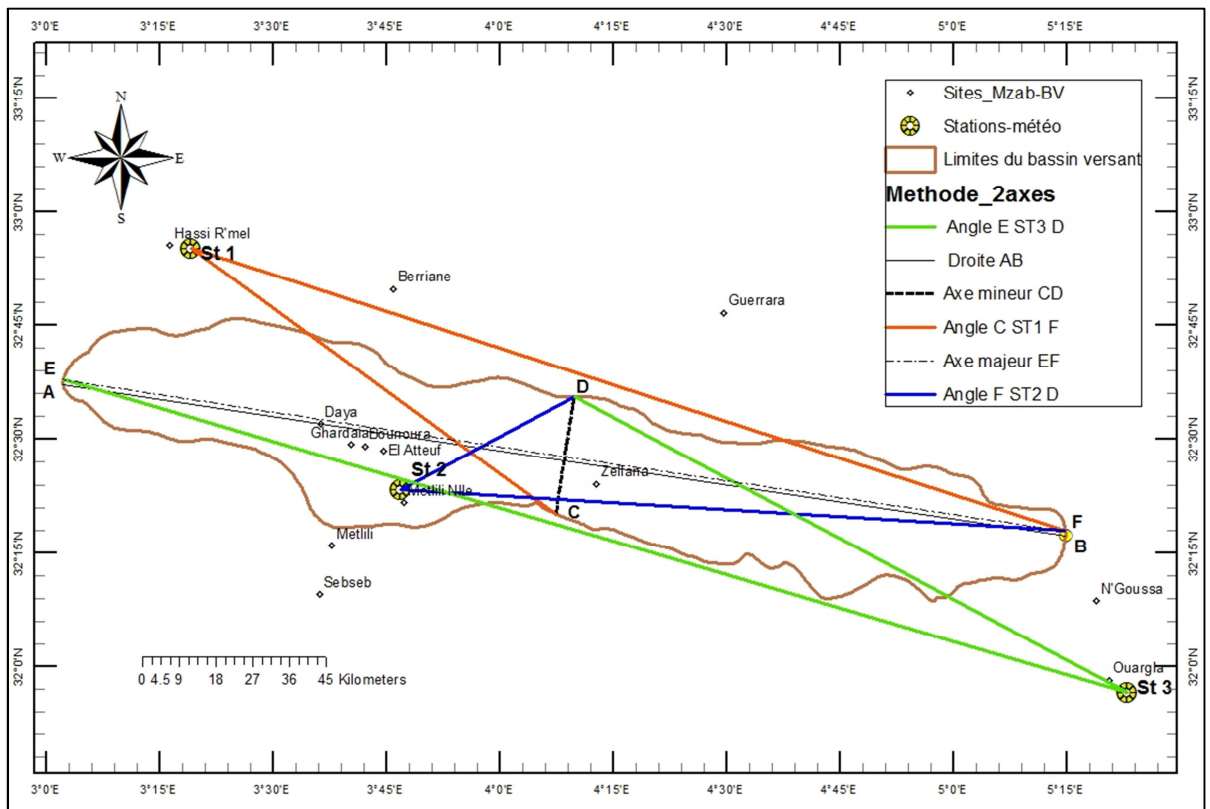


Figure 37 - Méthode des deux axes appliquée sur le bassin versant du M'zab

La pluie moyenne calculée par la méthode est égale à la somme des pluies de chaque pluviomètre i multipliées chacune par son coefficient de pondération Y_i .

Tableau 26. – Calcul de la pluie moyenne sur le bassin du M’zab (méthode des deux axes)

Station	B_i (°)	Y_i	P_i (mm)	$P_i \cdot Y_i$ (mm)
SP ₁ – Hi R’mel	18,09	0,294	115,5	34,0
SP ₂ – Ghardaïa	31,61	0,514	80,6	41,4
SP ₃ – Ouargla	11,76	0,191	37,1	7,1
Total	61,46			82,5

Après le calcul on obtient une pluie moyenne tombée sur le bassin versant de l’oued M’zab de **82,5 mm/an**.

4.8.5. Discussion des résultats

Les valeurs de la lame d’eau tombée sur le bassin versant du M’zab ; calculée par les quatre méthodes, montrent que la méthode de la moyenne arithmétique, altimétrique et celle de Thiessen donnent des résultats proches. Par contre la méthode des deux axes donne une valeur plus élevée, due, vraisemblablement, à la mauvaise répartition des stations.

Mise à part la méthode des deux axes, la valeur moyenne entre les trois autres est de l’ordre de **76,4mm**, elle est définie ainsi comme la moyenne des précipitations tombées sur l’ensemble du bassin versant de l’oued M’zab.

4.9. lame d’eau ruisselée (Formule de Fersi (1979b))

Dans le domaine du Sahara, à faible pluviosité, le ruissellement représente l’un des problèmes épineux en hydrologie. Selon Dubief (1953), les facteurs intervenant dans le ruissellement sont;

- 1) la quantité et l’intensité de la pluie tombée,
- 2) la perméabilité, le pendage du sol arrosé, et l’état de son couvert végétal.

En mettant à profit l’observation du ruissellement sur huit bassins versants de Tunisie centrale et méridionale, Fersi a établi une formule empirique valable en zone aride (O. Baba Sy, 2005) ;

$$L_R = 0,017 \cdot P \cdot \sqrt{I_G}$$

Avec ;

L_R : lame d’eau ruisselée (mm)

P : pluie moyenne annuelle (mm)

I_G : pente globale du bassin (m/km)

L'application numérique nous donne une lame d'eau ruisselée sur le bassin versant de l'ordre de **2,08mm**, soit un volume d'eau de **12,72 millions de m³/an** ruisselé sur l'ensemble du bassin versant de l'oued M'zab.

4.10. Calcul du débit de pointe d'une crue

Il s'agit d'une crue dévastatrice survenue sur l'oued M'zab le 01/10/2008 suite à une averse de 40,5 mm (ONM, Ghardaïa) enregistrée au cours de trois jours. L'écoulement a débordé les berges de l'oued, inondant ainsi tout ce qui est avoisinant comme constructions et autres. La hauteur d'eau a atteint plus de 8 mètres dans certaines sections réduites au centre-ville de Ghardaïa.

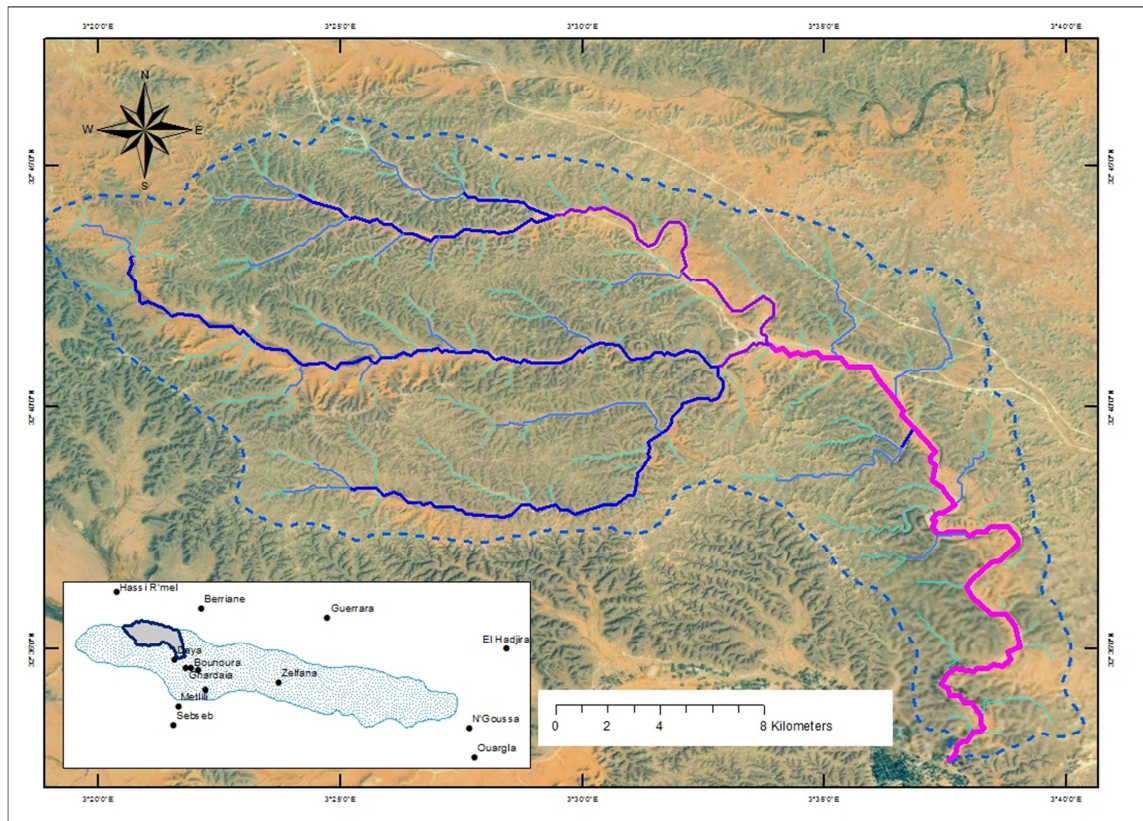


Figure 38 - Sous-bassin versant de l'oued El Haimeur sous Google earth

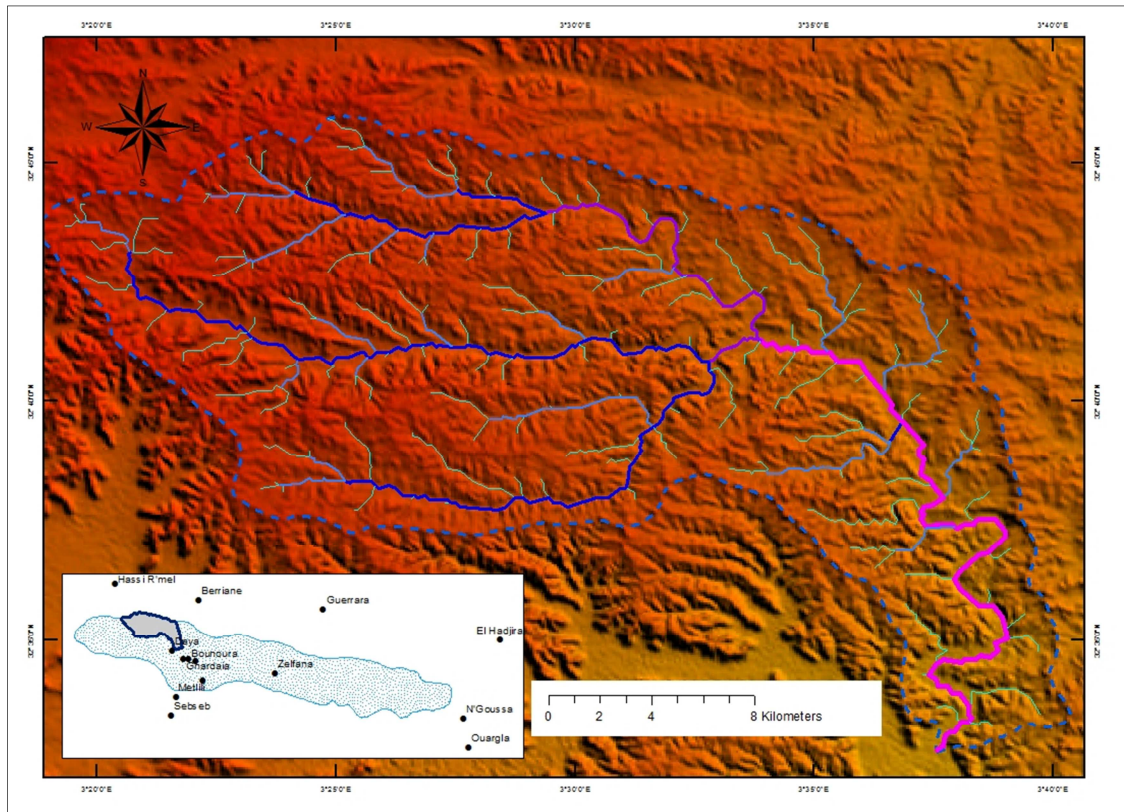


Figure 39 - MNT du sous-bassin versant de l'oued El Haimeur

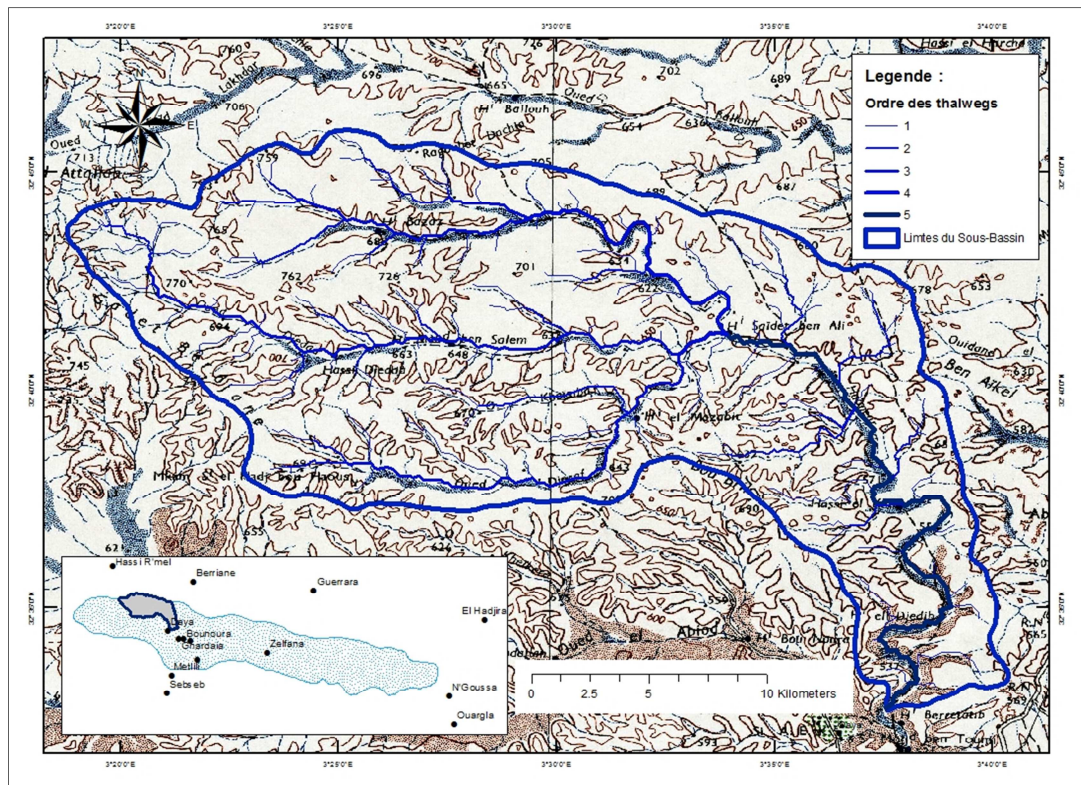


Figure 40 - Localisation du sous-bassin versant de l'oued El Haimeur

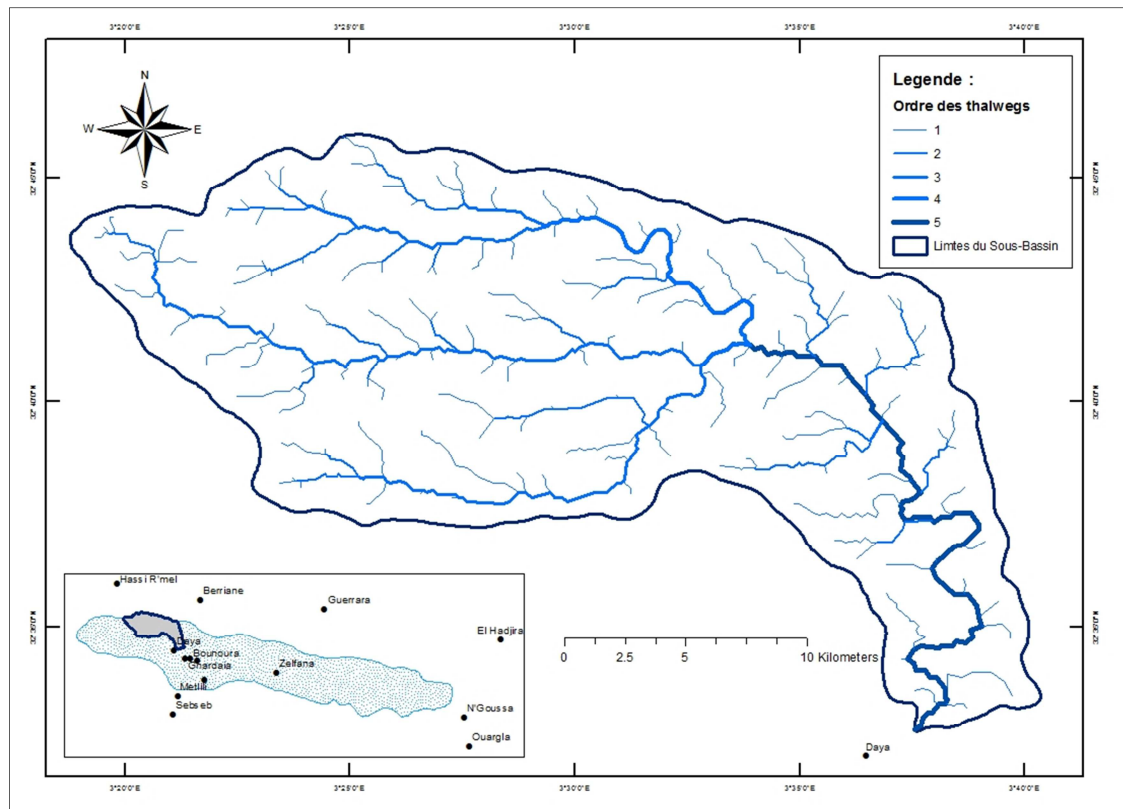


Figure 41 - Chevelu hydrographique du sous-bassin versant de l'oued El Haimeur

Tableau 27. - Paramètres morphométriques du sous-bassin de l'oued El Haimeur

<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>	<i>Ordre du thalweg</i>	<i>Longueur (km)</i>
S Surface	403,9 km ²		
P Périmètre	101,7 km	1	155,3
K_G Coeff. compacité	1,417	2	60,2
L_r Rectangle équivalent	41 km	3	54,5
l_r Rectangle équivalent	9,85 km	4	15,7
D_d Densité de drainage	0,778 km/ km ²	5	28,7
I_m Pente moyenne	5,95 m/km		
H _{max} Altitude maximale	768 m		
H _{min} Altitude minimale	524 m		

Après avoir parcouru l'oued M'zab et ses principaux affluents (Touzouz, El Abiod et El Haimeur), on a remarqué que ;

- l'affluent de l'oued El Haimeur avec son sous-bassin versant d'une superficie de 403,9 km² ayant acheminé la plus grande quantité d'eau qui s'est déversée sur l'oued M'zab. La crue a charriée aussi une masse importante d'apport solide formé surtout de silts, argiles et de graviers ;
- l'oued Touzouz a aussi véhiculé un apport d'eau mais de faible ampleur

- l'oued El Abiod était équipé d'un barrage en terre d'une capacité de stockage théorique de 27,4 millions de m³, les ruissellements ont été retenus par ce dernier.

A défaut de données hydrométriques, on a fait appel à des méthodes empiriques, en appliquant pour cela la formule de Manning-Strickler basée sur les traces de laisse de crue sur une section bien déterminée de l'oued El Haimeur de coordonnées géographiques (3°38'37", 32°35'24") et (3°39'4", 32°35'38").

La formule est de la forme ;

$$Q_{max} = K_s \cdot S \cdot \sqrt{I} \cdot R_h^{2/3}$$

Avec ;

Q_{max} : débit maximal de la crue (m³/s)

S_m : surface mouillée (m²)

i : pente de la ligne d'eau (m/m)

R_h : rayon hydraulique = rapport de la surface au périmètre mouillée (m)

K_s : coefficient de rugosité de Strickler, $K_s = 35$ à 40 pour lit naturel sans végétation arbustive (m^{1/3}/s).

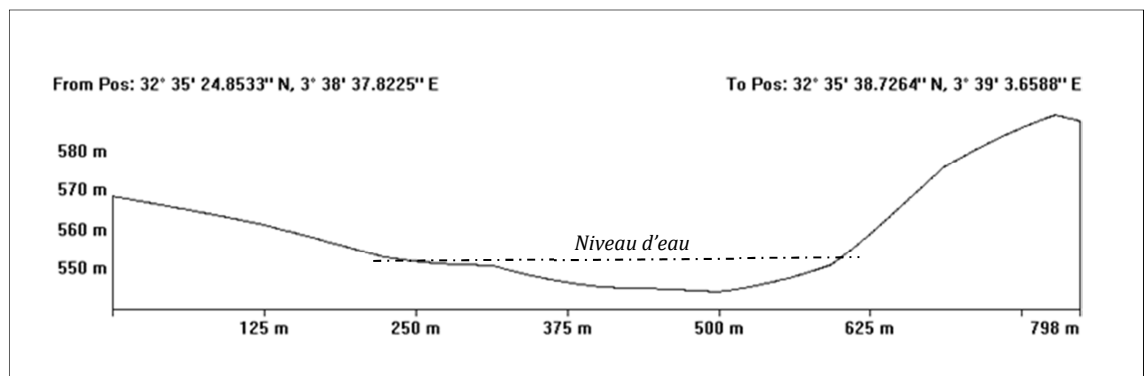


Figure 42 - Profil en travers de la section mouillée dans l'oued El Haimeur

Pour notre cas, on a : $S_m = 746 \text{ m}^2$, $P_m = 359,5 \text{ m}$, $R_h = 2,075$, $K_s = 35$, $i = 1,8\text{‰}$.

Le calcul nous donne un débit de l'ordre de **1343 m³/s**. Cette valeur est nettement supérieure à celle de 1991 qui a été évaluée de 900 m³/s (ANRH, 1993).

On note que les eaux ont atteint l'exutoire du bassin, ce qui est relativement rare. L'historique des crues de l'oued M'zab montre que depuis 1872 (J. Dubief, 1953), seule les crues de 1901, 1951 et 1991 ont pu atteindre la dépression de sabkhet Safioune exutoire du bassin.

CHAPITRE V

PRINCIPES THEORIQUES DE L'ANALYSE GEOSTATISTIQUE

5.1. Introduction

L'analyse géostatistique représente un procédé de modèles et d'outils développés pour les analyses statistiques des variables aléatoires continues (ESRI, 2010), c'est-à-dire, des valeurs de données où peuvent être mesuré à n'importe quel endroit de l'espace considéré.

5.2. Interpolation spatiale

L'interpolation spatiale désigne les processus permettant l'estimation des valeurs des sites non-échantillonnés à partir de points de mesures des sites échantillonnés. Le résultat de l'interpolation produit ainsi des surfaces continues à l'intérieur des limites définies par la position des sites échantillonnés. Dans ce cas, chaque point de la surface interpolée possède une valeur bien déterminée.

A l'inverse de l'interpolation, la procédure de l'extrapolation permet l'estimation des valeurs de points et la création des surfaces à l'extérieur de l'espace considéré. Par conséquent, l'extrapolation est observée en tant qu'une méthode de prédiction statistique des variables spatiales (ESRI, 2010). Les données ou variables spatiales considérées peuvent être, des températures, des teneurs de sels dans le sol, des concentrations d'éléments chimiques ou d'un polluant dans un aquifère, des hauteurs piézométriques, des quantités des gaz CO₂, O₃, CO₃ dans l'air d'une contrée urbaine ou industrielle. ... etc.

5.3. Classes d'interpolation

Le processus d'interpolation peut être classé en quatre classes ;

5.3.1. Interpolation globale

Dans laquelle les mesures d'observations disponibles sont totalement utilisées pour l'interpolation ;

5.3.2. Interpolation locale

Dans laquelle les valeurs inconnues des mesures sont estimées à partir des points voisins échantillonnés ;

5.3.3. Interpolation exacte

Aux endroits échantillonnés, les valeurs estimées sont exactement les mêmes que celle des valeurs d'observations mesurées ;

5.3.4. Interpolation approximative

Aux endroits des valeurs mesurées, les valeurs estimées ne seront pas nécessairement la même que celles mesurées.

5.4. Méthodes d'interpolation spatiales

La formulation statistique de l'interpolation spatiale, réside à l'estimation d'une fonction (valeur) $Z(x_0)$ en un point x_0 de la surface à partir des valeurs mesurées de Z en un certain nombre N de points avoisinant s_i , tel que ;

$$Z(x_0) = \sum_{i=0}^N \lambda_i Z(x_i)$$

Avec ;

- x_0 : point d'estimation (prédiction)
- N : nombre de points mesurés
- λ_i : poids des valeurs mesurées à chacun des points avoisinants s_i
- $Z(x_i)$: représente la valeur mesurée au point s_i .

La résolution de l'équation consiste à déterminer la valeur de la pondération λ_i pour chacun des points s_i environnants (Gratton Y, 2002).

Deux grandes méthodes sont habituellement utilisées pour la technique de l'interpolation spatiale, elles sont basées essentiellement sur la similarité des observations, l'autocorrélation et la stationnarité.

5.4.1. Méthode déterministe

Cette méthode statistique repose sur l'utilisation des fonctions mathématiques pour calculer les valeurs dans des lieux inconnus basées soit sur le degré de similarité, tel que l>IDW (Inverse Distance Weighted), ou le degré de lissage avec les points de données voisins, comme la méthode RBF (Radials Basis Fonctions) et la méthode des splines cubiques (Ajustement de polynômes cubiques).

