

RESUME

Le travail de recherche en question consiste à l'étude hydrogéologique de la région du Milok mekhareg, sur laquelle les différentes unités seront individualisées par leurs paramètres hydrodynamiques, d'établir une cartographie piézométrique récente et la comparer avec les campagnes antérieures à des fins d'analyse spatio-temporelle du système hydrogéologique Metlili-Milok. Le dernier volet est consacré à l'évolution de la chimie des eaux en tenant compte du contexte environnemental propre à la région, dont on citera particulièrement l'existence d'un périmètre agricole de plus de 500 ha où l'utilisation abusive d'engrais est mise en évidence ainsi que l'importance de la station de service NAFTAL située au niveau du carrefour RN23-RN01, de la station de compression de gaz de Milok, de la station de pompage SONATRACH, de l'usine de mise en bouteille de l'eau minérale MILOK et du champ captant du synclinal de la dakhla. L'objectif principal de la thématique est de constituer une base de données qui s'appuie sur les outils du système d'information géographique (SIG), et d'analyse du modèle numérique de terrain (MNT); notamment le ArcGIS et le Global Mapper pour en faire ressortir une carte thématique de synthèse révisable d'une grande utilité, qui servira selon le concept de l'utilisateur (SONATRACH wilaya, DHW, DSA) d'outil à la décision. Dans ce cadre, on citera particulièrement l'apport de la carte hydrogéologique sur laquelle sont superposées plusieurs couches d'information ainsi que la carte de vulnérabilité à la pollution.

SUMMARY

The research in question is the hydrogeological study of the area Milok mekhareg on which the different units are individualized by their hydrodynamic parameters to establish a recent piezometric mapping and comparison with previous campaigns for the purpose of spatio-temporal analysis of Metlili-Milok hydrogeological system and finally to study the evolution of the water chemistry taking into account region-specific environmental context, the existence of an agricultural perimeter over 500ha are particularly include with misuse of fertilizers, the important station NAFTAL Service located at the crossroads RN23-RN01, compressor station gas Milok, pumping station Sonatrach, the plant bottling water mineral MILOK and capturing field syncline dakhla. The main objective of the theme is to create a database that uses the tools of geographic information system (GIS), and analysis of digital elevation model (DEM) including ArcGIS and Global map to bring out a reviewable thematic synthesis map of great value, which will according to the concept of the user (wilaya Sonatrach, DHW, DSA) tool in the decision. In this context, it is particularly mentioned the contribution of the hydrogeological map on which are superimposed layers of information and the map of vulnerability to pollution.

REMERCIEMENTS

Au terme de la réalisation de cet travail, il m'est très agréable de remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans sa réalisation. Je citerai particulièrement :

- Monsieur Mansour Hamidi Professeur à l'université d'Oran qui m'a fait l'honneur de rapporter ce travail et surtout pour les nombreuses discussions et conseils tout au long de ma rédaction de thèse ainsi pour son déplacement sur le terrain à Laghouat plusieurs fois pour délimiter mon sujet de recherche.
- Monsieur Foukrache Mohamed Maitre-assistant qui m'a accueilli, dans son bureau, dirigé et encouragé mon travail ainsi est venu sur le terrain
- Monsieur Stamboul Madani Maitre de conférence à l'université de Laghouat qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce travail.
- Messieurs Hassani Moulay Driss et Safa Aissa qui me font l'honneur de participer à ce jury.

Mes remerciements les plus sincères vont également à mon fils Mustapha et ses amis Botma Ahmed amine et Guérouj Mokhtar, d'avoir participé à la réalisation de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier tous les amis qui m'ont aidé et encouragé pour réaliser ce mémoire, sans oublier Achour Mansour et Azzouzi ben Azouz.

Merci à tous.

Je dédie ce travail à ma famille

A la mémoire de mes parents

SOMMAIRE

Sommaire

LISTE DES FIGURES	7
LISTE DES TABLEAUX	10
INTRODUCTION GENERALE	13
CHAPITRE I GEOLOGIE	16
I- HISTORIQUE DES TRAVAUX	17
II- CADRE GEOLOGIQUE GENERAL	19
1. LA CHAINE ALPINE.....	20
2. LES HAUTES PLAINES.....	20
3. L'ATLAS SAHARIEN.....	20
III- CADRE GEOLOGIQUE LOCAL	21
1. LITHOSTRATIGRAPHIE.....	23
1.1. Le Trias.....	23
1.2. Le Jurassique.....	24
1.3. Le Crétacé.....	26
1.4. Le Tertiaire.....	30
1.5. Le Quaternaire.....	30
2. ANALYSE STRUCTURALE.....	31
2.1. Disposition structurale du Djebel Amour.....	31
2.2. Système de fracturation.....	32
CHAPITRE II HYDROCLIMATOLOGIE	34
I. INTRODUCTION	35
II. RELATION ENTRE LES PLUIES ET LES PERTURBATIONS	35
1. PERTURBATIONS LIEES AUX FRONTS POLAIRES :.....	35
2. PERTURBATIONS LIEES AUX FRONTS MEDITERRANEEN II.....	35
3. LES PERTURBATIONS LIEES AU FRONT DES ALIZES OU AU FRONT ATLANTICO-MEDITERRANEEN.....	35
III. LE RÉSEAU PLUVIOMÉTRIQUE.	36
IV. LES ÉLÉMENTS DU CLIMAT :	37
1. NEBULOSITE :.....	37
2. INSOLATION :.....	37
3. L'HUMIDITE RELATIVE :.....	38
4. LES VENTS :.....	39
1.1. LES VENTS DU NORD :.....	39
1.2. LES VENTS D'EST :.....	40
1.3. LES VENTS DU SUD :.....	40
V.ÉTUDE DES PRÉCIPITATIONS	41
1. LES PRECIPITATIONS MENSUELLES :.....	41
2. COMPARAISON DE LA PLUVIOMETRIE MOYENNE A DIFFERENTES PERIODES:.....	42
3. LES PRECIPITATIONS ANNUELLES.....	44
3.1. Variation de la pluviométrie annuelle.....	44
3.2. Étude statistiques des précipitations.....	47
4. LAME D'EAU TOMBEE SUR LE BASSIN.....	52
4.1. La moyenne arithmétique.....	52
4.2. Méthode de Theissen.....	52
VI. ÉTUDE DES TEMPÉRATURES	54

1. TEMPERATURES MENSUELLES MOYENNES :	54
VII. RÉGIME CLIMATIQUE DE LA RÉGION DE LAGHOUAT	55
1. REPRESENTATION GRAPHIQUE :	55
1.1. Courbes pluviométriques de Gaussen et Bagnols:	55
1.2. Courbes ombrothermiques d'Euverte	56
VIII. LES PARAMÈTRES CLIMATIQUES :	57
1. INDICE D'ARIDITE ANNUEL SELON DE MARTONNE	57
2. INDICE D'ARIDITE MENSUEL DE DE MARTONNE	58
3. L'INDICE PLUVIOMETRIQUE DE MORAL :	59
4. INDICE CLIMATIQUE DE L. EMBERGER	59
5. METHODE DE STEWART :	60
6. INDICE DE CONTINENTALITE DE KERNER	61
IX. ÉVAPORATION, ÉVAPOTRANSPIRATION ET DÉFICIT D'ÉCOULEMENT	62
1. ÉVAPORATION