5.4.2. Méthode géostatistique

La méthode utilise les propriétés statistiques des points mesurés et de l'existence d'une certaine structure spatiale entre eux. Elle est basée sur les estimations probabilistes et l'autocorrélation spatiale entre les points de données. Elle inclue à la fois une composante déterministe et calcule les erreurs d'estimation (prédiction).

5.5. Le Krigeage

Le Krigeage est une méthode d'interpolation géostatistique, exacte et locale. Elle a été développée pour la première fois par l'ingénieur minier Sud-Africain D.G. Krig en 1951, d'où elle tire son nom "Krigeage". En se basant sur les corrélations sur un ensemble de forages miniers, D.G. Krig a pu élaborer une série d'approches mathématiques et statistiques empiriques permettant de déterminer, avec une importante précision, la répartition spatiale des minerais d'Or.

Le Krigeage permet la détermination des poids λ_i à partir de la covariance entre les points en fonction de la distance entre ces points.

Deux conditions indispensables doivent être remplies pour utiliser la méthode, appelées couramment les hypothèses de première et deuxième ordre de stationnarité :

- La moyenne des échantillons doit être constante et indépendante de la localisation spatiale ;
- La covariance est la même entre les paires de points séparés par une même distance et ayant la même direction, quel que soit la localisation des points échantillonnés.

5.5.1. Le Semi-variogramme

Le variogramme est l'outil fondamental pour l'analyse et la modélisation des observations spatiales (O'Sullivan et al, 2003), en décrivant la continuité et la régionalité du paramètre étudié. Il est représenté par la variance totale moins la covariance, en fonction de la distance entre les points de mesure.

Dans la technique de l'interpolation par Krigeage, le variogramme est la base de la modélisation. Le calcul des valeurs des pondérations λ_i , le Krigeage utilise le semi-variogramme, qui est la moitié du variogramme.

Pour un nombre de points de mesures N, de positions (x_i, y_i) et séparés par une distance $h=|x_i - y_j|$, le semi-variogramme est calculé par l'équation ;

$$\lambda(h) = \frac{1}{2} \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(y_i))^2$$

Le calcul du semi-variogramme se base sur la moyenne d'une estimation locale dans lequel chaque estimé représente une moyenne pondérée des valeurs observées au voisinage (O'Sullivan et al, 2003).

5.5.2. Propriétés du semi-variogramme

Le semi-variogramme est une fonction continue paire, à valeurs positives, croissante et bornée. Une représentation graphique du semi-variogramme est illustrée sur les figures 43 et 44.

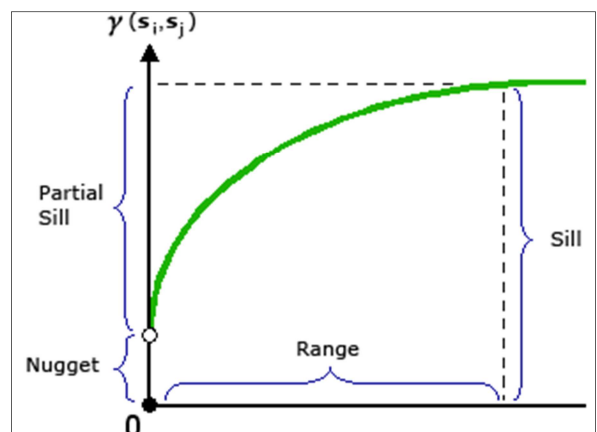


Figure 43 - Semi-variogramme théorique à modèle sphérique (ESRI, 2010).

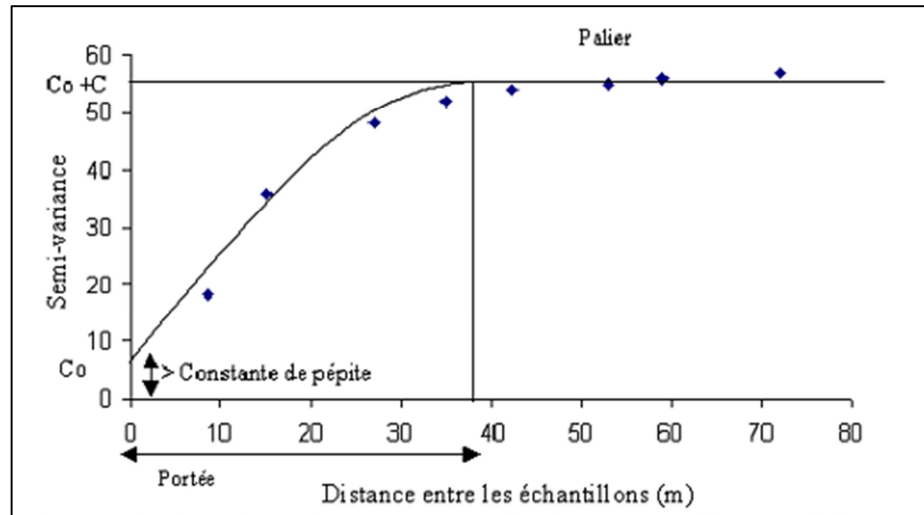


Figure 44 - Semi-variogramme à modèle sphérique (Gratton Y., 2002).

Quatre propriétés caractérisent le graphe du semi-variogramme :

Palier (sill)– portée (range)– Effet pépité (Nugget) – anisotropie.

5.5.2.1. Le Palier (sill)

Le palier représente la limite du semi-variogramme à l'infini où le $\lambda(h)$ devient constant avec l'évolution de la distance h . c'est la limite à laquelle aucune relation entre la position et la valeur de $\lambda(h)$ n'existe (Gratton Y., 2002).

5.5.2.2. La Portée (range)

La portée correspond à la distance où le palier est quasiment atteint. Généralement s'est à 95% de la distance h . Les points de mesure situés à une distance supérieure à la portée sont spatialement indépendants (Gratton Y., 2002).

5.5.2.3. Effet pépité (Nugget effect)

L'effet de pépité représente la valeur du semi-variogramme $\lambda(h)$ pour la distance $h = 0$. En pratique, l'effet de pépité correspond à la variation entre deux mesures réalisées à des endroits quasiment proches (ESRI, 2010). La cause de l'effet peut être attribuée à une erreur d'échantillonnage d'une part, et à la présence d'une variabilité à une distance inférieure à l'intervalle d'échantillonnage d'autre part.

5.5.2.4. L'anisotropie

L'anisotropie correspond, dans certains cas des données mesurées, à l'évolution du semi-variogramme dans un espace bidimensionnel selon une direction privilégiée. La

carte semi-variographique permet de détecter cette anisotropie, et qu'il est important de l'inclure dans le processus de la modélisation du semi-variogramme (Fig. 45).

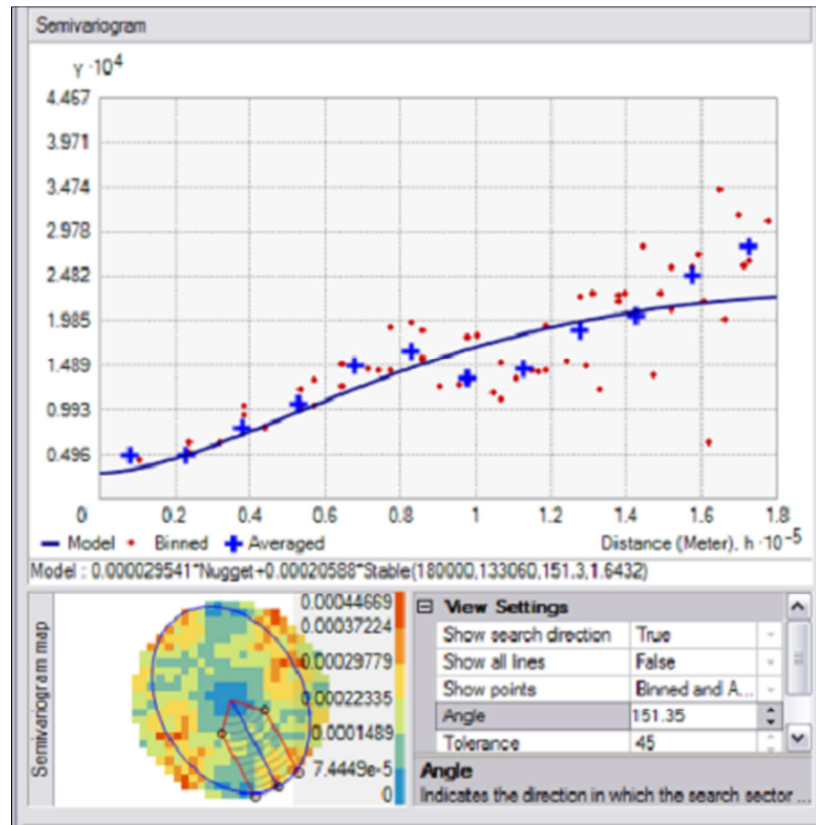


Figure 45 - Semi-variogramme et carte semi-variographique à anisotropie NNW-SSE sous ArcGIS (ESRI, 2010).

5.5.3. La modélisation

La modélisation est la phase la plus délicate du Krigeage, elle consiste à l'ajustement d'une fonction analytique continue à tous les points du semi-variogramme calculé et reproduisant mieux l'allure de la courbe de celui-ci. La fonction analytique à ajuster peut être de type linéaire, sphérique, exponentiel ou gaussien (O'Sullivan et al., 2003). Elle est soumise par la suite au contrainte de la taille des lags et le nombre des bins (fig. 46).

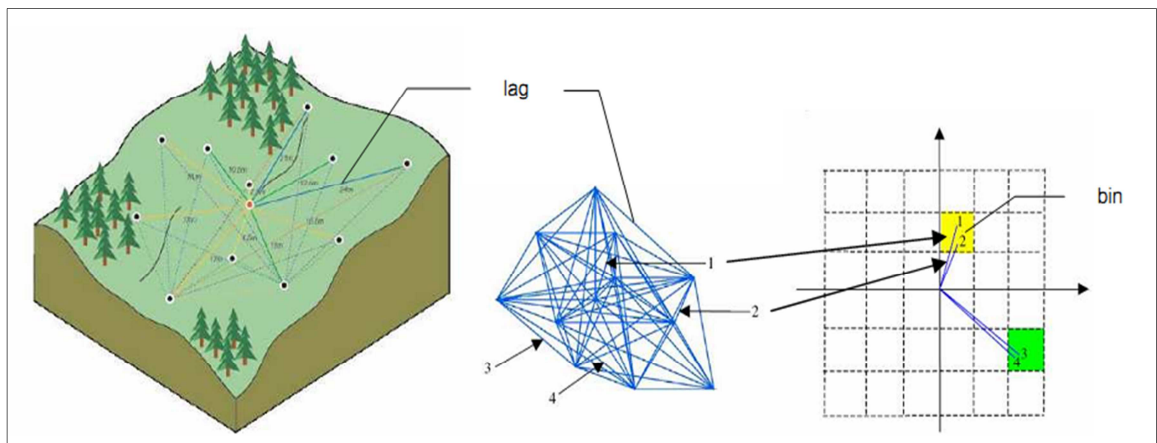


Figure 46 - Représentation des lags et des bins de la modélisation

5.5.3.1. Les lags

Les lags représentent les vecteurs des paires de points de mesures regroupés selon leur direction et leur distance. Les lags sont rassemblés dans un graphe avec une origine commune (Fig.46 et 47).

5.5.3.2. Les bins

Les bins sont des cases de la grille (carte) semi-variographique rassemblant les lags (vecteurs) ayant une même distance et direction. La carte semi-variographique présente les valeurs des bin faibles par des couleurs froides et les valeurs élevées par des couleurs chaudes (Fig.46 et 47).

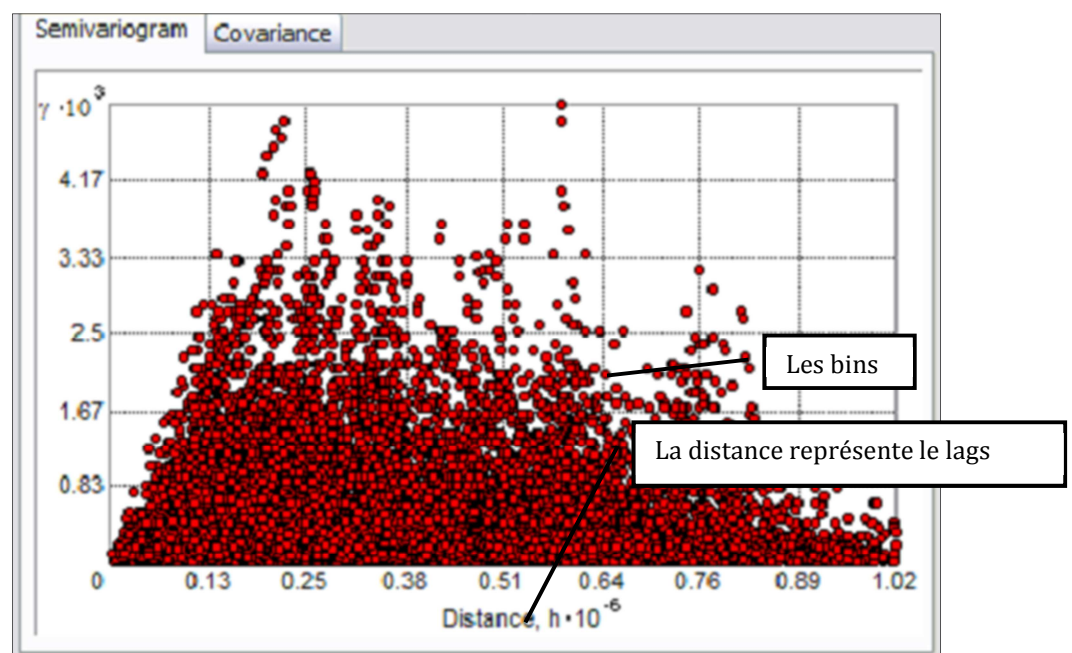


Figure 47 - Semi-variogramme et représentation des bins et distance des lags sous ArcGIS (ESRI, 2010).

5.5.4. L'autocorrélation

La fonction de l'autocorrélation exprime la corrélation entre une série de données spatiales et la même série à un intervalle de distance plus éloignée (O'Sullivan et al., 2003). Elle se calcule par la formule ;

$$I = r(h) = C(h)/s^2$$

- Avec ;
- $r(h)$: représente l'autocorrélation à une distance de séparation de h
 - $C(h)$: exprime la covariance
 - s^2 : la variance de l'échantillon
 - I : indice de Moran

La mesure de l'intensité de la relation linéaire $r(h)$ est donnée par le I de Moran (Moran, 1950). Cet indice est normalisé entre les valeurs -1 et 1 pour simplifier l'interprétation (O'Sullivan et al., 2003).

L'auto-corrélogramme $C(h)$ permet d'exprimer graphiquement la corrélation $r(h)$ entre les valeurs en fonction de leur distance de séparation h . En effet, il permet d'identifier la distance à laquelle les échantillons ne sont plus spatialement corrélés ($r(h)=0$), ainsi que sur la nature de la variabilité de la donnée (régionalisée ou non) (O'Sullivan et al., 2003). Son interprétation est beaucoup plus simple que celle du semi-variogramme, mais ce dernier est essentiel à l'interpolation par Krigeage (ESRI, 2010)

Pour un coefficient de régression égale à 1 indique que le modèle de régression passe par la première bissectrice à 45° et que les valeurs estimées correspondent aux valeurs réelles (Nolin et al, 1997). Lorsque cette valeur est plus grande que 0,2, la variable étudiée montre une structure spatiale (ESRI, 2010)

5.5.5. La validation croisée

La validation croisée est un procédé de l'analyse spatiale qui nous permet de valider les paramètres de l'ajustement du modèle (ESRI, 2010). Chaque point mesuré est exclu et estimé, puis un graphique des valeurs estimées par rapport aux valeurs réelles est ainsi construit. La pente de la droite de régression représente la mesure de l'ajustement du modèle aux données. Une pente de valeur égale à 1 indique que les valeurs estimées sont identiques que les valeurs mesurées réellement (Fig.48).

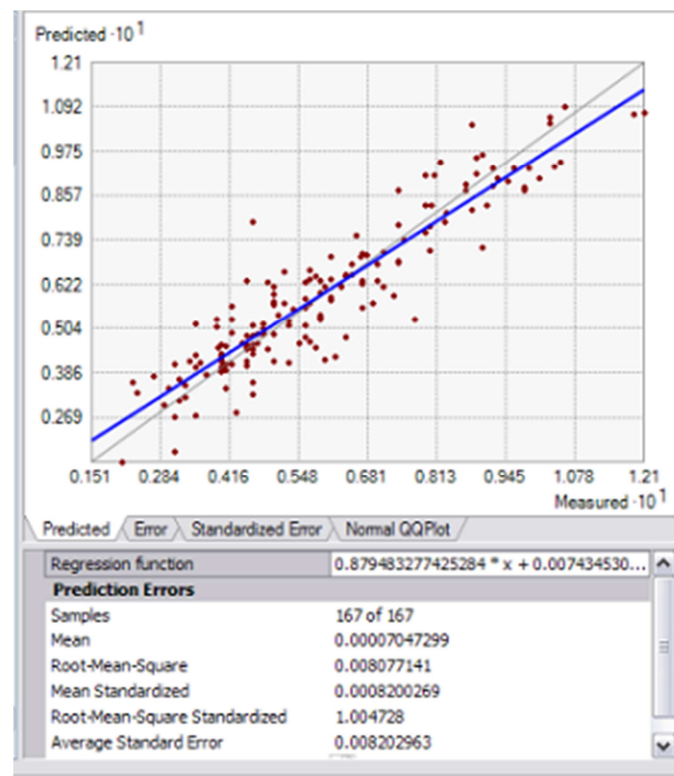


Figure 48 - Validation croisée et données statistiques du modèle ajusté sous ArcGIS (ESRI, 2010).

Un meilleur ajustement du modèle doit avoir :

- Une moyenne standardisée la plus proche de zéro ;
- Une moyenne quadratique des erreurs de prédiction la plus petite ;
- Une moyenne quadratique des erreurs de prédiction standardisée proche de zéro.

Les erreurs de prédiction représentent les valeurs mesurées soustraites des valeurs prédites. Si elles sont distribuées normalement, les points s'alignent le long de la droite de régression, et le modèle ainsi choisi repose sur la normalité (ESRI, 2010). Si la moyenne quadratique des erreurs de prédiction est supérieure à 1, les valeurs de la variable de prédiction sont largement surestimées.

5.6. Analyse spatiale sous ArcGIS 10.0

L'utilisation de la méthodologie du SIG sous le logiciel ArcGIS 10.0 d'ESRI pour l'analyse spatiale, nous a permis l'élaboration des cartes thématiques pour les différents paramètres étudiés, que ce soit des cartes des levées piézométriques de la nappe du CI (Albien) dans la région de Ghardaïa, et la nappe phréatique de la vallée du M'zab, ainsi que les cartes de l'indices de vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique de l'oued M'zab.

Le processus de la méthode appliquée se résume comme ceci (Fig.49);

- 1- Création d'une base de données (Géodatabase) pour les données piézométriques et hydrochimiques étudiées
- 2- Exploration spatiale des données étudiées (ESDA) et transformation des données si elles sont anormalement distribuées autour de leur moyenne en utilisant le module Quantile-Quantile (QQ) Plot.
- 3- Interpolation spatiale de données piézométriques et les indices de la cartographie de la vulnérabilité par la méthode Krigeage simple et universel.
 - a. Calcul du semivariogramme
 - b. Choix du modèle d'ajustement
 - c. Calcul et ajustement des paramètres du modèle (taille des lags, Nombre des bins)
 - d. Traitement de l'anisotropie
- 4- Validation croisée du modèle ajusté
- 5- Génération des surfaces (cartes) thématiques de la zone d'étude.

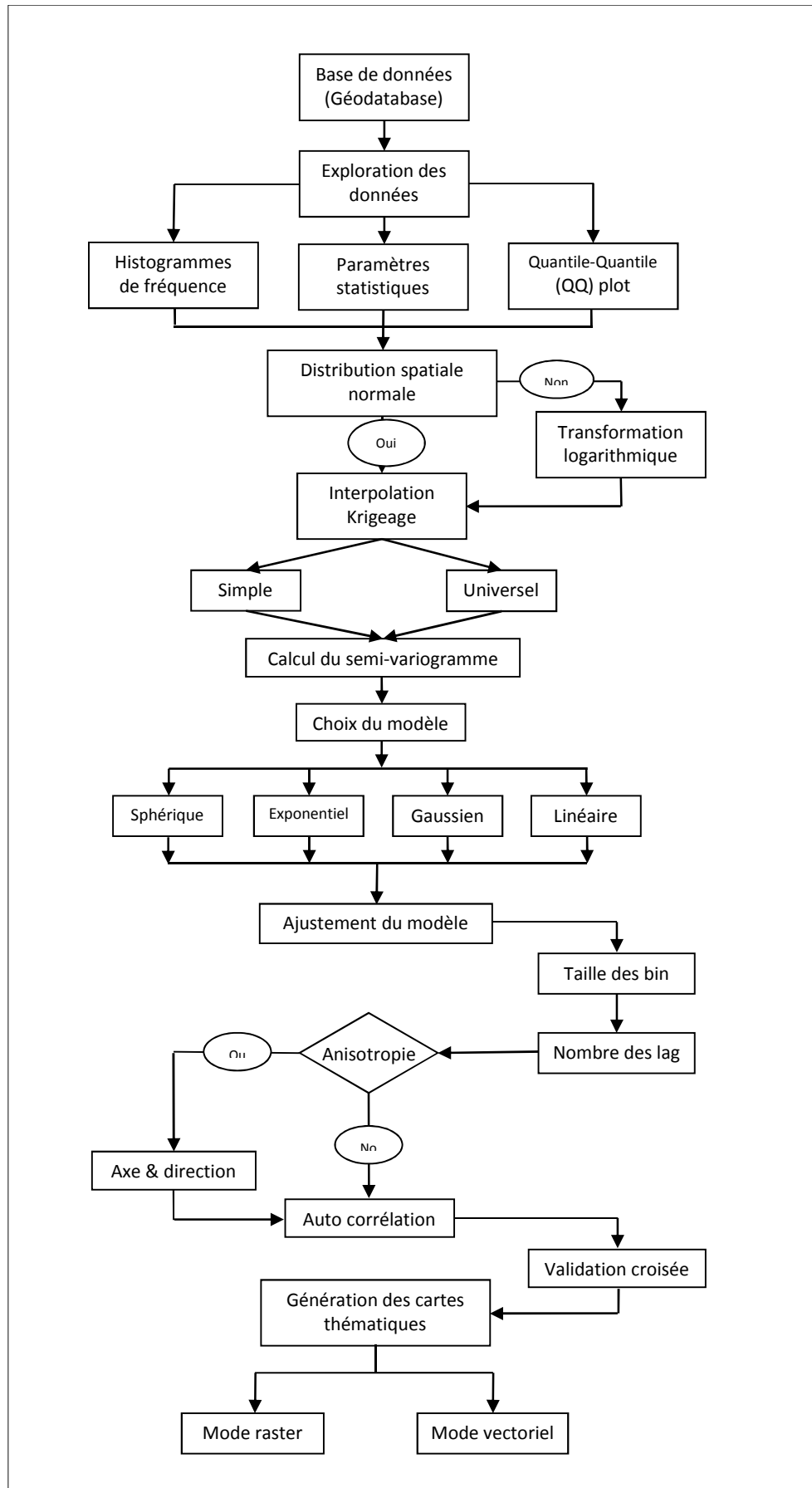


Figure 49 - Organigramme des étapes de l'analyse spatiale sous ArcGIS

CHAPITRE VI

ENVIRONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE

6.1. Introduction

Le bassin du Sahara septentrional est réputé par son immense aquifère ; considéré parmi les plus grands réservoirs aquifères du monde. Depuis l'étude de J. Savornin (1945)⁽¹⁾ plusieurs auteurs ont contribué à la connaissance du fonctionnement hydraulique des nappes de ce grand bassin hydrogéologique, entre autres, on cite parmi les principaux ; Cornet (1961), BURGEAP (1963), Géo-hydraulique (1965), Bel et Demargne (1966), UNESCO-ERSS (1972), PNUD- Actualisation ERSS (1983), Projet BRLi (1998), OSS-SASS (2003) et Ould Baba Sy (2005).

L'état de l'art actuel montre que le système aquifère du Sahara septentrional, nommé SASS, est un énorme réservoir à structure multicouches. Spatialement, ces limites hydrogéologiques s'étendent sur une très vaste surface de 1100.000 de km² (SASS, 2003) située simultanément, en l'Algérie de 60%, en Lybie de 30%, et un peu moins en Tunisie de 10%. Ces limites forment une ceinture continue de la frontière marocaine au Nord-Ouest du bassin, jusqu'à la ville de Hun en extrême Sud-Est de la Lybie.

Hydrographiquement, la dorsale du M'zab divise le domaine du SASS en deux bassins ; le bassin occidental de 280.000 km² drainé vers le Sud, et le bassin oriental de 500.000 km² drainé vers le Nord-Est.

6.2. Système aquifère du Sahara septentrional (SASS)

Le domaine du système aquifère du Sahara septentrional SASS s'étale, du Nord au Sud ; de l'Atlas saharien jusqu'aux plateaux de Tidikelt et Tinrhert, et d'Ouest en Est ; depuis la vallée Guir-Saoura en Algérie jusqu'au Graben de Hun en Lybie (fig. 50). Les études démontrent que ce système aquifère est composé de deux principaux réservoirs aquifères ; le complexe terminal au-dessus à nappe de sub-surface, et au-dessous, le continental intercalaire le plus étendu à nappe profonde captive.

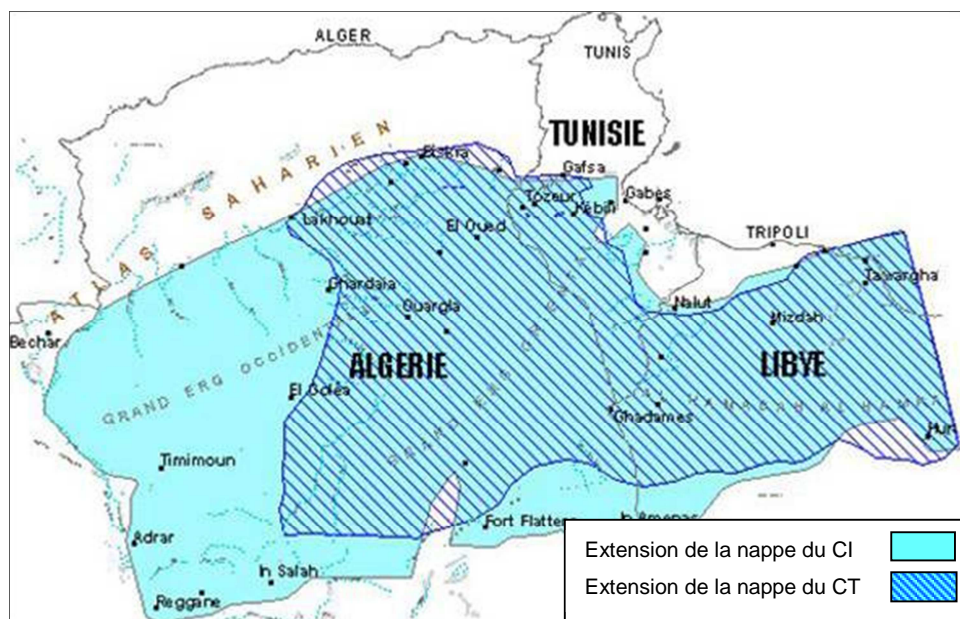


Figure 50 - limites du domaine SASS (ANRH)

UNITE stratigraphique	LOG Stratigr	Description Stratigraphique	Unite Litho Stratigraphique	Unite Hydrogeologique	
quaternaire		Alluvions	Continental	Nappe Phreatique	Complexe terminal <i>stricto sensu</i>
Mio-Pliocene		poudingues calc. gypseux sable, argile	Terminal	Nappe De Sable	
Eocene Moy.		argile, gypse calc. dolomitique	Eocene Argilo-Evaporitique	Nappe de l'Eocene moyen Semi-impermeable	
Eocene Inf.		Calc. blancs à silex.	Eocene Carbonaté	Nappe Calcaire	
Senonien Sup.		Calc. dolomitique	Senonien Carbonaté		
Senonien Inf.		Alternance de calcaires et de marnes	Senonien Lagunaire	Impermeable	
TURONIEN		calc. dolomitique calc.	Turonien Carbonaté	Nappe Calcaire Du Turonien	
CENOMANIEN		Marno - Calc. Marnes Gypse	Cenomanien Argilo - Evaporitique	Impermeable	
ALBIEN		Argiles Gres	Albien Argilo Gresoux	NAPPE DU "CONTINENTAL INTERCALAIRE"	
APTIEN		calc. marnes argiles, gres.	Aptien lagunaire gresoux		
BARREMIEN		Gres	Barremien Gresoux		

Figure 51 - Log synthétique des principales unités géologiques et hydrogéologiques du bassin du SASS.

6.2.1. La nappe du complexe terminal (CT)

Le complexe terminal couvre une superficie de 665.000 km², il regroupe plusieurs aquifères à formation géologiques différentes, d'âge Turonien, Sénonien, Eocène et Mio-pliocène. Interconnectés entre eux, l'ensemble forme un même système hydraulique. Ces limites d'affleurement sont ;

- au Nord, dans le sillon des chotts algéro-tunisiens
- à l'Est, le long du flanc oriental du Dahar et du J. Nafusa en Tunisie,
- au Sud, sur les plateaux de Tinrhert et de Tademaït,
- à l'Ouest, sur la dorsale du M'zab (calcaires du Turonien), considérée comme une zone d'alimentation du CT.

La nappe est jaillissante au centre du bassin et libre sur les bordures. Elle est alimentée essentiellement par infiltrations des pluies exceptionnelles dans les sables mio-pliocènes, ainsi que par les fréquents ruissellements le long des oueds descendant de l'Atlas saharien au Nord, et de l'Ouest, par les écoulements des oueds de la chebka du M'zab (fig. 52).

Avec une épaisseur moyenne de 342 mètres et une porosité efficace de 5%, les réserves du CT sont évaluées à environ de 11.000x10⁹ de m³ (Ould Baba Sy, 2005).

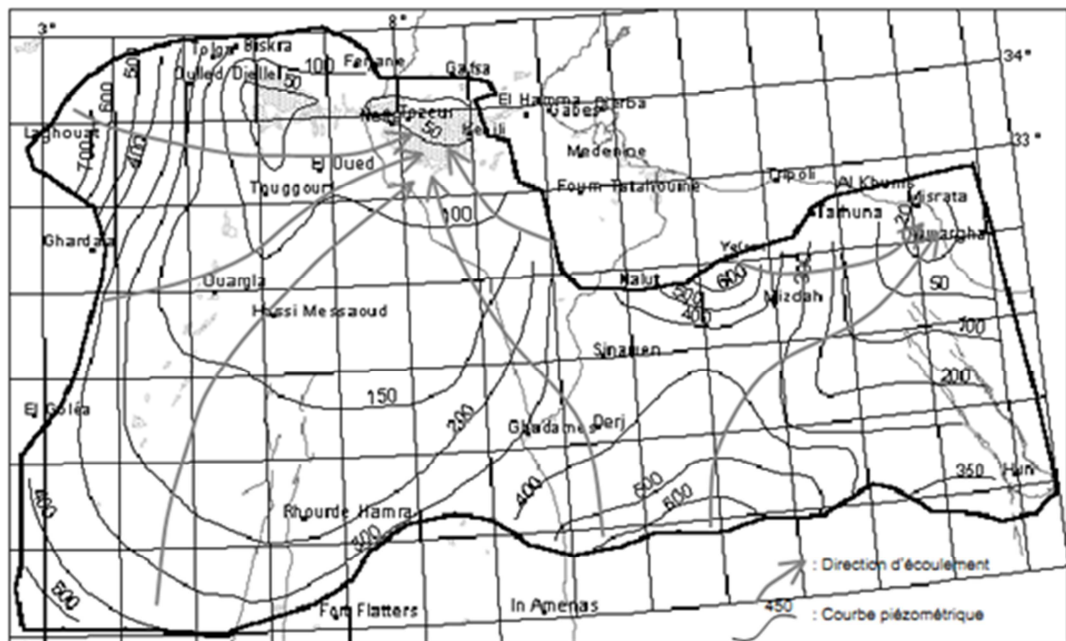


Figure 52 - Piézométrie de la nappe du CT (OSS, 2003)

Etant la limite de la nappe du CT est située plus à l'Est de la région du M'zab, cette dernière n'est pas captée avec succès dans la région de Ghardaïa. De ce fait, nous n'aborderons en détail que la nappe du CI.

6.2.2. La nappe du continental intercalaire (CI)

Le continental intercalaire est définie comme l'aquifère le plus étendu du bassin, ses extensions déterminent également les limites qui ont été attribuées au domaine du SASS. Majoritairement, il comprend toutes les formations sablo-gréseuses et argilo-sableuses du Crétacé inférieur. Les épaisses séries argilo-évaporitiques du Cénomaniens constituent un toit imperméable de l'aquifère.

6.2.2.1. Limites et structure du CI

Les limites du CI ont été déterminées, à la fois, par l'étude des affleurements géologiques et les sondages, se sont (OSS, 2003) ; l'Atlas saharien au Nord, les massifs paléozoïques de l'Ougarta à l'Ouest et des Tassilis au Sud, allant en continuité d'Adrar à Hun en Lybie, les affleurements sur le Djebel Nefussa et le Dahar au Nord-Est., au Nord, l'accident sud Atlasique au Nord des Chotts, relayé vers le golfe de Gabès par la faille d'EL Hamma – Médenine, et enfin à l'Est, au niveau du méridien 16° qui a été adopté comme limite de la zone, et qui correspond en fait, au passage des eaux douces aux eaux saumâtres dans le bassin de Syrte (OSS, 2003).

La dorsale du M'zab, orientée approximativement Nord-Sud, divise le domaine du CI en deux sous-bassins hydrogéologiques: le bassin oriental et le bassin occidental. L'ensemble couvre une surface de 1100.000 de km², et une épaisseur moyenne de 358mètres (Ould Baba Sy, 2005). La partie Sud du réservoir du CI est largement affectée par les accidents Nord-Sud d'Amuid El Biod qui se prolonge du socle primaire d'El Hoggar (fig.53).

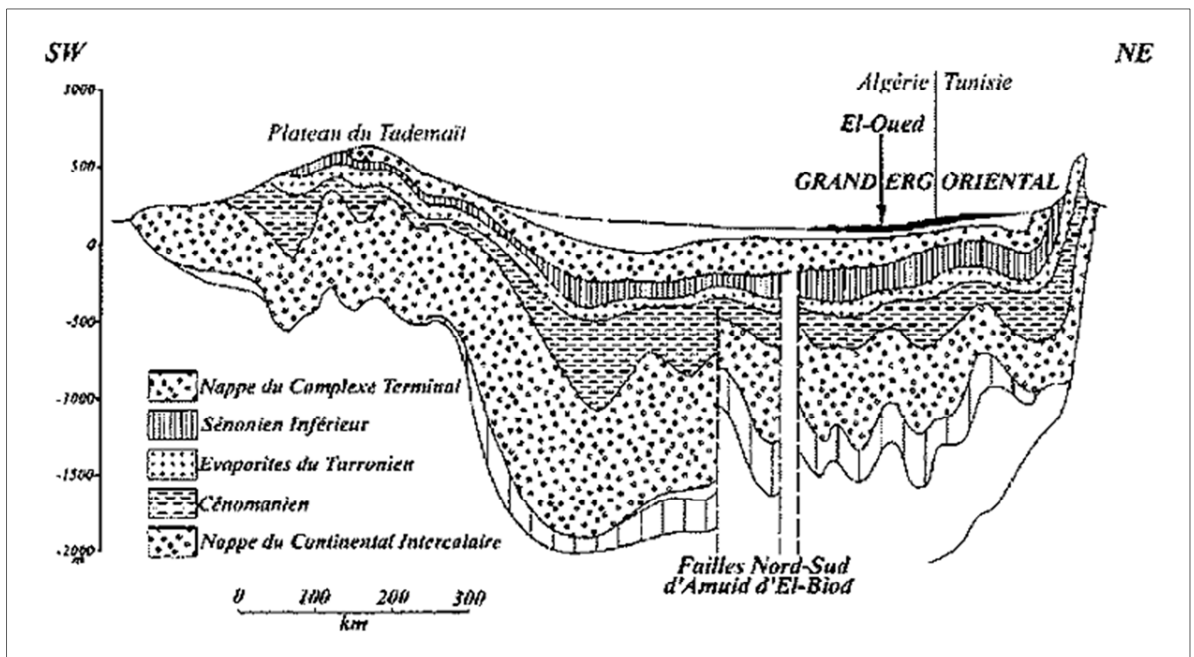


Figure 53 - Coupe hydrogéologique NE-SW du bassin SASS (ERESS, 1972)

6.2.2.2. Piézométrie et alimentation du CI

L'examen de la carte piézométrique de la nappe du CI (fig.54), établie par l'OSS (2003), révèle que les écoulements des eaux de la nappe en prévenance de l'Atlas saharien, se trouvaient scinder au niveau l'axe de la dorsale du M'zab, en deux directions privilégiées ; un écoulement vers le Sud et le Sud-Ouest, régions de Tidikelt, Touat et Adrar. L'autre direction vers le Nord-Est, vers la zone des chotts et vers la nappe de la zone côtière de la Tunisie.

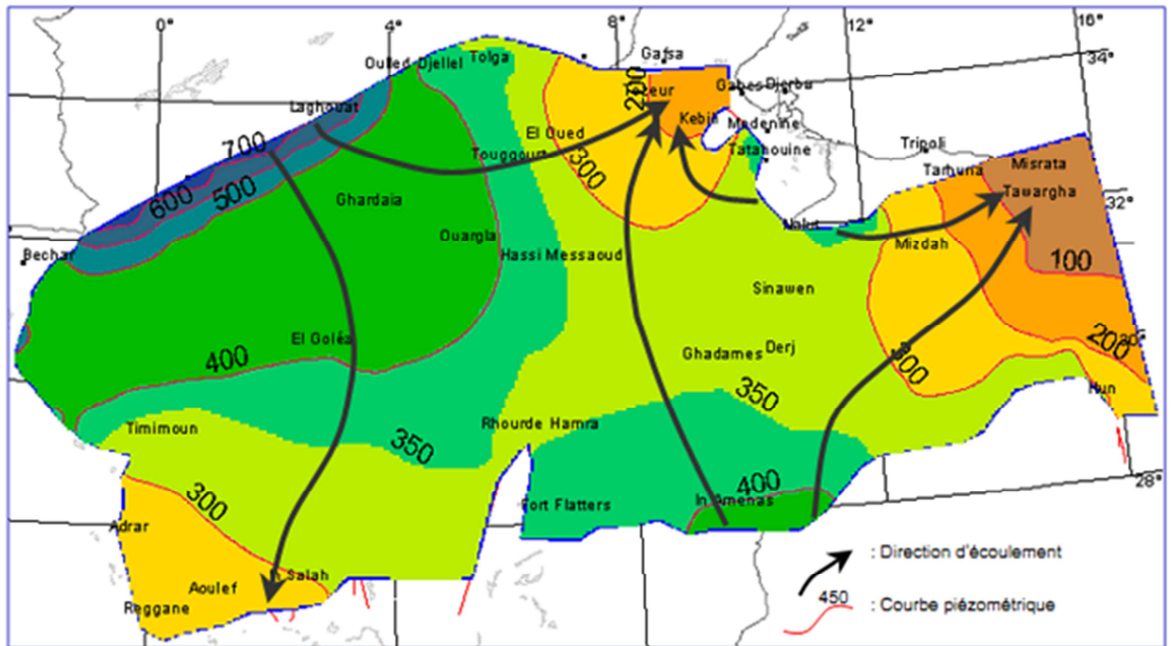


Figure 54 - Piézométrie de la nappe du CI (OSS, 2003)

Malgré sa situation en zone aride, on admet que le CI est directement alimenté par l'infiltration des eaux de ruissellement sur les zones périphériques d'affleurement, dans les piedmonts de l'Atlas saharien et les rebords Sud des plateaux de Tidikelt et Tinihert. L'alimentation du CI s'effectue aussi indirectement dans le grand erg occidental, à travers les dunes de sables.

Les chiffres avancés concernant la recharge du CI sont divers, les modèles mathématiques la situe autour de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ould Baba Sy, 2005).

6.2.2.3. Reserve et exploitation du CI

Toutes les études hydrogéologiques effectuées sur le Sahara, révèlent que ce dernier renferme d'énorme réserve en eaux souterraines. L'étude de l'ERESS (1972) évalue le volume d'eau moyen pour les deux aquifères CI + CT à $60.000 \times 10^9 \text{ m}^3$, soit 60.000 milliard de m^3 . Margat (1992) fait état de 40.000×10^9 de m^3 , comme réserve de l'aquifère du CI.

L'étude de Ould Baba Sy (2005), la plus récente, et en se basant sur ;

- L'épaisseur moyenne du CI de 358 mètres, calculée à partir de l'histogramme de la grille de l'épaisseur du domaine du CI ;
- L'aire du domaine du CI évaluée à $1.100.000 \text{ km}^2$;
- Une porosité efficace moyenne de 5% (OSS, 2003).

L'auteur a pu estimer les réserves du CI à environ de $20.000 \times 10^9 \text{ m}^3$, soit 20.000 milliard de m^3 .

L'OSS (2003) fait un état près de 9000 forages et foggara captant le CI, dont 6500 points d'eau en Algérie, 1300 en Tunisie et 1200 en Lybie. Le volume total exploité de la nappe a atteint 2,5 milliard de m^3 .

6.3. L'aquifère du CI dans la région du M'zab

6.3.1. Historique de recherche et d'exploitation

Les premiers sondages exploitant le CI date entre 1890- 1892, exécutés dans la vallée d'El Golèa⁽¹⁾. Attirés par le jaillissement de ces ouvrages, Ville et Rolland Ingénieurs géologues supposèrent l'existence d'un grande nappe aquifère captive qui devait s'étendre sous le M'zab.

C'est ainsi que fut exécuté le premier sondage dans la vallée du M'zab entre 1896 et 1899. Le forage avait 320 mètres de profondeur et le plan d'eau se stabilisa à une profondeur de 47 mètres. Le résultat à cette époque a été considéré comme décevant, car ils attendirent un forage jaillissant identique à ceux d'El Golèa.

J. Savornin, à partir du 1926 reprend les travaux de recherche hydraulique sur la région Ghardaïa - El Golèa. Les sondages profonds réalisés entre 1927 et 1936 à Touggourt et Ouargla de 910 et 950 mètres de profondeur, étaient à mi-chemin du toit de la nappe albienne selon les considérations de J. Savornin.

En 1938 un autre forage de 440 mètres de profondeur fut exécuté dans la vallée du M'zab, par pompage il donna un débit de 55 l/s avec un rabattement de 6,25 mètres. C'est ainsi que fut créée l'Ain de George Lebeau. Par la suite, d'autres forages ont été réalisés dans la vallée, il s'agit de Melika, El Atteuf en 1938, et Beni Isguen en 1949.

En outre, deux autres sondages fut exécutés entre 1946 et 1951 à l'Est du M'zab, considérés comme les premiers grands forages jaillissants exploitant la nappe albienne dans le grand Sahara, il s'agit du sondage de :

- Zelfana⁽²⁾ en 1948 de 1167 mètres de profondeur avec un débit jaillissant de 360 l/s et une pression en tête du puits de 7,25 bars.
- Guerrara⁽³⁾ en 1951 de 1170 mètres avec un débit jaillissant de 238 l/s et une pression de 11 bars.

C'est ainsi que la zone de l'Albien jaillissant a pu être tracée avec précision.

6.3.2. Structure du CI dans la région du M'zab

Le Continental intercalaire dans la région du M'zab est composé de sables fins et de grés jaunâtres à gris à intercalations d'argiles. Cette masse grés-sableuse est aquifère, dont l'Albien est l'étage qui est capté et exploité avec succès par plusieurs forages dans tout le territoire de la wilaya de Ghardaïa. La profondeur du toit de l'aquifère varie selon la région, il est entre 80 et 150 mètres au sud de la wilaya dans la région d'El Meniaa, par contre à l'Est le toit n'est atteint qu'à partir de la profondeur de 650 à 700 mètres (région de Zelfana et Guerrara).

(1) Agglomération oasienne située à 270 km au Sud de Ghardaïa.

(2) Agglomération oasienne située à 110 km au Nord-Est de Ghardaïa.

(3) Agglomération oasienne située à 60 km à l'Est de Ghardaïa.

Dans la vallée du M'zab le toit de l'aquifère albien est atteint à la cote de 290 à 300 mètres. L'ensemble des forages exploitants l'aquifère dans la vallée ont une profondeur moyenne de 500 mètres.

L'hydrodynamisme de la nappe varie selon l'altitude de la zone d'une part et l'épaisseur des formations sus-jacentes formant le toit de cette dernière d'autre part. La nappe est artésienne jaillissante admettant des pressions en tête des ouvrages de captage variant entre 0,5 à 4 bars dans les régions Sud et Est du territoire de la wilaya. Par contre à l'Ouest et au nord la nappe est exploitée par pompage.

Dans la vallée du M'zab la nappe albienne est exploitée par pompage à des profondeurs variant entre 100 à 150 mètres en amont et 80 à 50 mètres en aval.

6.3.3. Exploitation du CI dans la vallée du M'zab

Le premier forage profond exécuté dans la vallée du M'zab date de 1938, et depuis le nombre de forages n'a cessé d'augmenter. Selon l'inventaire de ANRH (2011), on compte actuellement plus de 59 forages exploitant la nappe du CI dans la vallée du M'zab avec un débit total de 24,90 hm³/an (Tableau 28), dont 88% est destiné pour l'alimentation en eau potable de la population de la vallée, soit un volume d'eau mobilisée de 21,90 millions de m³ par an par le biais de 39 forages.

Le secteur agricole totalise un volume d'eau exploité de 3 millions de m³ par an, soit 12% du volume total extrait de la nappe du CI dans la vallée (Fig. 55).

Tableau 28. – Nombre de forages et volumes d'exploitation de la nappe albienne dans la vallée du M'zab

Commune	Nombre de forages			Volume extrait (hm ³ /an)		
	Total	AEP	IRR	AEP	IRR	Total
Ghardaïa	32	26	6	13,97	0,63	14,60
Bounoura	13	6	7	4,40	1,23	5,63
El Atteuf	14	7	7	3,53	1,14	4,67
<i>Total</i>	59	39	20	21,90	3,00	24,90

Source \ ANRH Secteur Ghardaïa

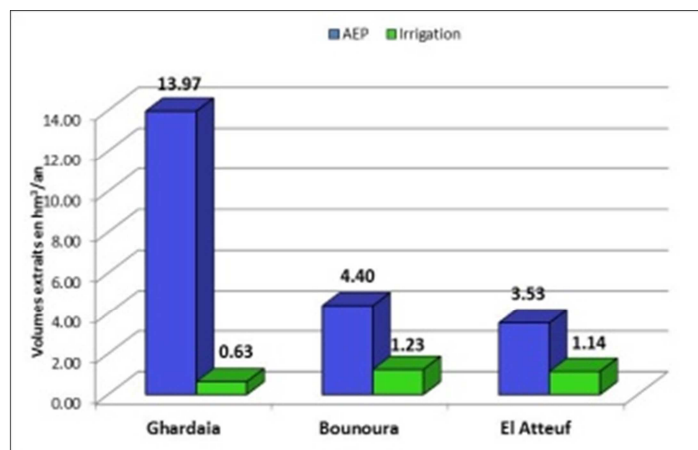


Figure 55 - Exploitation de la nappe albienne dans la vallée du M'zab par usage

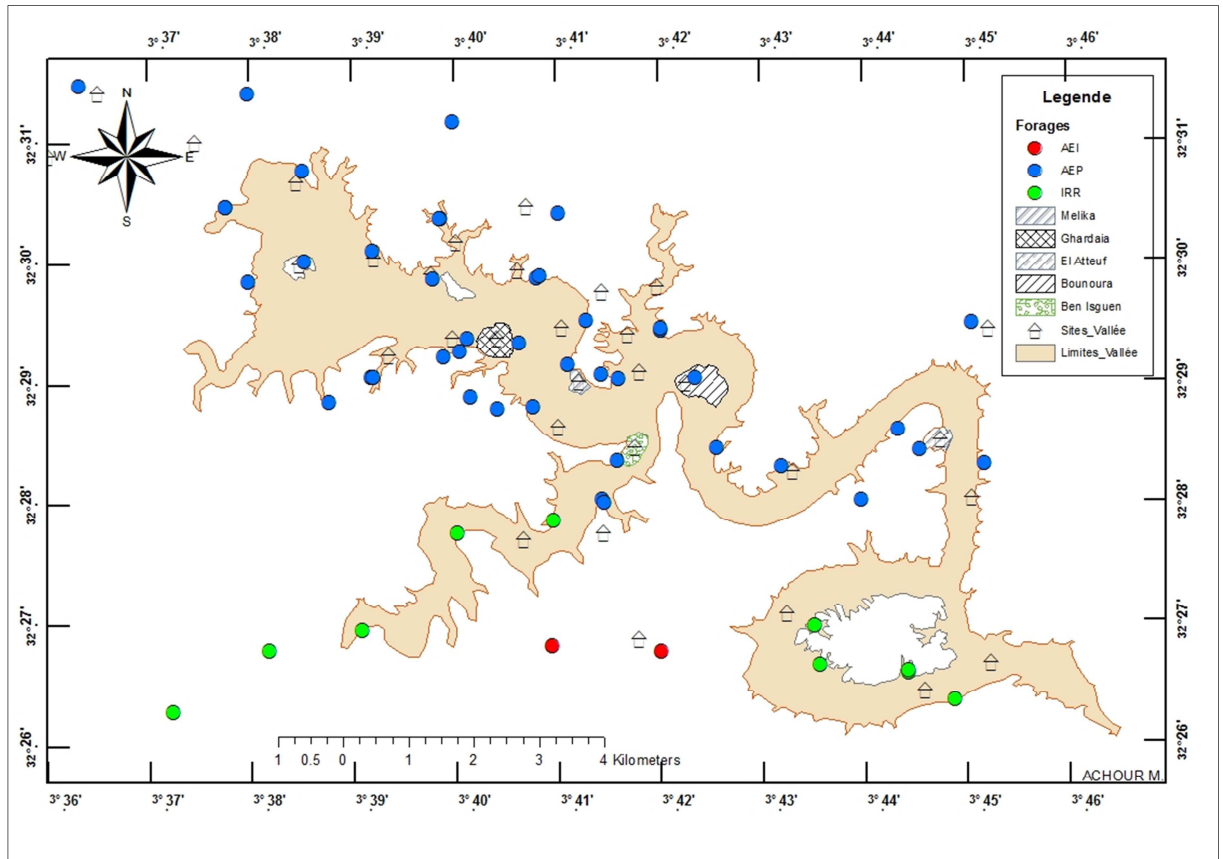


Figure 56 - Carte d'inventaire des forages exploitant la nappe albienne dans la vallée du M'zab (avril-mai, 2011)

6.3.4. Piézométrie du CI dans la région du M'zab

52 points d'eau captant l'aquifère de l'Albien et couvrant l'ensemble de notre zone d'étude ont été sélectionnés, et ayant fait l'objet d'une campagne piézométrique au cours de la période avril-mai 2011.

Ces points d'eau sont représentés, particulièrement, par des forages exploités, des forages vétustés non exploités, ainsi que des piézomètres de surveillance récemment réalisés par l'ANRH.

6.3.4.1. Exploration et distribution spatiale des données

L'utilisation des outils géostatistiques développés par l'ArcGIS, nous a permis de procéder à l'exploration et à l'analyse de la distribution spatiale des levés piézométriques de la nappe albienne dans la région du M'zab.

D'après l'histogramme de fréquence (fig. 57), il s'avère que les données piézométriques ne sont assez bien distribuées autour de leur moyenne, le tableau 29 confirme cette hypothèse où la moyenne des valeurs piézométriques est relativement inférieure à la médiane. Par conséquent, une transformation s'avère nécessaire, afin de simuler une distribution normale. Pour cela, on a opté à une transformation logarithmique (fig. 58), car elle donne une meilleure distribution des données, comme le montre le tableau 30.

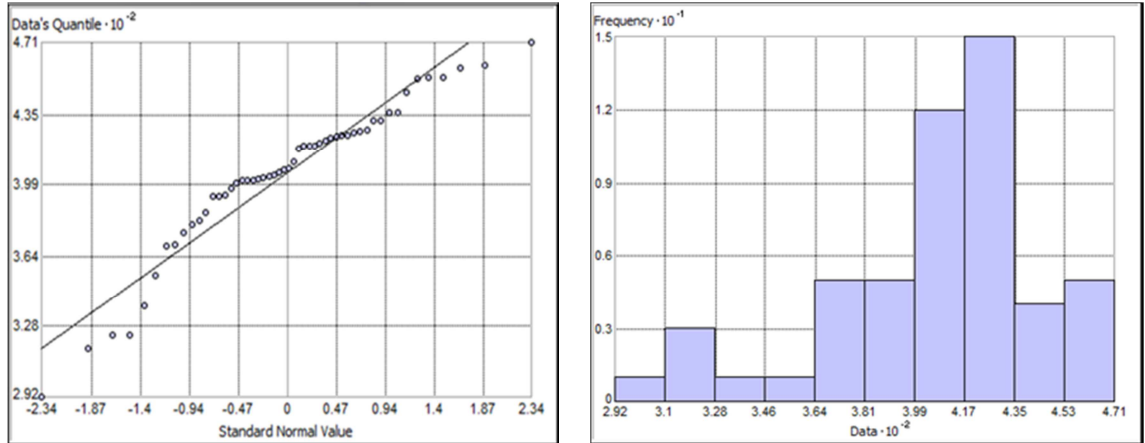


Figure 57 - Courbe quantile-quantile et histogramme de fréquences des levées piézométriques avant transformation (nappe albienne)

Tableau 29 - Paramètres statistiques des levées piézométriques avant transformation (nappe albienne)

Paramètre	Valeur
Min	292,32
Max	470,5
Moyenne	404,66
Médiane	407,05
Standard déviation	37,732
Skewness (asymétrie)	-0,95617
Kurtosis (aplatissement)	3,9278

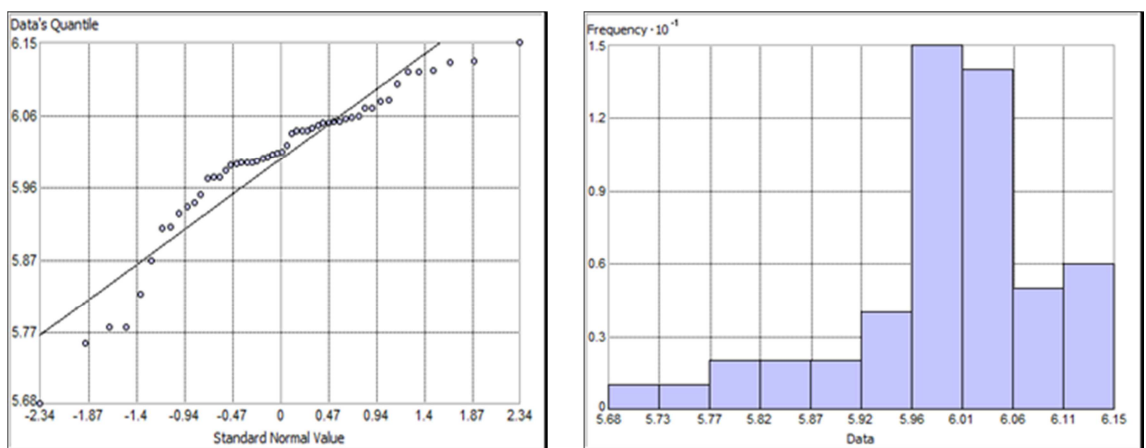


Figure 58 - Courbe quantile-quantile et histogramme de fréquences des levées piézométriques après log-transformation (nappe albienne)

Tableau 30 – Paramètres statistiques des levées piézométriques après log-transformation (nappe albienne)

Paramètre	Valeur
Min	5,6778
Max	6,1538
Moyenne	5,9984
Médiane	6,0089
Standard déviation	0,09882
Skewness (asymétrie)	-1,2541
Kurtosis (aplatissement)	4,6236

6.3.4.2. Interpolation spatiale

L'interpolation spatiale des levées piézométriques a été réalisée avec l'outil geostatistical analyst de l'ArcGIS 10, et en utilisant le krigeage ordinaire comme méthode d'interpolation. Les étapes se résument ci-dessous ;

6.3.4.3. Calcul du semi-variogramme

Le krigeage nous a permis de calculer la courbe semi-variographique (fig. 59). Après traitement, on constate que le modèle sphérique s'ajuste très bien au semi-variogramme des données piézométriques de la nappe du CI (Tableau 31).

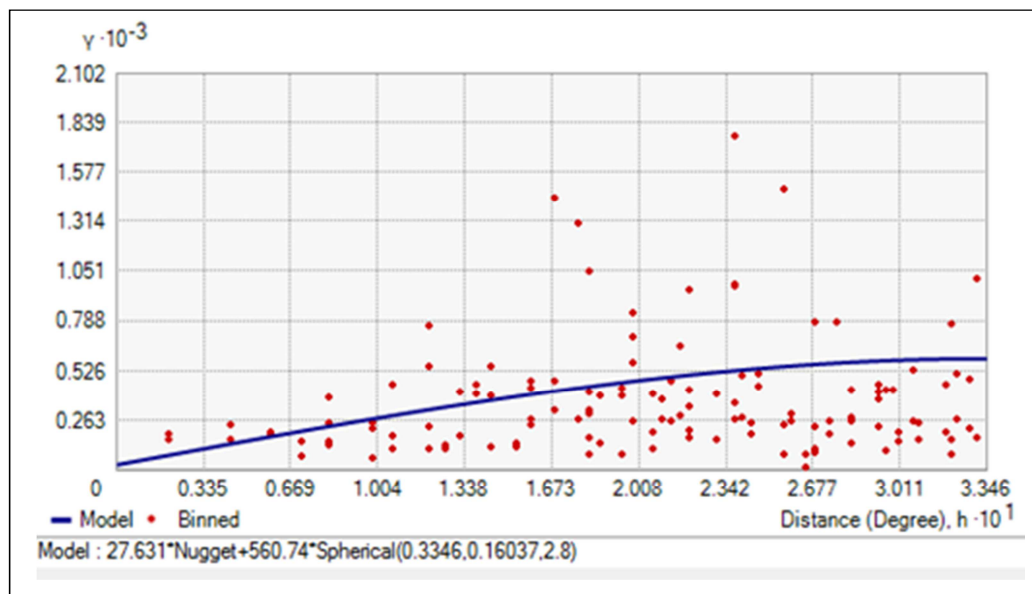


Figure 59 - Semi-variogramme à modèle sphérique des levées piézométriques (nappe albienne)

Tableau 31 – Paramètres d’ajustement optimal du semi-variogramme des levées piézométriques (nappe albienne)

Paramètre	Valeur
Modèle	Sphérique
Partial sill	560,74
Nugget	27,630
Lag size	0,02788
Number of lags	12
Angle direction	2,8

6.3.4.4. Validation croisée

La validation croisée est une méthode qui nous permet de contrôler et de vérifier le modèle ajusté, ainsi que de tester les valeurs des paramètres attribuées (fig.60).

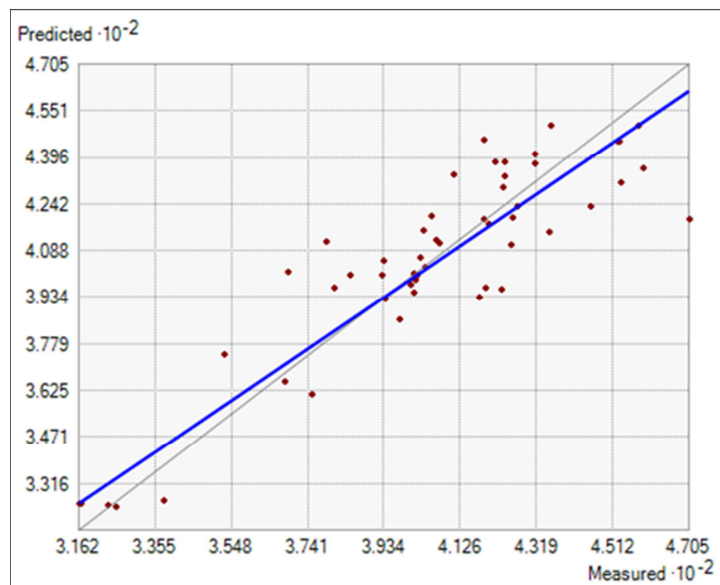


Figure 60 - Validation croisée du semi-variogramme ajusté des levées piézométriques (nappe albienne)

Le graphe ci-dessus révèle que les valeurs estimées par le modèle présentent une bonne corrélation avec celles des valeurs mesurées. De même, le tableau des calculs statistiques ci-dessous (Tableau 32) montre que les valeurs associées au semi-variogramme sont raisonnables, ce qui nous permet de valider le modèle ainsi ajusté.

Tableau 32 – Calculs statistiques de la validation croisée des levées piézométriques (nappe albienne)

Paramètre	Valeur
Mean	0,0412
Root-Mean-Square	16,0836
Mean Standardized	-0,000352
Root-Mean-Square-Standardized	0,02788

6.3.4.5. Génération de la surface piézométrique

Après la validation du modèle ajusté, on a pu générer la carte de la surface piézométrique en mode raster de la nappe albienne dans la région du M'zab (Fig 61).

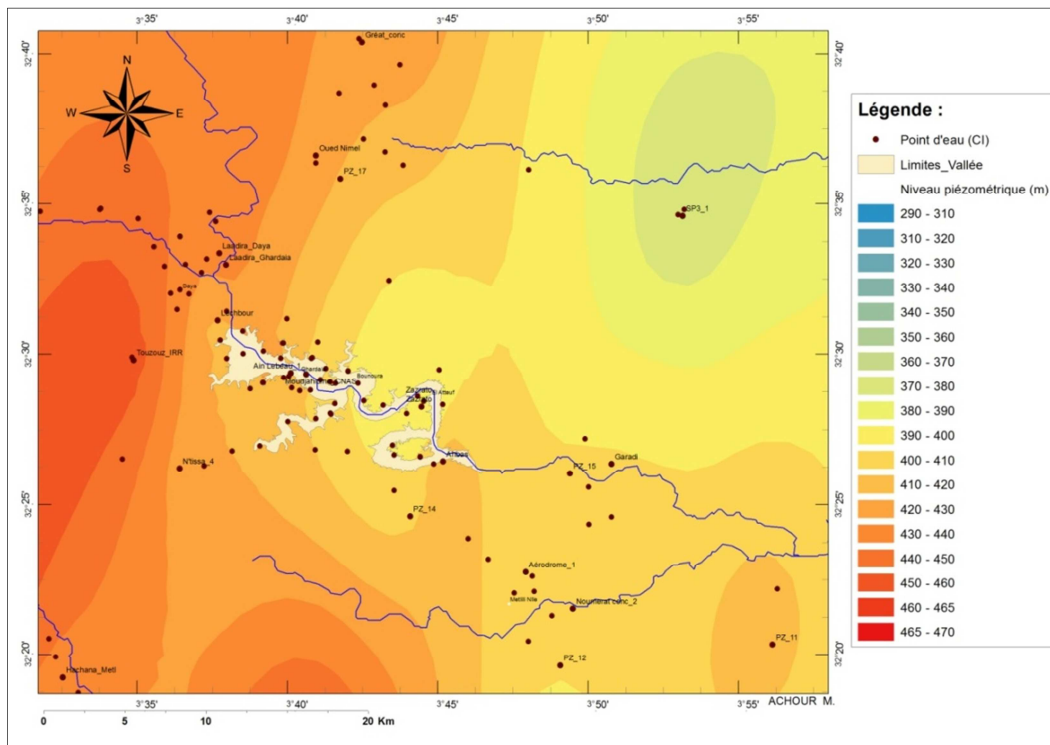


Figure 61-a - Carte de la surface piézométrique de la nappe albienne dans la région du M'zab (avril-mai, 2011)

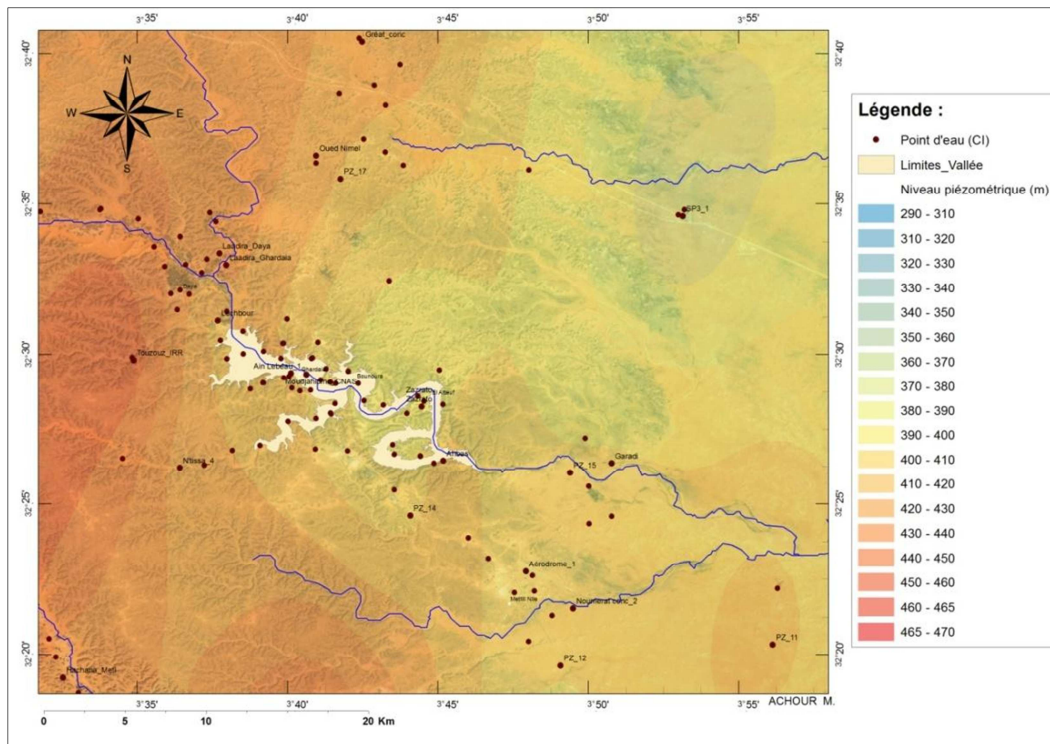


Figure 61-b - Carte de la surface piézométrique de la nappe albienne dans la région du M'zab (avril-mai, 2011)

L'examen de la carte montre une répartition spatiale assez régulière de la piézométrie de la nappe, présentant dans l'ensemble une morphologie simple avec quelques perturbations repérées notamment au niveau de la vallée du M'zab. Des fortes valeurs piézométriques sont localisées à l'Ouest et au Nord-Ouest, et diminuent progressivement tout en allant vers l'Est et au Sud-Est.

6.3.4.6. Carte des courbes piézométriques

Le tracé des lignes de courant sur la carte piézométrique (fig. 62) montre une allure générale de l'écoulement de la nappe qui s'effectue de l'Ouest vers l'Est. Cet état confirme assez bien, l'écoulement général de la nappe du Continental Intercalaire déjà connu dans tout le bassin du SASS.

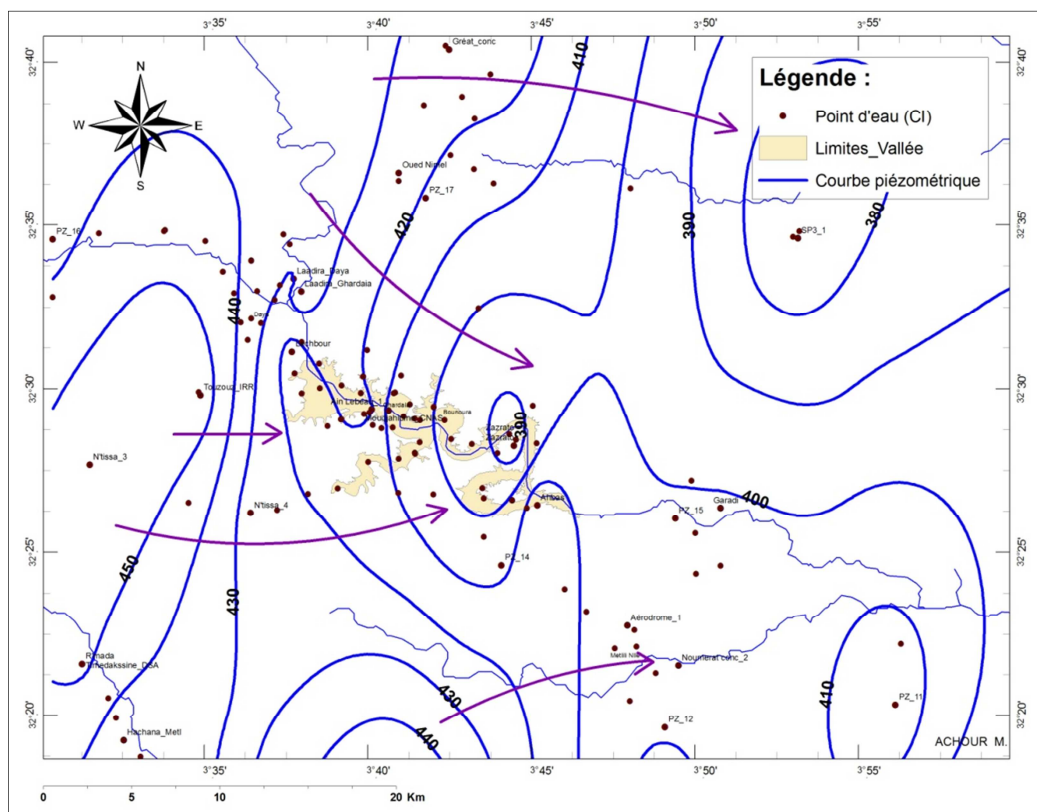


Figure 62-a - Carte des courbes piézométriques de la nappe albienne dans la région du M'zab (avril-mai, 2011)

Le gradient hydraulique est moyennement élevé au Nord de la vallée du M'zab de l'ordre de 9,5‰, par contre plus à l'Est, il devient relativement plus faible atteignant 3,2‰.

En outre, les formes et les espacements variables des courbes isopièzes, mettent en évidence une dépression piézométrique située à l'aplomb de la vallée du M'zab, engendrée, vraisemblablement, par le pompage excessif des forages d'AEP dans la région. Selon l'ADE, le pompage est maintenu continuellement pendant 24 heures, afin de satisfaire la population en eau potable.

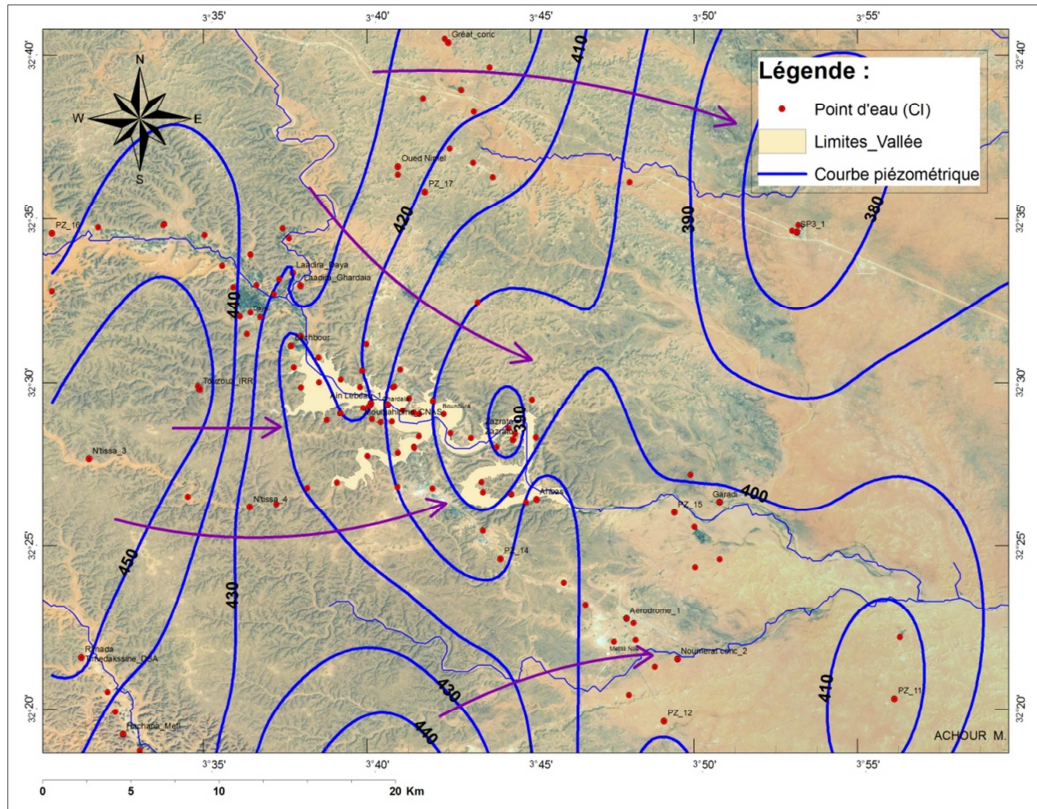


Figure 62-b - Carte des courbes piézométriques de la nappe albienne dans la région du M'zab (avril-mai, 2011)

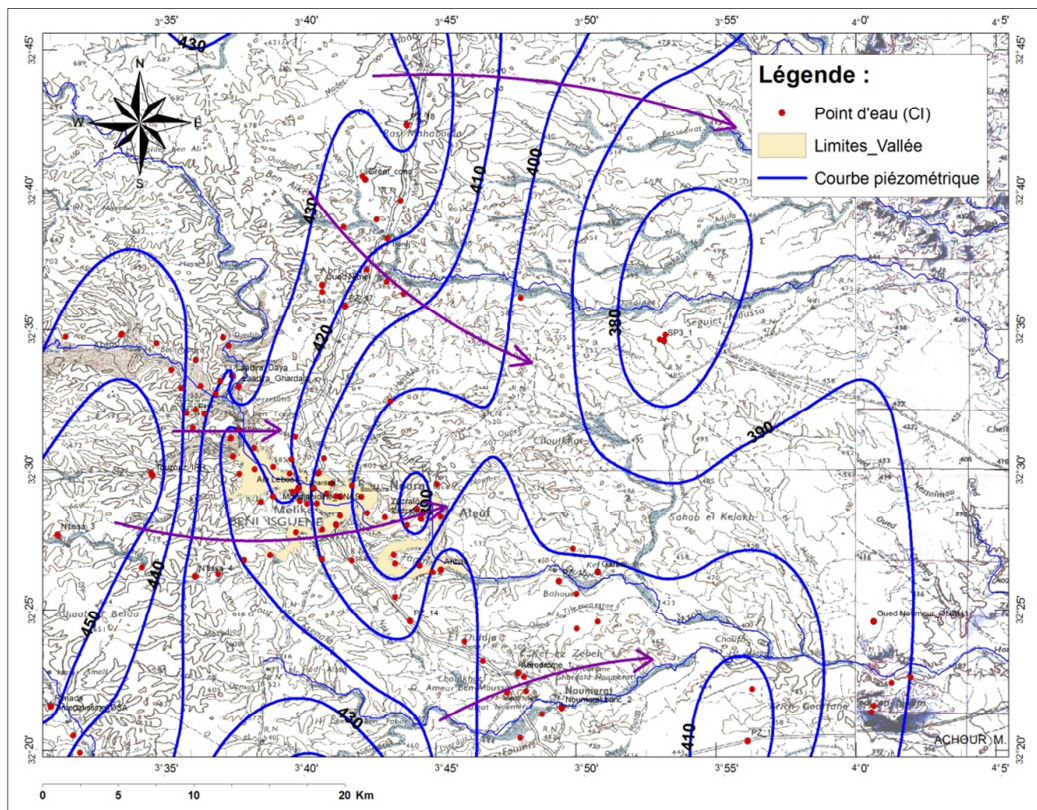


Figure 62-c - Carte des courbes piézométriques de la nappe albienne dans la région du M'zab (avril-mai, 2011)

6.4. La nappe phréatique de l'oued M'zab

Il s'agit d'une nappe superficielle type d'Inféro-flux, largement exploitée par des puits. La nappe est localisée dans les alluvions sableuses du lit de l'oued M'zab, ainsi que dans la partie supérieure du fond de la vallée formée de calcaire massif du Turonien.

Ces assises carbonatées turoniennes d'une épaisseur de 110 mètres, présentent parfois des fissures et des karsts dans lesquels l'eau peut s'infiltrer.

6.4.1. Piézométrie de la nappe phréatique

Pour avoir une idée sur l'écoulement souterrain des eaux de la nappe phréatique, ainsi que l'allure de sa surface piézométrique, on a procédé à une campagne de mesure des niveaux statiques et de positionnement par GPS portée sur 66 puits agricoles (fig. 63) effectuée au cours de la période avril-mai 2011.

Dans les zones urbaines, à défaut de puits, on n'a pas pu prendre les mesures.

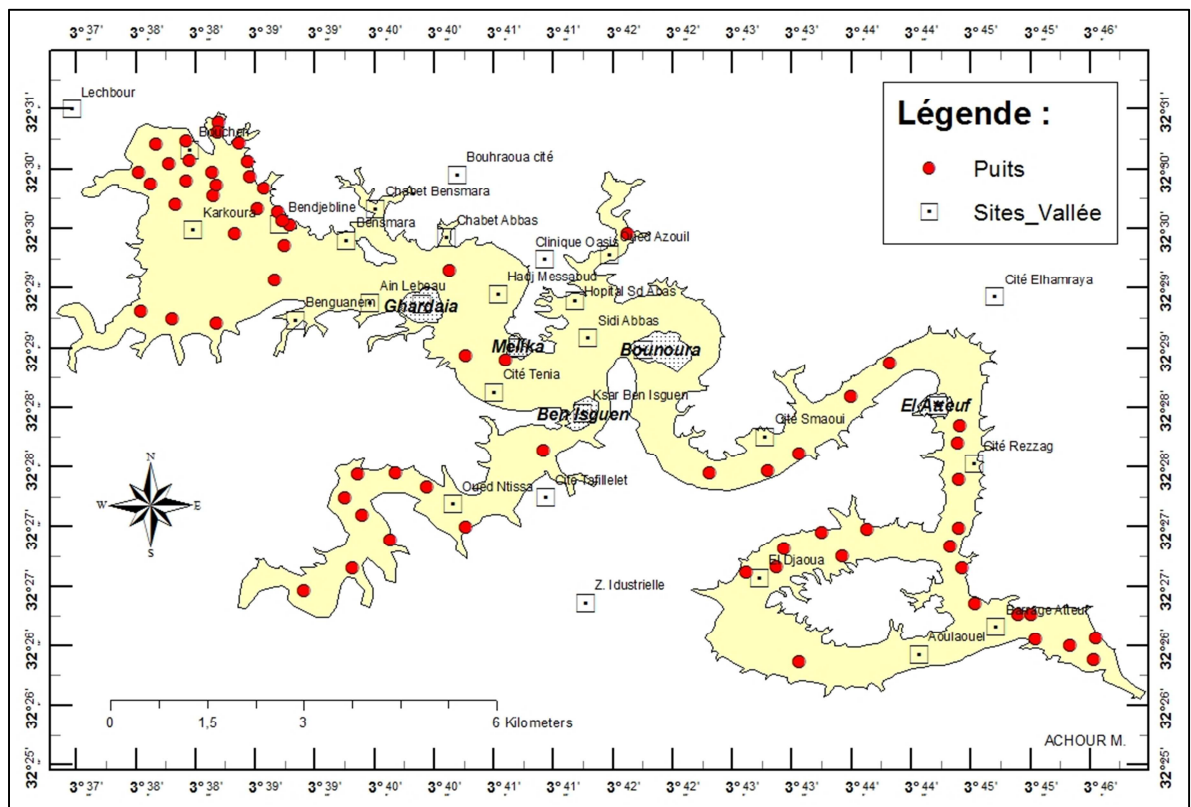


Figure 63 - Carte d'inventaire des puits de la nappe phréatique de la vallée du M'zab (avril-mai, 2011)

6.4.1.1. Exploration et distribution spatiale des données

D'après les tableaux 33 et 34 ci-dessous, on remarque que l'ajustement logarithmique donne une meilleure simulation de la distribution normale. La moyenne et la médiane ont des valeurs très proches.

Tableau 33 – Paramètres statistiques des levées piézométriques avant transformation (nappe phréatique)

Paramètre	Valeur
Min	434,5
Max	520,94
Moyenne	478,67
Médiane	489,96
Standard déviation	28,584
Skewness (asymétrie)	-0,35294
Kurtosis (aplatissement)	1,4878

Tableau 34 – Paramètres statistiques des levées piézométriques après log-transformation (nappe phréatique)

Paramètre	Valeur
Min	6,0742
Max	6,2556
Moyenne	6,1692
Médiane	6,1943
Standard déviation	0,060449
Skewness (asymétrie)	-0,37832
Kurtosis (aplatissement)	1,4177

6.4.1.2. Interpolation spatiale

L'interpolation des données piézométriques a été effectuée avec la méthode du krigeage ordinaire, car elle reflète mieux la réalité du terrain. L'outil geostatistical analysis du logiciel ArcGis nous a été de grande utilité.

6.4.1.3. Calcul du semi-variogramme

Le meilleur ajustement du semi variogramme des données piézométriques de la nappe phréatique a été obtenu par le modèle stable (fig. 64), les paramètres d'ajustement figurent dans le tableau 35 ci-dessous ;

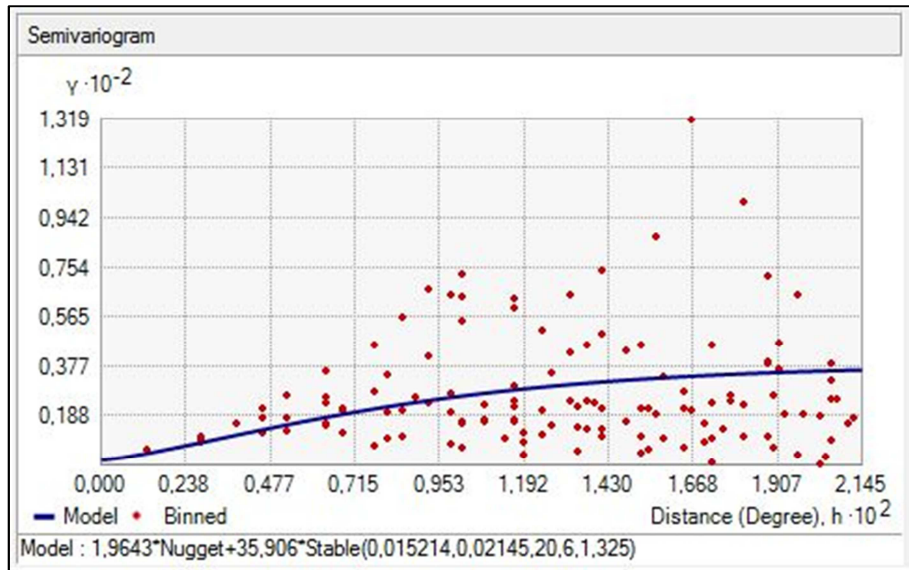


Figure 64 - Semi-variogramme à modèle stable des levées piézométriques (nappe phréatique).

Tableau 35 – Paramètres d’ajustement optimal du semi-variogramme des levées piézométriques (nappe phréatique)

Paramètre	Valeur
Modèle	Stable
Partial sill	32,94
Nugget	4,587
Lag size	0,00178
Number of lags	12
Angle direction	114

6.4.1.4. Validation croisée

Les valeurs obtenues par le modèle présentent une bonne corrélation avec les valeurs réelles la droite de la regression a une pente égale à 0,98 (fig. 65).

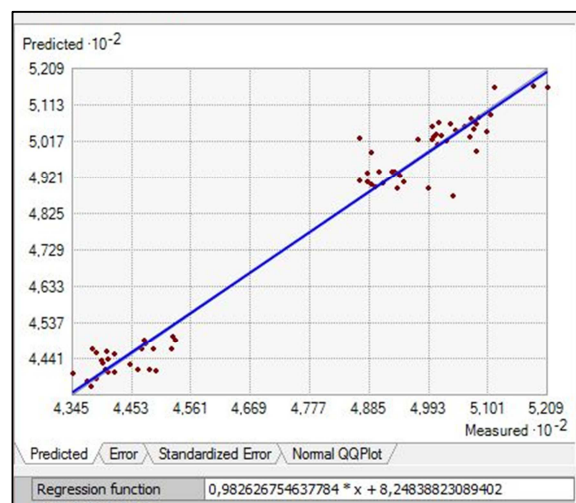


Figure 65 - Validation croisée du semi-variogramme ajusté des levées piézométriques (nappe phréatique)

Tableau 36 – Calculs statistiques de la validation croisée des levées piézométriques (nappe phréatique)

Paramètre	Valeur
Mean	0,0799
Root-Mean-Square	4,94553
Mean Standardized	0,005597
Root-Mean-Square-Standardized	1,069197

Les valeurs statistiques figurant dans le tableau 36 ci-dessus révèlent que les valeurs ajustées au modèle sont raisonnables, ce qui nous permet de valider ainsi le modèle.

6.4.1.5. Génération de la surface piézométrique

A l'aide du modèle semi-variographique ajusté on a pu construire la surface piézométrique de la nappe phréatique en mode raster (fig. 66).

La carte montre une surface assez régulière, des fortes valeurs piézométriques sont localisées en amont de la vallée et de ses deux artères oued N'tissa et oued Azouil, puis elles diminuent progressivement le long de l'oued jusqu'à la zone d'El Atteuf aval de la nappe.

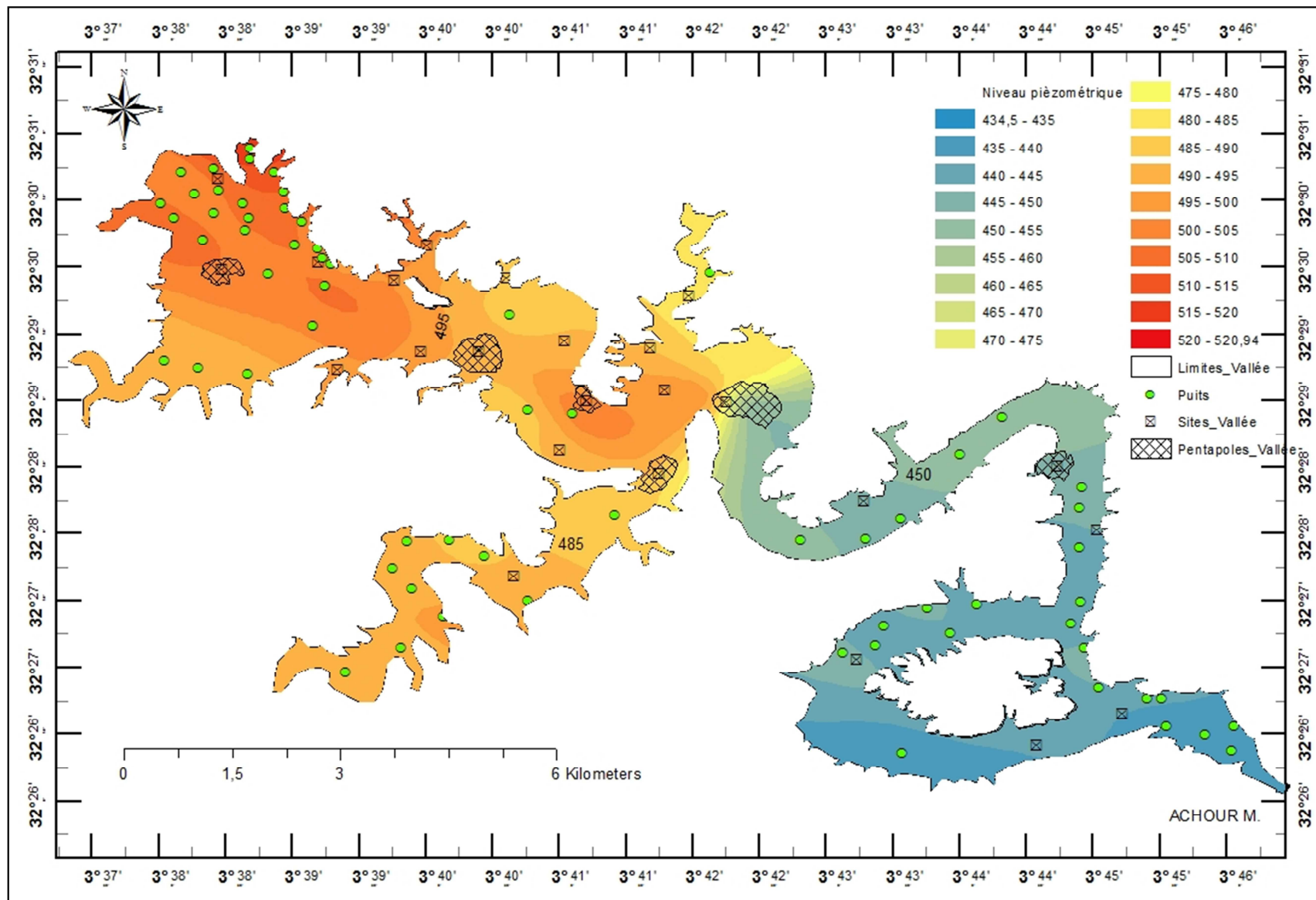


Figure 66 - Carte de la surface piézométrique de la nappe phréatique de la vallée du M'zab (avril-mai, 2011)

6.3.4.6. Carte des courbes piézométriques

La carte des courbes isopièzes (fig. 67) montre que l'écoulement général de la nappe phréatique s'effectue approximativement du Nord-Ouest vers le Sud-Est le long de l'oued M'zab. L'allure des courbes met en évidence une nappe radiale à écoulement convergeant.

Le gradient hydraulique est de 9,3‰ en amont et atteint 4,3‰ en aval. Une forte valeur de celui-ci est à constater au niveau de la région de Bounoura (4,6%), elle est due, probablement au rétrécissement de la section ou à la faible perméabilité de l'aquifère dans cette zone.

En plus, la forme des courbes piézométriques révèle que les affluents de l'oued M'zab contribuent largement à l'alimentation de la nappe, il s'agit notamment des oueds Touzouz, Aregden, Azouil et N'tissa.

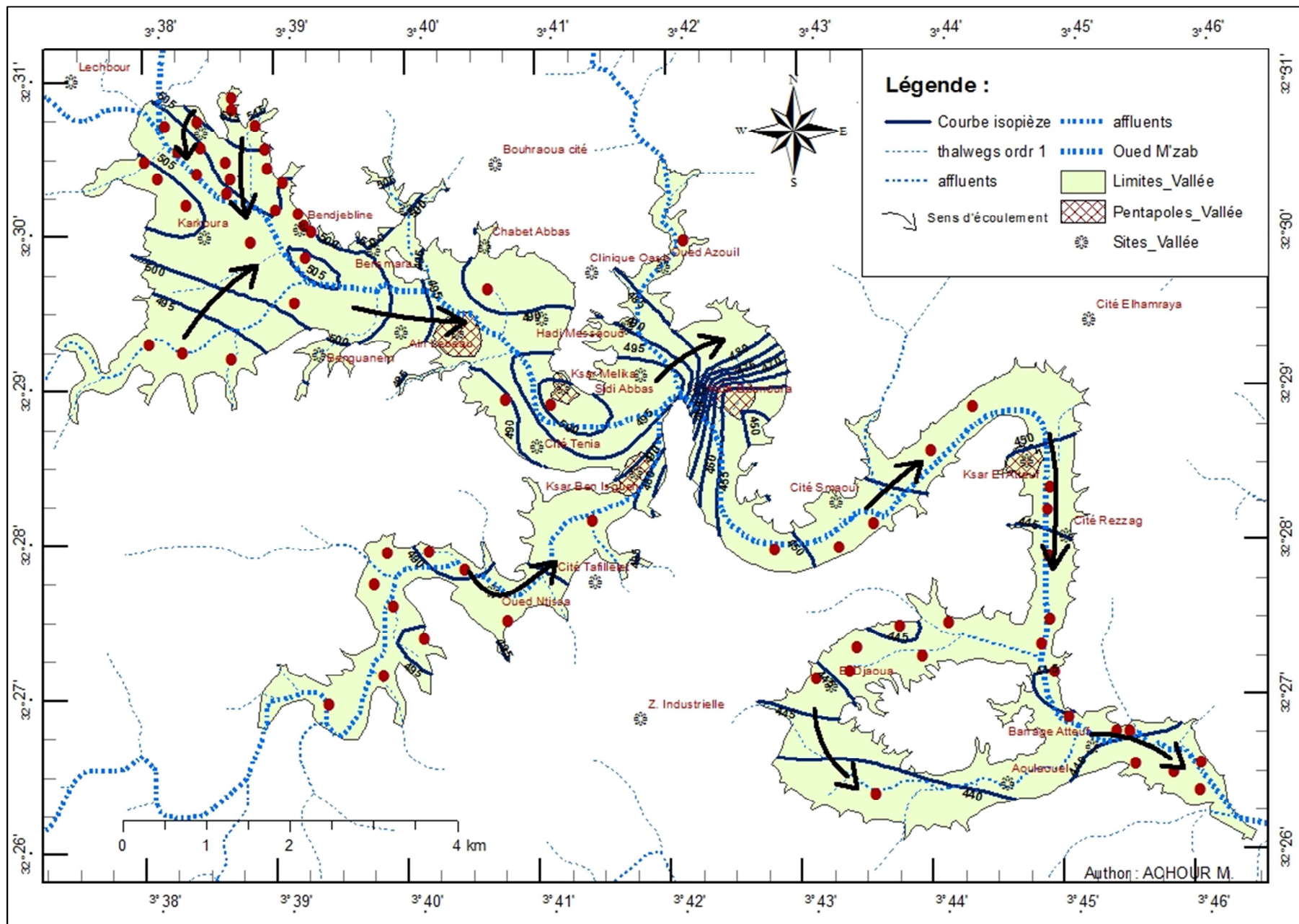


Figure 67 - Carte des courbes piézométriques de la nappe phréatique de la vallée du M'zab (avril-mai, 2011)

CHAPITRE VII

CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE INTRINSEQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE

7.1. Introduction

L'accroissement démographique et le développement agricole et industriel ont engendré une très forte demande en eau, nécessitant une grande mobilisation de cette ressource. A cet effet, les eaux souterraines dans les zones arides représentent les principales ressources en eau exploitables. En raison de leur rareté ainsi que la multiplication des sources de pollution (eaux usées et industrielles, décharges brutes, engrais chimiques ...etc.), ces ressources nécessitent un certain degré de protection.

Au préalable, la protection de ces eaux souterraines peut être caractérisée par un certain degré de leur vulnérabilité à la pollution. Une nappe phréatique proche du sol est très vulnérable à la pollution provenant du sol, par contre une nappe captive, naturellement protégée par une formation imperméable n'est donc pas vulnérable à la pollution de surface.

Dans ce chapitre nous allons essayer de cartographier le degré de protection à la pollution des eaux de la nappe phréatique de la vallée du M'zab, tout en appliquant l'une des méthodes paramétriques développées pour la détermination du degré de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. Ces méthodes sont largement connues et utilisées dans le domaine de l'hydrogéologie.

7.2. Notion de vulnérabilité

Dans le domaine des ressources en eau souterraine, la notion de vulnérabilité est fondée sur l'idée que le milieu physique (complexe : sol-roche-eau souterraine) procure un degré plus moins élevé de protection à l'égard de polluants infiltrant dans le sol. Le degré de pollution des eaux souterraines est apprécié par la mesure de l'écart entre la teneur des minéraux dissous d'origine naturelle et les caractéristiques physico-chimiques de ces eaux.

La vulnérabilité est une propriété relative, non mesurable et sans dimension. Elle reflète la sensibilité des aquifères à la pollution, elle a été introduite dans les années 1960, où le concept original a été appelé 'vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination' (BRGM, 2002).

7.3. Types de vulnérabilité

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilités ; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (BRGM, 2002) Selon le milieu géologique, les conditions climatiques locales, ainsi que les propriétés spécifiques liées aux contaminants.

7.3.1. La vulnérabilité intrinsèque

Elle est utilisée pour représenter les caractéristiques du milieu qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités anthropiques ;

7.3.2. La vulnérabilité spécifique

Le terme est utilisé pour caractériser la vulnérabilité des eaux souterraines à un ou d'un groupe de polluants. Elle prend en considération les propriétés spécifiques de ces polluants.

A mentionner qu'à l'échelle de l'investigation, les deux types de vulnérabilité ne peuvent être placés sur le même niveau. La vulnérabilité intrinsèque est considérée comme invariante dans le temps, alors que la vulnérabilité spécifique est instantanée, liée surtout aux sources de pollution. D'autre part, la vulnérabilité spécifique est prise en compte pour répondre généralement à un problème bien particulier (spécifique).

7.4. Les critères déterminant la vulnérabilité intrinsèque

Multiplés facteurs intervenant dans l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque d'une nappe d'eau, ces facteurs contrôlent le comportement de l'infiltration des polluants, ainsi que le temps de leur transfert. La détermination de la vulnérabilité prend en considération les propriétés du sol, de la zone non saturée (ZNS) et la zone saturée (nappe).

7.4.1. Critères liés au sol

Le sol représente la couche la plus superficielle reposant sur le sous-sol rocheux. C'est un milieu hétérogène polyphasé, composé par des minéraux aluminosilicates issus de l'altération des roches mères, ainsi que de la matière organique. Dans le processus de l'infiltration des polluants à la nappe, les propriétés du sol influent largement sur ce mécanisme de transfert, entre autres, la texture, la porosité, la composition minéralogique et chimique, l'état redox, l'acidité et la teneur en argiles et en matière organique.

La topographie du sol joue aussi un rôle important dans le processus de migration du polluant vers la nappe, elle conditionne la détermination des zones d'infiltration préférentielle de la nappe. De ce fait, elle peut être considérée comme représentatif de la recharge efficace de la nappe.

C'est ainsi qu'il est utile de caractériser le sol pour y arriver à comprendre et à simuler le comportement des polluants et les conséquences possibles.

7.4.2. Critères liés à la zone non saturée (ZNS)

La zone non saturée englobe l'ensemble des niveaux du sous-sol situés directement au-dessus de la nappe d'eau (la zone saturée). Ces niveaux contiennent à la fois de l'eau et de l'air. Les critères régissant la propagation du contaminant dans cette zone sont multiples et complexes, on retrouve ;

7.4.2.1. Epaisseur de la zone non saturée

L'épaisseur de la ZNS conditionne généralement le temps du transfert du polluant vers la nappe et sa possibilité de dégradation.

7.4.2.2. Perméabilité verticale

La perméabilité verticale dicte en général le temps de transfert vertical du polluant de la surface du sol vers la nappe.

7.4.2.3. Structure de la zone non saturée

La texture, la teneur en matière organique et en argiles, les variations de faciès, le degré d'hétérogénéité et le degré de fissuration de la zone non saturée, constituent autant de facteurs qui conditionnent la propagation d'un polluant jusqu'à la nappe.

7.4.3. Critères liés à la zone saturée

La vulnérabilité dans la zone saturée est contrôlée par plusieurs facteurs qui sont ;

7.4.3.1. Type de nappe

Il va de soi qu'une nappe libre dépourvue d'un horizon imperméable entre le toit et la surface du sol, est plus vulnérable à la pollution de surface qu'une nappe d'eau captive qui est protégée par des horizons imperméables.

7.4.3.2. Paramètres hydrodynamiques

Ils déterminent la vitesse de propagation des polluants dans la nappe, ainsi que le temps de séjours dans la zone saturée. Ces paramètres hydrodynamiques sont ; la transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emménagement et le gradient hydraulique.

7.4.3.3. Piézométrie de la nappe

La piézométrie retrace la géométrie de la nappe et son fonctionnement hydrodynamique (direction des écoulements, relation avec les eaux superficielles ... etc.).

7.4.3.4. Epaisseur de l'aquifère réservoir

La quantité de la réserve d'eau stockée détermine les conditions de dilution des contaminants une fois ayant atteint la zone saturée (nappe).

7.4.3.5. Limites d'écoulement

Les écoulements des eaux souterraines aux limites d'un aquifère peuvent alimenter la nappe, comme ils peuvent drainer les eaux de celle-ci. Ces limites peuvent, dans certains cas, favoriser la contamination des eaux de l'aquifère à partir des eaux superficielles.

7.4.3.6. Pouvoir filtrant de l'aquifère réservoir

Deux principaux types de réservoirs d'eau souterraine sont à distinguer ; les aquifères homogènes à perméabilité d'interstices. Ils sont composés de matériaux détritiques et disposant un pouvoir auto-épurateur très important. Les aquifères hétérogènes à perméabilité de fissures. Dans ceux-ci la vitesse d'écoulement des eaux est rapide, d'où un pouvoir auto-épurateur quasiment nul.

Cette catégorie d'aquifères peut se retrouver dans les milieux fissurés et les milieux carbonatés karstiques.

Les critères de vulnérabilité mentionnés ci-dessus associés aux ensembles souterrains dans lesquels ils interviennent, sont récapitulés dans le tableau 37 ci-dessous.

Tableau 37 – Critères de vulnérabilités couramment pris en compte (BRGM, 2002)

VULNERABILITE INTRINSEQUE		
Sol	Zone non saturée (ZNS)	Zone saturée
Topographie (pente)	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe (libre ou captive)
Pédologie (perméabilité verticale des sols, nature et texture des sols)	Temps de transfert (perméabilité verticale)	Temps de résidence (dépend de l'hydrodynamisme des formations aquifères)
Bilan hydrique (ruissellement et infiltration efficace)		Relation eaux souterraines/eaux superficielles
	Structure de la ZNS (variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matière organique et argile)	Piézométrie (sens et direction d'écoulement et évolutions selon la période du cycle hydrologique)
	Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)
		La recharge (recharge annuelle nette).
		Type de système hydrogéologique (caractères plus ou moins capacitif et transmissif)
Battement de nappe		
Fracturation (directions et densité)		

7.5. Méthodes de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque

7.5.1. Introduction

La cartographie permet d'identifier la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination. L'analyse bibliographique que nous avons effectuée, nous révèle un important nombre de méthodes de cartographie qui ont été mises au point pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines. Toutes ces méthodes sont basées sur des systèmes paramétriques à cotation numérique (index). La vulnérabilité est évaluée par la combinaison des cartes des critères calculés, en faisant appel au moyen de logiciels de traitement multicritères ; tels que les SIG.

Ces méthodes de cartographie à pondération des critères "Point Count Systems Models" (PCSM), sont considérées actuellement les plus pertinentes vis-à-vis de réalités de terrain (BRGM, 2005) en intégrant les différents critères affectant la vulnérabilité, et d'autre part, leur mise en application est rendue possible grâce à l'utilisation des SIG, ayant la capacité de gérer une très importante masse de données spatiales.

La carte finale de vulnérabilité va représenter les zones ayant une même classe de vulnérabilité par le même code couleur, les couleurs claires pour les zones de faible vulnérabilité et les foncées pour les zones de forte vulnérabilité.

7.5.2. Méthodes de cartographie

Différentes méthodes ont été développées et testées concernant la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque, que ce soit pour les milieux fissurés, karstiques ou les milieux poreux. Les principales sont représentées ci-dessous.

7.5.2.1. Méthode GOD

Le système GOD a été développé en Angleterre par Foster en 1987, il permet de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère face à une percolation verticale de polluants via la zone non saturée (ZNS). La méthode est fondée sur l'identification de trois paramètres ;

- Type de nappe (Groundwater occurrence) :G ;
- Type d'aquifère en fonction de son degré de confinement (Overall aquifer class) :O ;
- Profondeur à la nappe (Depth to groundwater table) : D.

Les conditions d'application du système GOD stipulent que la source de pollution potentielle soit localisée à la surface du sol, et que le polluant y est entraîné par infiltration efficace depuis la surface jusqu'à la zone saturée.

L'indice de vulnérabilité GOD (I_{GOD}) est obtenu par la multiplication des indices de chacun des trois paramètres selon la formule ;

$$I_{GOD} = I_G \times I_O \times I_D$$

Avec ; I_G : type d'aquifère ; I_O : lithologie de l'aquifère ; I_D : Profondeur à la nappe.

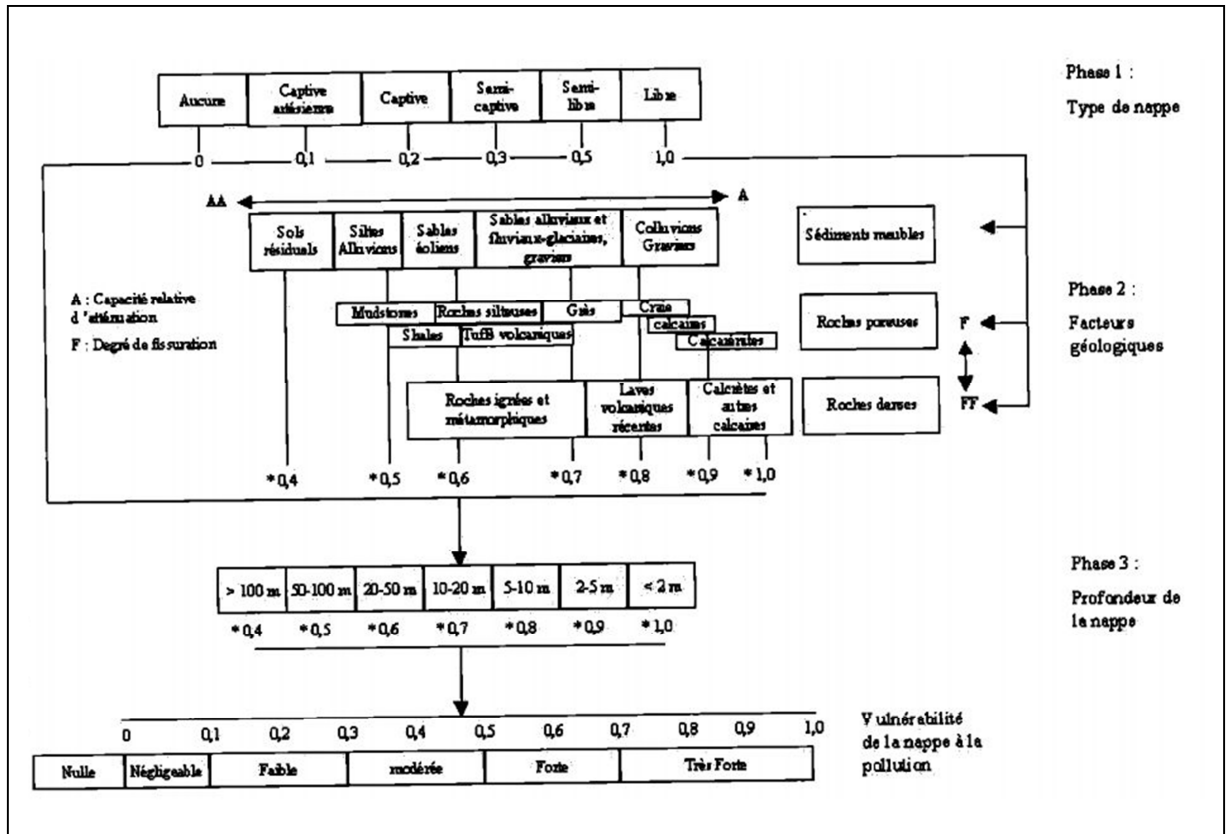


Figure 68 - Etapes d'estimation de la vulnérabilité par le système GOD (Foster, 1987)

Les cotes attribuées aux classes des différents paramètres sont inférieures ou égales à 1. Les indices GOD (I_{GOD}) sont répartis en cinq classes de vulnérabilité allant du très faible à l'extrême, avec valeur minimum 0 et valeur maximum 1. Le degré de vulnérabilité augmente avec l'indice GOD (I_{GOD}).

7.5.2.2. Méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'Association Nationale des Puits d'Eau (NWWA) en coopération avec l'Agence de Protection de l'Environnement (EPA) des Etats-Unis (BRGM, 2002), elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale des eaux souterraines en se basant essentiellement sur des facteurs hydrogéologiques affectant et régissant les écoulements des eaux souterraines. Sept critères sont pris en compte dans le calcul de l'indice de vulnérabilité ;

- Distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée (Depth to groundwater) : D
- Recharge de l'aquifère : R ;
- Nature de la zone saturée (aquifer media) : A ;
- Nature du sol (soil media) : S ;
- Topographie, pente en % (topography) : T ;
- Nature de la zone non saturée (impact of the vadose zone) : I ;
- Perméabilité de l'aquifère (conductivity) : C.

Chaque paramètre est classé en classes associées à des cotes variant de 1 à 10. Une valeur numérique appelée poids paramétrique, comprise entre 1 et 5, est ensuite attribuée à chaque paramètre selon son degré d'influence. Les valeurs de l'indice de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère sont alors calculées en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants suivant la formule ;

$$D_{DRASTIC} = D_n D_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p$$

Avec; n: notation accordée à chaque paramètre, p: facteur de pondération accordée à chaque paramétré.

Les valeurs de l'indice DRASTIC ($D_{DRASTIC}$) sont ensuite groupées en quatre classes de degrés de vulnérabilité : faible, moyen, élevé et très élevé. L'indice $D_{DRASTIC}$ le plus élevé correspond au degré de vulnérabilité. Les notations accordées aux paramètres figurent dans l'annexe C.

La méthode DRASTIC peut être utilisée pour l'estimation de la vulnérabilité aux pesticides, mais les indices utilisés sont différents (Murat V., 2000).

7.5.2.3. Méthode SINTACS

La méthode SINTACS a été développée en Italie au début des années 1990. Elle représente une adaptation de la méthode DRASTIC aux conditions hydrogéologiques de l'Italie (BRGM, 2002). La méthode SINTACS prend en considération les mêmes paramètres que la méthode DRASTIC mais avec des poids et des cotes différentes.

L'index de vulnérabilité $I_{SINTACS}$ est calculé selon la formule ;

$$I_{SINTACS} = K_{P(1,7)} \times W_{(1,5)}$$

Avec : Index des critères 1 à 7, poids de chaque classe (varie de 1 à 5).

SINTACS présente six classes de degrés de vulnérabilité, mais la spécificité de la méthode consiste au fait qu'elle propose cinq scénarios différents de vulnérabilité :

- scénario «impact normal» pour les régions faiblement cultivées et peu urbanisées ;
- scénario «impact sévère» pour les régions où l'occupation des sols est intensive, à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, la présence de zones industrielles et urbaines denses ;
- Scénario «drainage important à partir d'un réseau superficiel» scénario relatif aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau ;
- Scénario «Terrain très karstifié»;
- Scénario «Terrain fissuré».

7.5.2.4. Méthode SI (Susceptibility Index)

Cette méthode d'évaluation de la vulnérabilité verticale a été développée au Portugal par Ribeiro (2000). Elle prend en compte les pollutions d'origine agricole, essentiellement les nitrates et les pesticides, elle utilise cinq paramètres. Les quatre premiers sont identiques aux méthodes DRATIC et SINTACS, le cinquième est un nouveau paramètre qui a été introduit, il s'agit de l'occupation des sols (OS).

Selon les valeurs de l'indice de vulnérabilité, la méthode SI présente quatre classes de degrés de vulnérabilité.

7.5.3. Conclusion

Les méthodes multicritères développées pour évaluer et cartographier la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution sont très variées. On distingue des méthodes ayant un nombre réduit de critères tel que la méthode GOD, et des méthodes ayant un grand nombre de critères tels que les méthodes SINTAC et DRASTIC.

Le choix de la méthode, la notation des critères, ainsi que les poids à attribuer constituent une difficulté souvent rencontrée lors de la mise en application de ces méthodes. Il est difficile d'établir une méthode universelle de cartographie de la vulnérabilité, car chaque cas étudié est différent d'un autre, et un paramètre important dans un cas ne le sera pas forcément dans un autre cas (Schnebelen et al., 2002).

En outre, la quantité et la qualité des données rassemblées influent largement sur le choix de la méthode à adopter pour apprécier la vulnérabilité à la pollution, et aussi sur la précision de la carte finale de la vulnérabilité. Il va de soi qu'une carte réalisée à partir des informations nombreuses et précises aura toujours un poids supérieur à une autre réalisée à partir de données disparates et de qualité discutable (BRGM, 2002). De ce fait, l'application de l'une des méthodes paramétriques proposées pour cartographier la vulnérabilité d'un aquifère, implique une connaissance très approfondie de son système hydrogéologique.

7.6. Apport des SIG

D'une façon assez simple, les systèmes d'information géographique se définissent en tant qu'un ensemble de systèmes informatiques servant pour stocker et manipuler l'information géographique. Le point fort des SIG réside particulièrement, dans leur capacité de relier les objets géographiques à leurs attributs thématiques. Cette dernière fonction est très utile en ce qui concerne le calcul et l'établissement d'une carte des indices de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines.

Il existe deux principaux modèles utilisés pour représenter les données dans un SIG ;

- Modèle à systèmes vectoriels : dans lequel le traitement de l'information se fait sous forme d'entités telles que les polygones, les polylines ou les points.
- Modèle à systèmes matriciels : dans lequel l'information est lue et traitée sous forme de pixels qui constituent la grille numérique ou matrice spatiale, chaque pixel reçoit une valeur bien déterminée.

7.7. Outils SIG utilisés

Les logiciels tournant dans l'environnement des SIG sont nombreux et variés. Il y a les logiciels à systèmes vectoriels tels que : MapInfo et Global Mapper, les logiciels à systèmes matriciels, tels que : IDRISI et ENVI, et enfin les logiciels à système vectoriels et matriciels comme l'ArcGIS.

Dans le cadre de cette étude, on a utilisé l'ArcGIS 10 développé par ESRI pour réaliser la carte des indices de vulnérabilité à la pollution de la nappe du M'zab. Ce logiciel doté de fonctions et outils mathématiques puissants, permet de travailler en systèmes vectoriels et matriciels. Son utilisation est très conviviale.

7.8. Base de données type GéoDatabase

Tout projet mis en place par le SIG nécessite utilement la construction d'une base de données. Cette base représente le cœur du système d'information géographique. Sous le logiciel ArcGIS, elle est baptisée GéoDatabase, ce format de de base de données prend en charge le stockage, l'affichage, ainsi que le traitement et l'analyse de données relationnelles de référence et thématiques (fig. 69).

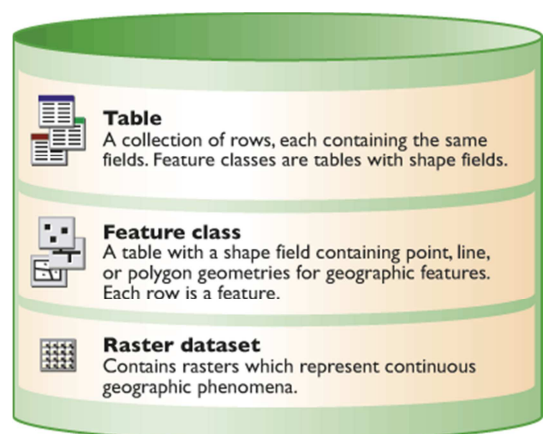


Figure 69 - structure d'une GéoDatabase sous ArcGIS (ESRI, 2010)

La GéoDatabase est un espace de travail à base de fichier dont la taille ne dépasse les 2 GO (ESRI, 2010). Les fichiers stockés dans cette base peuvent être des entités spatiales ou non, on distingue ;

- Fichiers de type **Feature class** : ce sont des classes d'entités contenant les objets vectoriels à entité spatiale (points, polygones, polygones), appelés aussi fichiers de formes (Shapefiles) ;
- Fichiers de type **Feature DataSet** : représentent un ensemble de classes d'entités (shapefiles) ayant des relations topologiques.
- Fichiers de type **Table** : ce sont des tables pour représenter les entités non spatiales. Ils peuvent être reliés et joints à d'autres tables ou classes d'entités de la même géodatabase.
- Fichiers de type **Raster DataSet** : ce sont des grilles matricielles à base de pixels, tel que les fichiers MNT et les cartes d'interpolation.

7.9. Choix de la méthode

La diversité des méthodes développées pour l'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, rend le choix très délicat. Ainsi choisir une méthode implique une connaissance approfondie de l'ensemble du système aquifère.

Néanmoins, la méthode à retenir doit remplir les conditions d'utilisation préconisées par ses concepteurs, particulièrement, les conditions hydrogéologiques, la quantité d'information disponible et le nombre de paramètres utilisés (Aller et al., 1987).

Pour la présente étude et étant donné la faiblesse de la densité et de la quantité des informations disponibles pour le calcul de l'indice de la vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique de la vallée du M'zab, ainsi que l'échelle régionale de l'étude de la vulnérabilité, on a choisi d'appliquer l'approche de la méthode paramétrique GOD, dont le nombre des paramètres utilisés n'est que de trois. Outre, son utilisation nous permettra d'apprécier assez rapidement la vulnérabilité à la pollution de la nappe du M'zab.

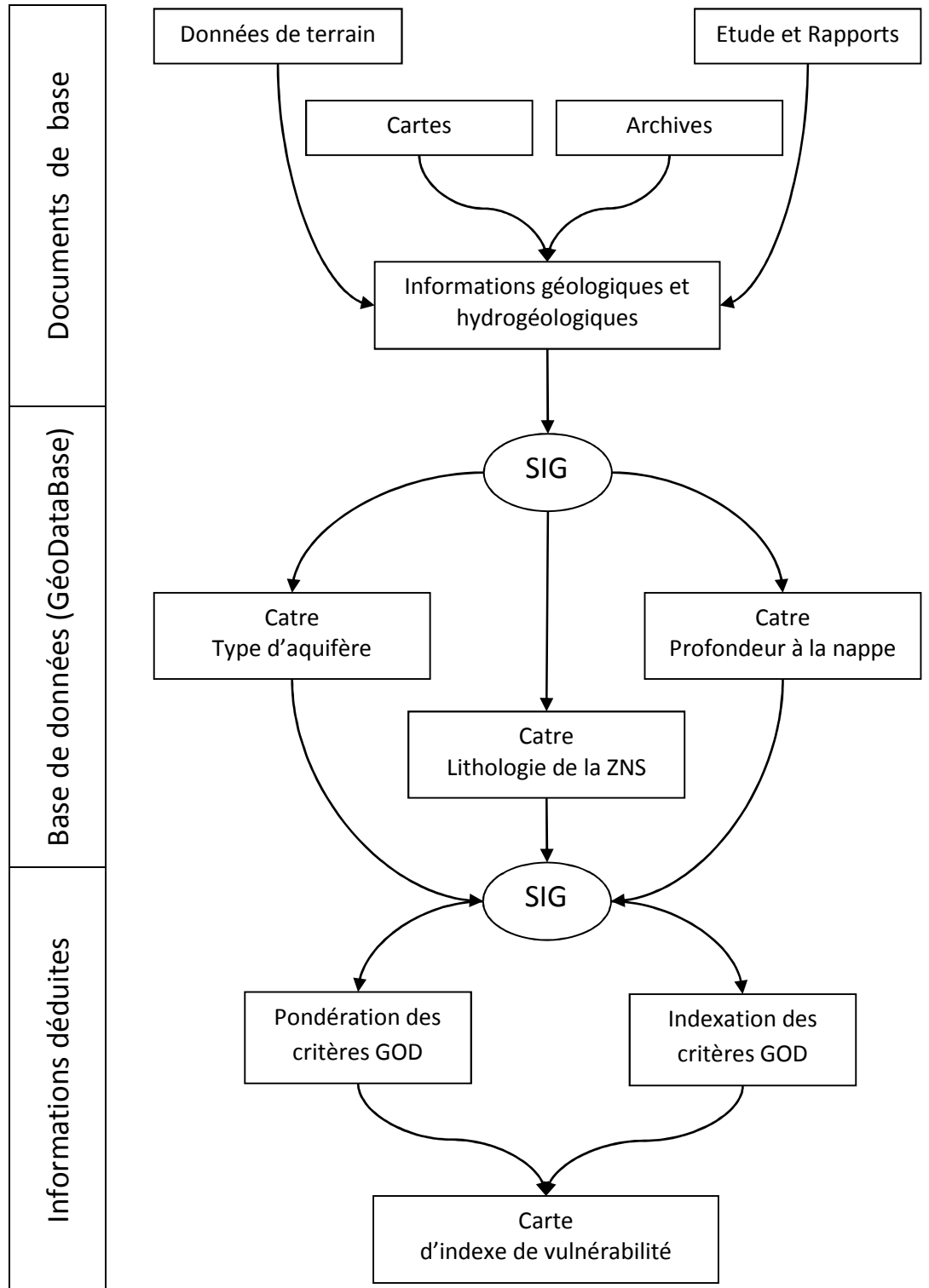


Figure 70 - Organigramme de la méthode GOD

7.10. Détermination des critères de la méthode GOD

Selon les conditions de l'application de la méthode GOD d'une part, et d'autre part la qualité, la densité des données, ainsi que les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère, les critères paramétriques retenus de la méthode GOD sont : Type de nappe ; Type d'aquifère et Profondeur à la nappe.

Les jeux des données existantes, ainsi que les travaux de terrains effectués dans le cadre de cette étude, nous ont permis l'application de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité. Les données des types ponctuels et vectoriels ont été traitées afin de les uniformiser au format matriciel. L'organigramme de la figure 70 décrit les étapes de l'élaboration des différentes cartes paramétriques.

La masse de ces données ont été préparées à l'application aux différents calculs matriciels pour l'ensemble de la région d'étude suivant un maillage de 30x30 mètres.

7.10.1. Type de nappe (Groundwater occurrence)

Les observations retenues sur terrain, ainsi que l'étude des coupes lithologiques des sondages et des puits, le tous révèle que la nappe de l'oued M'zab est en régime libre sur l'ensemble de l'étendu de la vallée. Le recouvrement surmontant la zone saturée, composé essentiellement d'alluvions et de sables est très perméable.

7.10.2. Impact de la ZNS (Overall aquifer class)

C'est un paramètre à très grande importance dans la méthode GOD. La nature lithologique de la zone non saturée joue un rôle prépondérant dans la propagation du polluant vers la nappe. En fonction de nos investigations sur terrain, combinées aux données des coupes de quelques sondages exécutés dans la zone, on a pu cartographier ce critère sur l'ensemble de la vallée du M'zab.

7.10.3. Profondeur à la nappe (Depth to groundwater table)

Ce critère a été réalisé par l'interpolation des données sur les niveaux d'eau de la nappe phréatique de la vallée du M'zab. Le nombre de points utilisés est de 66 puits couvrant le secteur d'étude, les mesures ont été effectuées au cours de la période avril-mai 2011.

7.11. Notation et interpolation des critères

7.11.1. Critère G "Type de nappe"

7.11.1.1. Notation

Les notes attribuées au critère " Type de nappe" figurent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 38 – Cotes attribuées au critère "Type de nappe"

Type de nappe	Cote
Aucun aquifère	0
artésien	0,1
confiné	0,2
Semi-confiné	0,3
Libre avec couverture	0,4 - 0,6
Libre	0,7 -1

7.11.1.2. Interpolation

La figure 71 représente la cartographie ainsi obtenue du critère "type de nappe". On observe que la nappe est en régime libre sur l'ensemble de la zone d'étude, à l'exception sur les périphériques de la vallée et sur quelques endroits isolés, qui correspond à l'affleurement des massifs calcaires turoniens non aquifères.

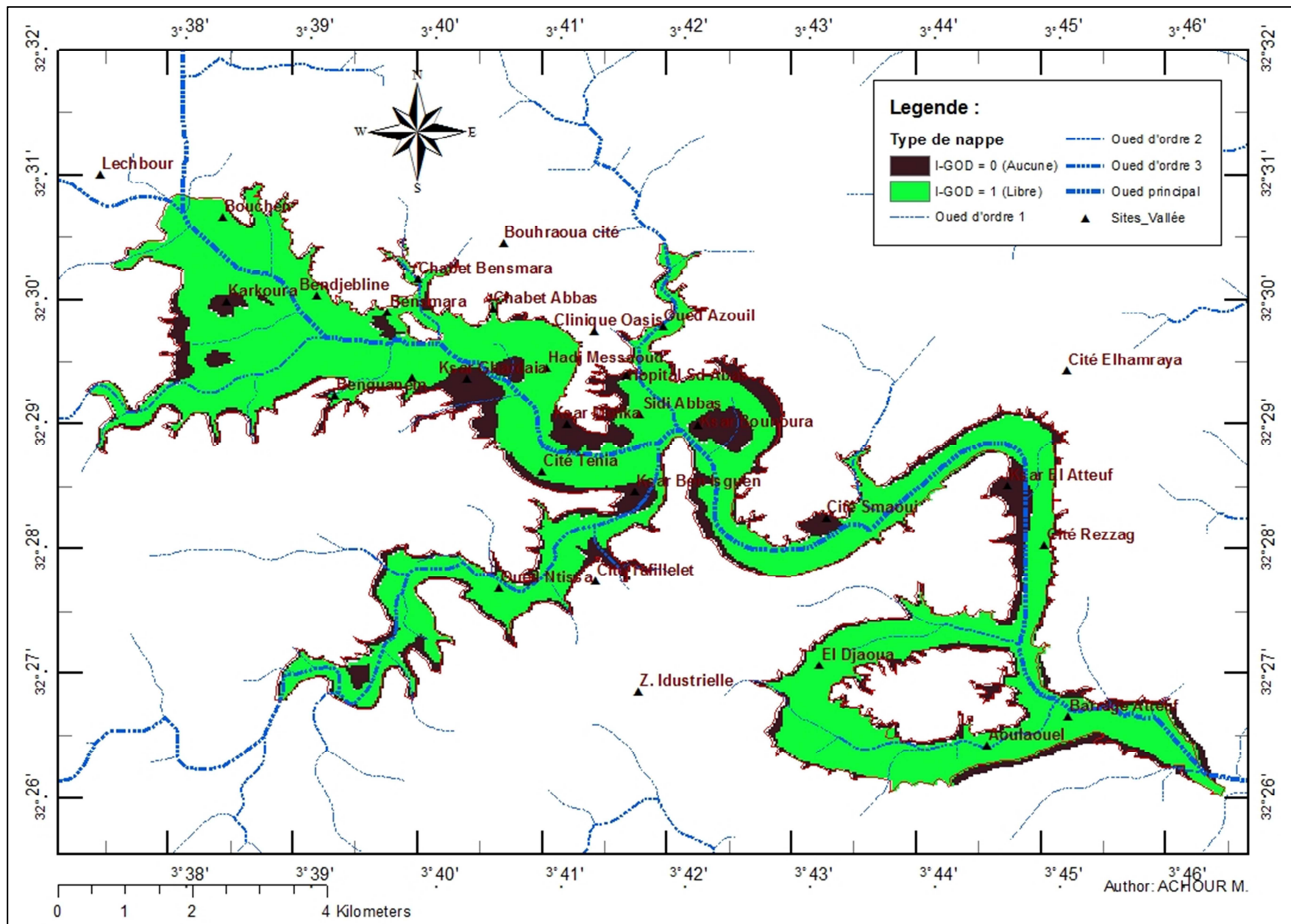


Figure 71 - Carte de l'indice de vulnérabilité, représentation du critère G (maillage 30x30m)

7.11.2. Critère O "Impact de la ZNS"

7.11.2.1. Notation

Les cotes du critère " Impact de la zone non saturée" définies selon la méthode GOD, figurent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 39 – Cotes attribuées au critère "Impact de la ZNS"

Lithologie de l'aquitard	Cote
Sol résiduel	0,4
Limon alluvial, argile, marne, calcaire fin	0,5
Sable éolien, siltite, tuf, roches ignées ou métamorphiques fracturées	0,6
Sable et gravier, grès, tuf	0,7
Gravier (colluvion)	0,8
Calcaire	0,9
Calcaire fracturé ou karstique	1

7.11.2.2. Interpolation

La carte interpolée (fig. 72) révèle que la zone non saturée de l'ensemble de la vallée est formée de sable et de gravier perméable. L'axe de l'oued est constitué par des galets et de graviers sableux fortement perméables.

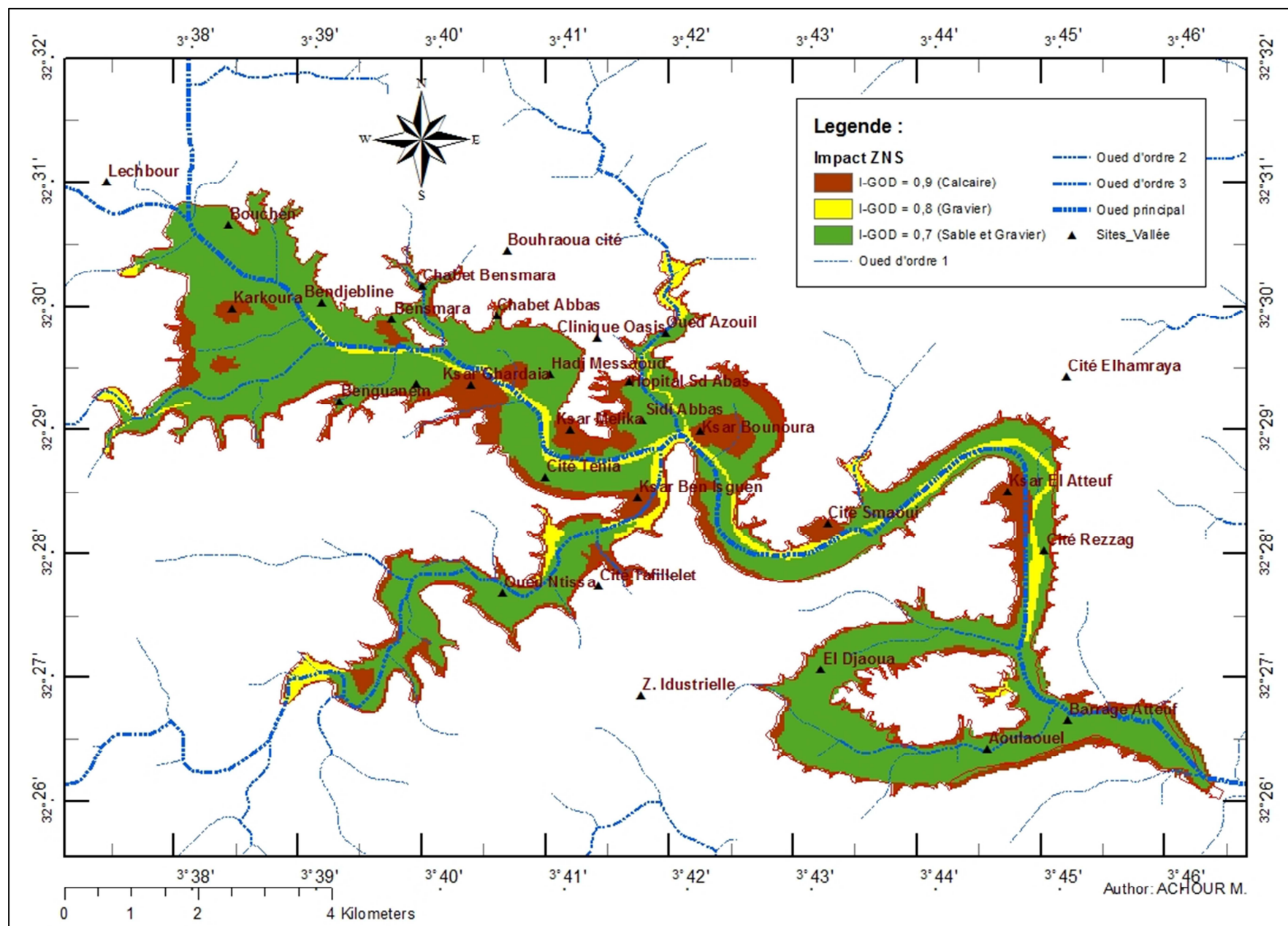


Figure 72 - Carte de l'indice de vulnérabilité, représentation du critère O (maillage 30x30m)

7.11.3. Critère D "Profondeur à la nappe"

7.11.3.1. Notation

Les cotes du critère " Profondeur à la nappe" définies selon la méthode GOD, figurent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 40 – Cotes attribuées au critère "Profondeur à la nappe"

Profondeur (m)	Cote
> 2	1
2 - 5	0,9
5 - 10	0,8
10 - 20	0,7
20 - 50	0,6
50 - 100	0,5
> 100	0,4

7.11.3.2. Interpolation

La carte interpolée du critère "D" (fig. 73) montre que le long du lit mineur de l'oued la profondeur de la nappe est très faible, d'où un indice de vulnérabilité élevé, par contre sur les périphériques de la vallée et le long de ces affluents (Touzouz, N'tissa et Azouil) la profondeur est relativement élevée, l'indice est faible.

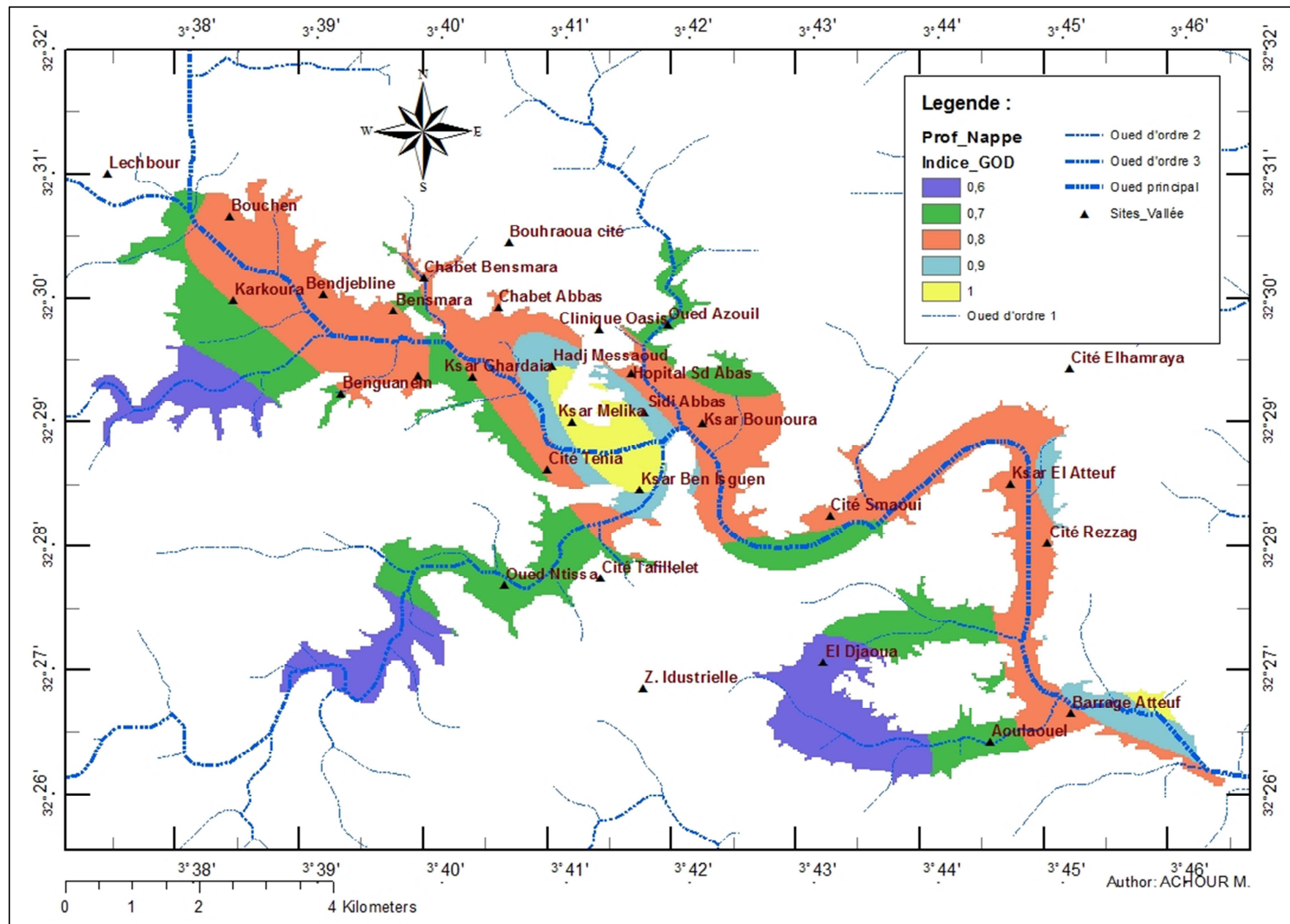


Figure 73 - Carte de l'indice de vulnérabilité, représentation du critère D (maillage 30x30m)

7.12. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe du M'zab

Le tableau 41 ci-dessous représente les classes de l'indice de vulnérabilités selon la méthode GOD ;

Tableau 41 – Classes GOD et intervalles des valeurs de l'indice

Classe GOD	Intervalle
Aucune vulnérabilité	0
Vulnérabilité très faible	0 -0,1
Vulnérabilité faible	0,1 – 0,3
Vulnérabilité modérée	0,3 – 0,5
Vulnérabilité forte	0,5 – 0,7
Vulnérabilité très forte	0,7 -1

La carte de vulnérabilité réalisée par le calcul de l'indice de vulnérabilité GOD (fig. 76), révèle la présence de quatre classes d'indices qui sont : aucune, modérée, forte et très forte, avec une prédominance nette de la classe forte. Les classes de vulnérabilité faible et très faible n'existent pas dans notre zone d'étude.

L'analyse spatiale de l'indice GOD, illustré dans la figure 74, indique la répartition de ces classes qui s'effectue comme suit ;

- secteurs à aucune vulnérabilité, ils se localisent le long des périphériques de la vallée de l'oued M'zab et de ces affluents (N'tissa et Azouil). On les retrouve aussi sous forme d'ilots au sein de la vallée. Cette classe de vulnérabilité représente 19% de la région étudiée. L'indice nul de vulnérabilité est imputé par le fait, que ces secteurs coïncident avec les calcaires massifs du Turonien. Les ilots correspondent aussi aux affleurements des calcaires massifs turoniens non perméables.

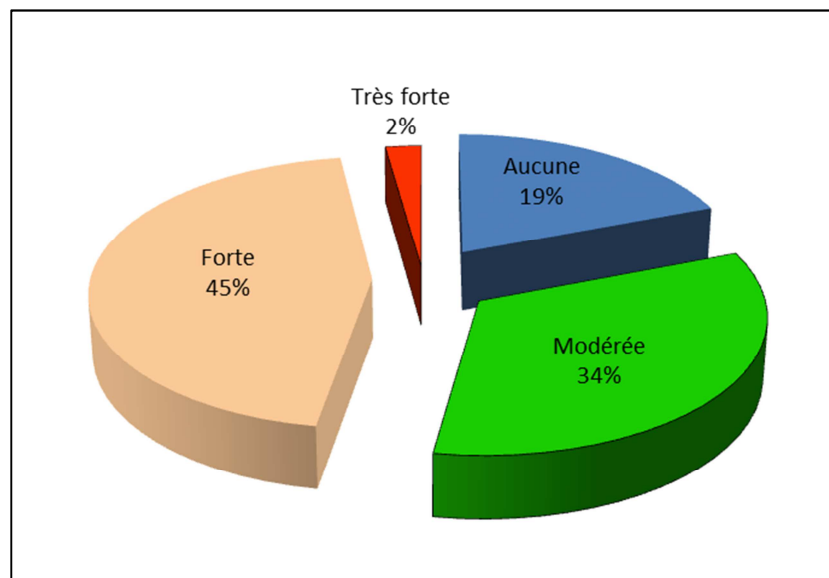


Figure 74 - Répartition de l'indice de vulnérabilité GOD du secteur d'étude

- secteurs à classe de vulnérabilité modérée, ces secteurs coïncidents principalement avec les zones à forte activité oasienne Touzouz en amont, N'tissa et Azouil au centre et oasis d'El Atteuf en aval. Cette classe représente 34% de la région.

L'indice modéré de la vulnérabilité caractérisant ces secteurs, est liés principalement à la profondeur relativement élevée de la nappe dans ces zones. La perméabilité relativement élevée de la zone non saturée (vadose), composée essentiellement de sable et de gravier, pouvant faciliter l'infiltration des contaminants présents à la surface.

- secteurs à classe de vulnérabilité forte, qui s'étalent sur l'ensemble de la surface de la vallée de l'oued M'zab en allant de l'amont vers l'aval. Cette classe de vulnérabilité est prépondérante, elle représente 45%, soit environ la moitié de la région étudiée.

L'indice fort de la vulnérabilité dans ces contrés est dû, vraisemblablement, à la faible profondeur de la nappe, comprise essentiellement entre 10 et 4 mètres, et d'autre part, à la lithologie de la zone non saturée constituée principalement de sables moyens et grossier alluvionnaires très perméables, engendrant ainsi des conditions très favorables à l'infiltration de tout polluant de la surface vers la nappe.

- secteur à classe de vulnérabilité très forte, localisé dans la partie centrale le long du lit mineur de l'oued M'zab. Cette classe représente 2% de la zone étudiée. Les valeurs élevées de l'indice de vulnérabilité dans ces zones s'explique par la très faible profondeur de la nappe qui est parfois nulle, et aussi la nature lithologique de cette dernière qui se compose d'alluvions et de sables grossiers très perméables.

7.13. Discussion et conclusion générale

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique par la méthode GOD, nous a permis de déceler quatre classes de vulnérabilité ; aucune, modérée, forte et très forte. De l'amont vers l'aval, l'ensemble du territoire de la vallée est dominé par une forte vulnérabilité (fig. 75), soit 45% de la zone étudiée. Ce qui laisse dire que la vallée de l'oued M'zab est sujette à d'éventuelle contamination à partir de la surface.

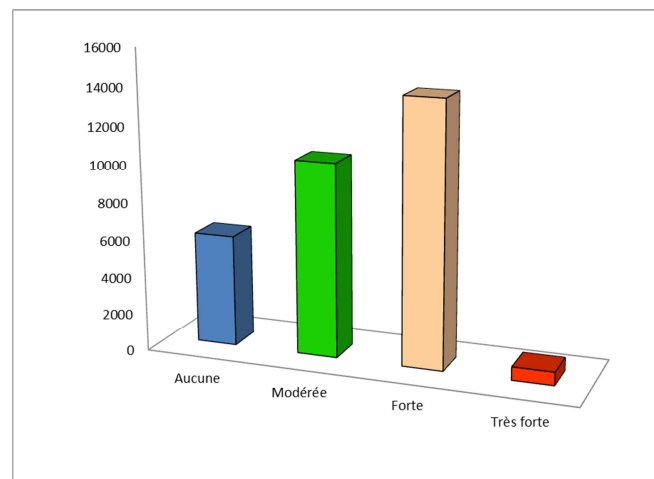


Figure 75 - Fréquence de l'indice de vulnérabilité GOD du secteur d'étude

En outre, la méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque utilisée dans le cadre de cette étude, nous a permis de faire une idée assez nette sur les zones sensibles à la contamination au sein de la vallée du M'zab. A cet effet, des mesures de protection de ces ressources souterraines doivent être établies.

Par ailleurs, il est recommandé de valider les résultats ainsi obtenus par ;

- 1- l'utilisation des méthodes de cartographie de la vulnérabilité à la pollution autres que la méthode GOD, afin de comparer les résultats par des tests statistiques adéquats (Kendal, analyse statistique).
- 3- de tester et valider la carte obtenue par des campagnes de mesure et d'analyses chimiques des eaux de la nappe, notamment le dosage des nitrates et d'autres éléments soupçonnés d'être polluants.

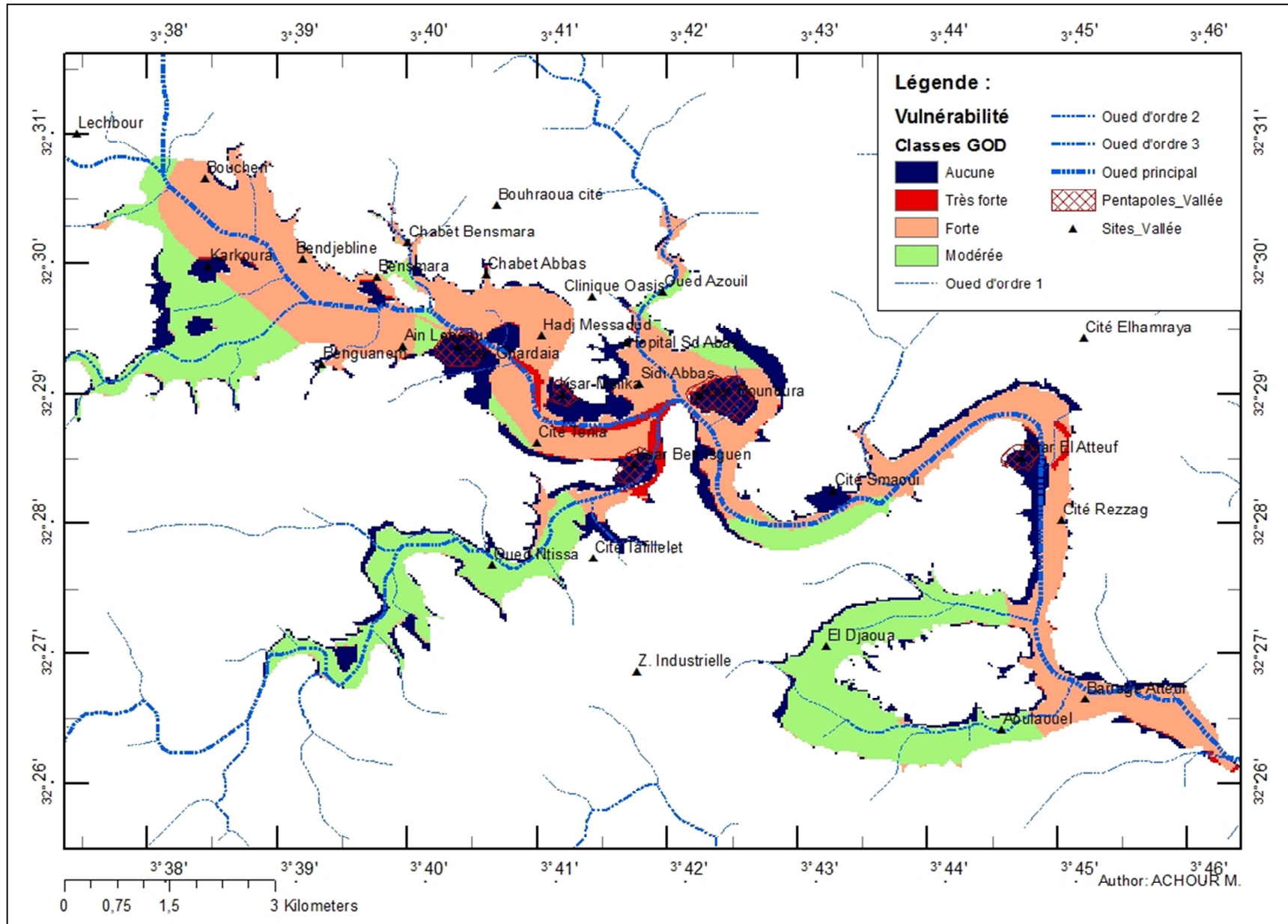


Figure 76 - Carte de l'indice de vulnérabilité de la nappe phréatique de l'oued M'zab (maillage 30x30m)

7.14. Observations relatives à la protection des ressources en eau

Dans une zone aride, telle que la région du M'zab, l'eau souterraine représente leur principale ressource. Elle est très sensible et dont l'utilisation doit se faire avec une très grande prudence.

En ce qui concerne la nappe profonde de l'Albien :

L'établissement des périmètres de protection visant à assurer la qualité des eaux au niveau des forages, ne peut être justifié pour la nappe de l'Albien ; étant qu'elle est déjà protégée par une épaisse couche imperméable d'argiles cénomaniennes. Seul un périmètre de protection immédiat (PPI) de quelques m² destiné à la protection de l'ouvrage de captage, et dans lequel toutes activités nuisibles doivent être interdites.

Le véritable danger pour la nappe albienne, réside dans l'exploitation intensive de ces ressources devant un taux de recharge qui est pratiquement très faible. Les conséquences n'ont guère tardé d'apparaître, entre autres, on a constaté ;

Rabatement très sensible du niveau de la nappe. Pour extraire de l'eau des forages, les pompes sont calées de plus en profondeur, et dans une future proche, certains forages ne seront exploitables, du fait de la réduction de leur chambre de pompage.

Disparition de l'artésianisme de certaines zones de Ghardaïa. C'est ce qu'on a constaté effectivement, dans la partie occidentale de Zelfana et dans la ville de Guerrara ; des forages reconnus jadis par leurs débits jaillissants, ne le sont plus maintenant, et pour extraire de l'eau, le recours à des installations de pompage et de l'énergie à fournir est devenu dans ce cas inévitable.

En ce qui concerne la nappe phréatique :

La nappe est de type libre, dépourvue de tous type de recouvrement imperméable, elle est propice à tous genre de pollution percolant de la surface. De ce fait, des mesures visant de protéger les eaux de la nappe doivent être instaurées, entre autres :

- Contrôler toutes les activités anthropiques nuisibles au sein de la vallée telles que les stations de lavage, les stations de carburant, ainsi que certaines pratiques agricoles utilisant des produits chimiques.
- Lutter contre toute source de pollution que ce soit domestique ou urbaine par l'instauration d'un réseau d'assainissement adéquat et de raccorder les zones urbaines et domestiques à ce réseau à fin de limiter le recours à l'utilisation des fosses septiques.

**REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

ACHOUR M. , BENSAHA H. CHENAFI A. HASSANI M. I.(2012) : Contribution du SIG à l'élaboration d'une méthodologie de calcul des paramètres physiographiques d'un bassin versant, cas du bassin versant du M'zab (Algérie). Colloque international, Terre et Eau Univ. Annaba, Algérie novembre 2012.

ACHOUR M., BENSAHA H. (2010) : Réflexions pour préserver l'environnement, cas de la vallée du M'zab. Communication présentée au colloque international, Univ. Provence Marseille, France janv. 2011. (<http://www.lped.org/colloque-imep/fr/index.html>).

ANRH (2011) : Inventaire des forages et enquête sur les débits extraits de la nappe albienne dans la Wilaya de Ghardaïa. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. DRS. Ouargla ; Algérie.

ANRH (2011) : Note sur les ressources aquifères de la région de Zelfana. doc. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. DRS. Ouargla ; Algérie.

ANRH. (2010) : Note sur l'exploitation en eau potable de la ville de Guerrara. doc. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. DRS. Ouargla ; Algérie.

ANRH (2010) : Note de synthèse sur les premières mesures piézométriques en utilisant les nouveaux piézomètres captant la nappe du CI dans la wilaya de Ghardaïa. doc ANRH DRS, Ouargla.

ANRH (2005) : Inventaire des forages et enquête sur les débits extraits de la nappe albienne dans la Wilaya de Ghardaïa. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. DRS. Ouargla ; Algérie.

ANRH (1999) : Inventaire des forages et enquête sur les débits extraits de la nappe albienne dans la Wilaya de Ghardaïa. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. DRS. Ouargla ; Algérie.

BEL F. & DEMARGNE F. (1966) : Etude géologique du Continental Terminal ; DEC, ANRH, Alger, Algérie, 24 planches, 22p.

BERTIN J. & GAUTIER M. (1948) : Le forage de Zelfana, sondage de reconnaissance et d'étude de la nappe albienne au Sahara. Terres et Eaux, n° 4, Alger, pp. 144-171.

BRGM (2002) : Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène, région bordelaise, RP-51178-FR.

BRGM (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, RP 51783-FR, 41p.

BRGM (2004) : Croisement des données des sites BASOL avec la vulnérabilité simplifiée des nappes du bassin Seine Normandie, rapport de synthèse, RP 54257-FR, 95p.

BRGM (2005) : Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais, RP 54238-FR, 113p.

- BRL ingénierie (1998a)** : Etude du Plan directeur général de développement des régions sahariennes – Connaissances d'Ensemble. Rapport, ANRH, Alger, Algérie.
- BRL ingénierie (1998b)** : Etude du Plan directeur général de développement des régions sahariennes – Modélisation du Continental Intercalaire. Rapport ANRH, Alger, Algérie. 30p ; annexes ; fig. tabl.
- Bob Booth and Andy Mitchell (2001)** : Getting Started with ArcGIS, GIS by ESRI, 261p.
- Bob Booth, Scott Crosier, Jill Clark. (2004)** : Building a Geodatabase.-382 p. ESRI (Environmental System Research Institute) - USA.
- BUSSON G. (1970)** : Le Mésozoïque saharien. 2ème partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », Géol., 11, 811p. Ed. C.N.R.S.
- Cashman P.M and Preene M.(2002)**: Groundwater lowering in construction: a practical guide. Spon Press, London, 497p.
- CORNET A. (1961)** : Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Hydraulique et équipement rural. Service des études scientifiques. Rapport, Alger, Algérie. 108p.
- CONRAD G. (1969)** : L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien (Saoura, erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir). Centre de recherche sur les zones arides. Série géologie n°10, CNRS, Paris, 527p.
- David Keith Todd & Larry W. Mays (2005)**: Groundwater Hydrology, John Wiley & sons, Inc., USA, 662p.
- David O'Sullivan & David Unwin (2003)**: Geographic Information Analysis, John Wiley & sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.
- DUBIEF J. (1953)** : Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Institut de Météorologie et de Physique du Globe de l'Algérie ; Service des Etudes Scientifiques ; Alger, Algérie. 451p.
- ESRI (Environmental System Research Institute) (2010)**:ArcGIS10 desktop software help.
- FABRE, J. (1976)** : Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines. SNED, Alger, 422 p., 175 fig., 1 carte h. t.
- FERSI M. (1979)** : Estimation du ruissellement moyen annuel sur les bassins du Sud-Est, du Sud-Ouest et du Sahel Sud. Direction des Ressources en Eau et en Sol (DRES). Tunis.
- FLANDRIN J. (1957)** : Le pétrole et l'eau dans le Sahara septentrional algérien. In revue de géographie de Lyon. Vol. 32 n°4, 1957.pp. 293-306.

FOSTER S, HIRATA R. (1991) : Groundwater pollution risk assessment. A methodology using available data, WHO/Pan Amer. Cent. for Sanit. Engin. and Envir. Scienc. (CEPIS), Technical Report, Lima, Perou, 2nd edition, 73p.

GABRIEL ETIENNE Ake & al. (2009) : Contribution des Méthodes de Vulnérabilité Intrinsèque DRASTIC et GOD à l'Étude de la pollution par les Nitrates dans la Région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.31 No.1 (2009), pp. 157-171.

GAUTIER M. & GAUSCOV N. (1951) : Le forage de Guerrara, deuxième sondage d'étude et premier grand sondage d'exploitation de la nappe albiennaise jaillissante dans le Bas-Sahara. Terres et Eaux, n° 13, Alger, pp. 171

GAUSCOV N. (1952) : Le problème hydrogéologique du bassin artésien de l'oued R'hir. Terres et Eaux, Alger, pp. 172-184.

GOUAIDIA & all (2011) : Evaluation de la vulnérabilité d'une nappe en milieu semi-aride et comparaison des méthodes appliquées : cas de la nappe de Meskiana (Est algérien) Sécheresse 22 : 35-42.

GRATTON Y. (2002) : Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. Art. INRS-ETE, Québec, Canada (www.iag.asso.fr).

GUENDOZ A., & al. (2003): Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the complex terminal aquifer in Algerian Sahara. Hydrogeology Journal. 11. 483-495.

HAMZA M. H., & al. (2007) : Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est Tunisien). Géoscience 339 (2007), pp. 493-505.

LEVASSOR A. (1975) : Etablissement d'un modèle de gestion et de mise en valeur des nappes aquifères du Complexe Terminal. Rapp. int. ENSMP-INRH. ANRH, Alger, Algérie.

MOULLA A.S., GUENDOZ A., CHERCHALI M.E.H. (2002) : Contribution des isotopes à l'étude des ressources en eau souterraines transfrontalières en Algérie. Atelier international sur la gestion partagée des ressources des systèmes aquifères en Afrique. PHI, UNESCO, Tripoli, Libye, 02-04 juin 2002.

MURAT V. (2000) : Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : Application aux aquifères granulaires du piémont laurentien. Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-Géoressources, Québec, 291p.

MURAT V. & al (2000) : Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. Commission géologique du Canada, Recherches en cours 2003-D3, 14p.

OSS (2002) : Système Aquifère du Sahara Septentrional : De la concertation à la gestion commune d'un bassin aquifère transfrontière. Projet SASS. Rapport interne. Tunis, Tunisie. 58p.

OSS (2003a) : Système Aquifère du Sahara Septentrional. Volume 2 : Hydrogéologie. Projet SASS. Rapport interne. Coupes. Planches. Annexes. Tunis, Tunisie. 275p.

OSS (2003b) : Système Aquifère du Sahara Septentrional. Volume 4 : Modèle Mathématique. Projet SASS ; Rapport interne. Annexes. Tunis, Tunisie. 229p.

OULD BABA SY M. (2005) : Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional. Thèse de doctorat, faculté des sciences de Tunis, 271p.

ROCHE M. (1963): Hydrologie de surface, Gauthier-Villars, Paris.

RODRIGUEZ E., MORRIS C.S., BELZ J.E.(2004) : An assessment of the SRTM Topographic Products, Jet Propulsion Laboratory, 143p, California, USA.

SALAH Hamad (2008): Spatial analysis of groundwater level and hydrochemsity in the south Al Jabal Al Akhdar area using GIS, Master Thesis, Salzburg University.

SAVORNIN J. (1947) : Le plus grand appareil hydraulique du Sahara (nappe artésienne dite de l'Albien). Travaux I.R.S., p. 25-66.

SMIDA H. & al. (2010) : Cartographie des zones vulnérables à la pollution agricole par la méthode DRASTIC couplée à un Système d'information géographique (SIG) : cas de la nappe phréatique de Chaffar (sud de Sfax, Tunisie), Sécheresse 21 (2) : 131-46.

UNESCO (1972) : Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport final, 78p, 1 carte ; 12 planches. OSS, Tunis ; Tunisie.

Données MNT SRTM : <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/srtm3/Africa>

ANNEXES

Annexes A : Inventaire des forages d'eau captant la nappe albienne dans la région de Ghardaïa (Avril-Mai /2011)

N°	Nom_forage	X_dcml	Y_dcml	X	Y	alt_GPS	Alt_MNT_m	RR_m	NS_sol_m	PZ_CI
1	Ahbas	3,753	32,441	32° 26'26"	03° 45'11"	/	472	0	-49,03	422,97
2	Ain Lebeau_1	3,669	32,489	32°29'22"	03°40'07"	592	507	0	-81,4	425,60
3	Ancien palmer_Guer	4,496	32,774	04°29'46"	32°46'26"	304	302	1,5	21,5	323,50
4	ATK_101	3,960	32,278	32°16'39"	03°57'37"	431	423	0	-29,5	393,50
5	Zelfana_F4	4,223	32,393	04°13'23"	32°23'33"	353	344	0,25	31,25	375,25
6	Foussaa_2	4,506	32,776	32° 46' 34"	04° 30' 20"	305	297	0,8	19,2	316,20
7	Garadi	3,846	32,439	32°26'21"	03°50'47"	425	427	0	-25,6	401,40
8	Gouiflat_AEP	4,208	32,380	32° 22' 49"	04° 12' 30"	307	349	0,75	4,25	353,25
9	Gréat_conc	3,708	32,673	03°42'29"	32°40'23"	582	585	0,25	-161,6	423,40
10	Guemgouma_1	3,591	32,299	32°17'57"	03°35'27"	520	516	0	-97,4	418,60
11	Hassi Nord_Zelf	4,241	32,416	32° 24' 58"	04° 14' 29"	356	354	0,5	14,5	368,50
12	Hachana_Metl	3,542	32,320	32° 19' 13"	03° 32' 32"	543	549	0	-117,3	431,70
13	Koudiet chouf_Guer	4,466	32,792	32° 47' 31"	04° 27' 59"	335	334	1,12	3,88	337,88
14	Laadira_Daya	3,629	32,556	32° 33' 21"	03° 37'44"	/	532	0	-108,07	423,93
15	Laadira_Ghardaia	3,633	32,549	32° 32' 58"	03° 37'58"	/	559	0	-113,14	445,86
16	Ladjaja_DSA	3,583	32,293	32° 17' 35"	03° 34' 58"	523	567	0	-113,7	453,30
17	Lechbour	3,628	32,519	32° 31' 07"	03° 37'41"	/	516	0	-105,09	410,91
18	Mahsseur_Labiod	3,778	32,114	32° 06' 51"	03° 46' 42"	438	439	0	-31,5	407,50
19	Moudjahidine_CNAS	3,677	32,489	32° 29' 20"	3° 40' 38"	499	496	0	-92,5	403,50
20	N'tissa_4	3,607	32,437	32° 26' 12"	03° 36'25"	/	554	0	-130,19	423,81
21	N'tissa_3	3,525	32,461	32° 27' 40"	03° 31'30"	/	608	0	-150,16	457,84
22	Noumerat conc_2	3,825	32,359	32°21'31"	03°49'30"	427	427	0	-23	404,00
23	Aérodrome_1	3,799	32,379	32°22'45"	03°47'56"	437	441	0	-38,52	402,48

24	Oued Baguel	3,880	32,936	03°52'49"	32°56'11"	540	550	0,43	-132,67	417,33
25	Oued Laroui_3	3,961	32,839	32°50'21"	03°57'39"	486	486	0	-88,7	397,30
26	Oued Metlili DSA_3	3,829	32,256	32° 15' 23"	03° 49' 45"	419	419	0	-18	401,00
27	Oued Metlili DSA_4	3,819	32,249	32° 14' 56"	03° 49' 10"	424	427	0	-27	400,00
28	Oue Metlili Bouzid_2	3,822	32,261	32°15'40"	03°49'18"	421	419	0	-34	385,00
29	Oue Metlili Bouzid_3	3,814	32,277	32°16'36"	03°48'50"	429	428	0	-35	393,00
30	Oued Nimel	3,683	32,610	32° 36' 26"	03° 40' 57"	559	569	0	-142	427,00
31	Oued Noumeur_ONRH1	4,011	32,410	32°24'35"	04°00'38"	416	421	0	-27,2	393,80
32	Palmeraie_Berr	3,774	32,825	32° 49' 31"	03° 46'25"	/	539	0	-133,6	405,40
33	Palmeraie_Guerr	4,496	32,774	04°29'46"	32°46'26"	304	302	1,5	21,5	323,50
34	PZ_10	3,563	32,169	03°33'45"	32°10'09"	485	473	0	-51,3	421,70
35	PZ_11	3,936	32,339	03°56'08"	32°20'19"	435	437	0,91	-17,96	419,04
36	PZ_12	3,818	32,327	03°49'05"	32°19'37"	454	448	0,55	-46,8	401,20
37	PZ_13	3,557	32,291	03°33'24"	32°17'28"	454	545	0	-113,35	431,65
38	PZ_14	3,735	32,410	03°44'05"	32°24'36"	535	532	0,78	-125,4	406,60
39	PZ_15	3,823	32,434	03°49'24"	32°26'02"	439	437	0,55	-35,36	401,64
40	PZ_16	3,506	32,576	03°30'22"	32°34'33"	571	562	0,4	-126,21	435,79
41	PZ_17	3,696	32,597	03°41'46"	32°35'50"	555	559	0,2	-140,4	418,60
42	PZ_18	3,733	32,705	03°43'58"	32°42'19"	593	606	0,8	-170,65	435,35
43	PZ_19	3,739	32,861	03°44'19"	32°51'41"	556	551	0,67	-131	420,00
44	PZ_20	3,970	32,836	03°58'12"	32°50'08"	478	474	0	-93	381,00
45	R'mada	3,521	32,359	32° 21' 34"	03° 31'16"	/	578	0	-125,11	452,89
46	Sidi ABK	4,501	32,794	04°30'04"	32°47'40"	318	315	1,68	-22,68	292,32
47	Sidi Mbarek_2	3,695	32,852	32°51' 08"	03°41'42"	568	567	0	-140,9	426,10
48	Souareg_DSA	3,670	32,254	32°15'13"	03°40'13"	470	532	0	-61,5	470,50
49	SP3_1	3,886	32,576	32°34'35"	03°53'09"	496	494	0	-125	369,00
50	Timedakssine_DSA	3,521	32,359	32° 21' 34"	03° 31'16"	/	578	0	-125,6	452,40
51	Touzouz_IRR	3,581	32,497	03°34'53"	32°29'48"	542	579	0,5	-119,81	459,19
52	Zazrato	3,741	32,471	32° 28' 15"	03° 44' 28"	504	518	0	-139	379,00

Annexe B : Inventaire des puits dans la vallée du M'zab (Avril-Mai/2011)

Puits	Latitude	Longitude	Crd_X	Crd_Y	Alti_MNT	NS_R	RR	NS_Sol	Ptz_m
Pts 1	3° 43' 45.20" E	32° 27' 26.82" N	3,729	32,457	467	17,25	0	17,25	449,75
Pts 2	3° 43' 25.95" E	32° 27' 18.61" N	3,724	32,455	460	20,76	0,9	19,86	440,14
Pts 3	3° 43' 33.84" E	32° 26' 21.64" N	3,726	32,439	460	22,51	0,7	21,81	438,19
Pts 4	3° 43' 7.32" E	32° 27' 6.61" N	3,719	32,452	470	21,73	0,2	21,53	448,47
Pts 5	3° 43' 22.31" E	32° 27' 9.70" N	3,723	32,453	462	21	0,1	20,9	441,1
Pts 6	3° 42' 48.59" E	32° 27' 56.91" N	3,713	32,466	464	16,9	0,37	11,53	452,47
Pts 7	3° 43' 55.51" E	32° 27' 15.20" N	3,732	32,454	458	17,67	0,34	17,33	440,67
Pts 9	3° 44' 7.74" E	32° 27' 28.36" N	3,735	32,458	458	19,76	0,65	19,11	438,89
Pts 10	3° 43' 33.61" E	32° 28' 6.80" N	3,726	32,469	460	16,25	0,5	10,75	449,25
Pts 11	3° 42' 7.54" E	32° 29' 57.42" N	3,702	32,499	497	23,96	0,42	12,54	484,46
Pts 12	3° 43' 17.81" E	32° 27' 57.66" N	3,722	32,466	459	16,8	0,4	11,4	447,6
Pts 14	3° 45' 24.14" E	32° 26' 45.77" N	3,757	32,446	445	3,42	0,56	2,86	442,14
Pts 15	3° 44' 54.67" E	32° 28' 20.86" N	3,749	32,472	452	4,97	0,72	4,25	447,75
Pts 16	3° 44' 53.67" E	32° 28' 11.86" N	3,748	32,470	453	6,68	0,7	5,98	447,02
Pts 17	3° 44' 54.00" E	32° 27' 53.76" N	3,748	32,465	450	8,2	0,4	7,8	442,2
Pts 18	3° 44' 56.05" E	32° 27' 8.88" N	3,749	32,452	453	7,05	0,4	6,65	446,35
Pts 19	3° 43' 59.95" E	32° 28' 35.38" N	3,733	32,476	460	7	0,3	6,7	453,3
Pts 20	3° 46' 2.21" E	32° 26' 22.91" N	3,767	32,440	442	6,04	1,36	4,68	437,32
Pts 21	3° 39' 53.87" E	32° 27' 35.66" N	3,665	32,460	508	20,15	0,4	19,75	488,25
Pts 22	3° 39' 51.40" E	32° 27' 56.42" N	3,664	32,466	512	19,1	0,72	18,38	493,62
Pts 23	3° 39' 24.12" E	32° 26' 57.72" N	3,657	32,449	518	27,44	0,5	26,94	491,06
Pts 24	3° 39' 49.03" E	32° 27' 8.81" N	3,664	32,452	514	25,7	2	23,7	490,3
Pts 25	3° 39' 45.10" E	32° 27' 44.44" N	3,663	32,462	508	19,12	0,74	18,38	489,62

Pts 26	3° 40' 7.62" E	32° 27' 23.04" N	3,669	32,456	520	20,7	0	20,7	499,3
Pts 27	3° 40' 26.32" E	32° 27' 49.82" N	3,674	32,464	507	18,42	0,46	17,96	489,04
Pts 29	3° 40' 37.84" E	32° 29' 38.75" N	3,677	32,494	495	6,6	0,45	6,15	488,85
Pts 30	3° 38' 38.70" E	32° 30' 16.36" N	3,644	32,505	507	6,41	0,7	5,71	501,29
Pts 31	3° 38' 41.14" E	32° 30' 53.36" N	3,645	32,515	529	9	0,94	8,06	520,94
Pts 32	3° 38' 40.99" E	32° 30' 48.75" N	3,645	32,514	526	9,3	1,74	7,56	518,44
Pts 33	3° 39' 9.48" E	32° 29' 33.87" N	3,653	32,493	508	8,83	1,1	7,73	500,27
Pts 34	3° 38' 6.99" E	32° 30' 22.16" N	3,635	32,506	517	9,49	0,45	9,04	507,96
Pts 35	3° 38' 24.86" E	32° 30' 44.15" N	3,640	32,512	518	10,53	1,18	9,35	508,65
Pts 36	3° 38' 10.07" E	32° 30' 42.67" N	3,636	32,512	511	11,25	1	10,25	500,75
Pts 37	3° 38' 1.04" E	32° 30' 28.66" N	3,634	32,508	517	11,26	0,28	10,98	506,02
Pts 38	3° 38' 51.67" E	32° 30' 42.86" N	3,648	32,512	519	8,45	0,74	7,71	511,29
Pts 39	3° 38' 24.99" E	32° 30' 24.12" N	3,640	32,507	510	0	0	8,23	501,77
Pts 40	3° 38' 56.98" E	32° 30' 26.35" N	3,649	32,507	516	9,8	1,5	8,3	507,7
Pts 41	3° 38' 26.76" E	32° 30' 34.31" N	3,641	32,510	514	9,65	0	9,65	504,35
Pts 42	3° 38' 40.37" E	32° 30' 22.07" N	3,645	32,506	516	8,4	0,43	5,97	510,03
Pts 43	3° 38' 19.75" E	32° 30' 12.16" N	3,639	32,503	515	8,44	1,02	7,42	507,58
Pts 44	3° 40' 45.64" E	32° 28' 55.92" N	3,679	32,482	498	11,1	0	11,1	486,9
Pts 45	3° 38' 16.27" E	32° 30' 32.79" N	3,638	32,509	510	10,5	0,5	10	500
Pts 46	3° 39' 14.59" E	32° 29' 51.47" N	3,654	32,498	508	0	0	0,01	508
Pts 47	3° 38' 56.12" E	32° 30' 33.66" N	3,649	32,509	519	9,8	1,5	8,3	510,7
Pts 48	3° 39' 4.18" E	32° 30' 20.37" N	3,651	32,506	513	9,65	0	9,65	503,35
Pts 49	3° 38' 37.98" E	32° 30' 28.61" N	3,644	32,508	515	8,4	0,43	7,97	507,03
Pts 50	3° 39' 1.10" E	32° 30' 10.15" N	3,650	32,503	507	8,44	1,02	0,01	507
Pts 51	3° 41' 6.12" E	32° 28' 53.94" N	3,685	32,482	505	11,1	0	1,16	503,84
Pts 52	3° 38' 49.47" E	32° 29' 57.30" N	3,647	32,499	510	10,5	0,5	10	500
Pts 53	3° 45' 30.56" E	32° 26' 45.87" N	3,758	32,446	443	2,5	0	2,5	440,5

Pts 54	3° 44' 54.13" E	32° 27' 29.28" N	3,748	32,458	447	6,07	0	6,07	440,93
Pts 55	3° 45' 2.57" E	32° 26' 51.14" N	3,751	32,448	449	4	0	4	445
Pts 56	3° 44' 19.25" E	32° 28' 52.44" N	3,739	32,481	461	9	0,83	8,17	452,83
Pts 57	3° 44' 50.06" E	32° 27' 19.74" N	3,747	32,455	445	5,27	0	5,27	439,73
Pts 58	3° 46' 3.20" E	32° 26' 33.40" N	3,768	32,443	440	1,16	0	1,16	438,84
Pts 59	3° 45' 50.26" E	32° 26' 29.83" N	3,764	32,442	443	5,1	0	5,1	437,9
Pts 60	3° 45' 32.92" E	32° 26' 33.30" N	3,759	32,443	441	6,5	0	6,5	434,5
Pts 62	3° 38' 40.17" E	32° 29' 12.17" N	3,644	32,487	515	30	2,1	21,9	493,1
Pts 63	3° 38' 17.95" E	32° 29' 14.58" N	3,638	32,487	516	30	0,67	23,3	492,7
Pts 64	3° 38' 2.53" E	32° 29' 18.08" N	3,634	32,488	519	35,66	0,66	24,83	494,17
Pts 65	3° 40' 10.44" E	32° 27' 56.86" N	3,670	32,466	507	19,15	0,4	18,75	488,25
Pts 66	3° 40' 45.77" E	32° 27' 29.81" N	3,679	32,458	510	15,95	0,9	15,05	494,95
Pts 67	3° 41' 24.87" E	32° 28' 8.41" N	3,690	32,469	496	9,14	0	9,14	486,86
Pts 68	3° 39' 11.35" E	32° 30' 8.41" N	3,653	32,502	511	9,8	1,5	8,3	502,7
Pts 69	3° 39' 17.32" E	32° 30' 1.63" N	3,655	32,500	507	0	0	9,65	497,35
Pts 70	3° 39' 13.69" E	32° 30' 3.86" N	3,654	32,501	509	8,4	0,43	7,97	501,03

**Annexe C : Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC
(d'après Lallemand-Barrès, 1994)**

<p align="center">D : distance à la nappe Epaisseur de la ZNS</p> <p>Valeurs en mètres Notation</p> <p>0 – 1,5 10</p> <p>1,5 – 4,5 9</p> <p>4,5 – 9 7</p> <p>9 – 15 5</p> <p>15 – 22 3</p> <p>22,5 – 30 2</p> <p>>30 1</p>		<p align="center">R : recharge Pluie efficace</p> <p>Valeurs en mm Notation</p> <p>>25,5 9</p> <p>17,5 – 25,5 8</p> <p>10 – 17,5 6</p> <p>5 – 10 3</p> <p>0 – 5 1</p>	
<p align="center">A : nature de la zone saturée</p> <p>Calcaire karstique 10</p> <p>Basalte 9</p> <p>Sable et gravier 8</p> <p>Calcaire massif 6</p> <p>Grès massif 6</p> <p>Shales en séquence 6</p> <p>Métamorphique altéré, grès lités, calcaires 4</p> <p>Métamorphique 3</p> <p>Shale massif 2</p>		<p align="center">S : nature du sol</p> <p>Peu épais ou absent 10</p> <p>Gravier 10</p> <p>Sable, 9</p> <p>Argile, agrégats ou pentes 7</p> <p>Limon sableux 6</p> <p>Limon 5</p> <p>Limon silteux 4</p> <p>Limon argileux 3</p> <p>Argile non agrégée et non fissurée 1</p>	
<p align="center">T : topographies, pentes</p> <p>Valeurs en % de la pente Notation</p> <p>0 -2 10</p> <p>2 – 6 9</p> <p>6 – 12 5</p> <p>12 – 18 3</p> <p>>18 1</p>		<p align="center">I : nature de la ZNS</p> <p>Calcaire karstique 10</p> <p>Basalte 9</p> <p>Sable et gravier 8</p> <p>Sable et gravier avec silt et argile 6</p> <p>Calcaire lité, grès, shale 6</p> <p>Grès 6</p> <p>Calcaire 6</p> <p>Shale 3</p> <p>Silt/argile 1</p>	
<p align="center">I : nature de la ZNS</p> <p>> 9,4 10⁻⁴ m/s 10</p> <p>4,7 10⁻⁴ - 9,4 10⁻⁴ m/s 8</p> <p>32,9 10⁻⁵ - 4,7 10⁻⁴ m/s 6</p> <p>14,710⁻⁵ - 32,9 10⁻⁵ m/s 4</p> <p>4,710⁻⁵ - 14,710⁻⁵ m/s 2</p> <p>4,710⁻⁷ - 4,710⁻⁵ m/s 1</p>			



Drainage des eaux de la nappe phréatique



Niveau d'eau dans un puits exploitant la nappe phréatique



Vue panoramique de la vallée du M'zab



Oasis du M'zab et en arrière-plan la morphologie typique de la région (calcaires turoniens)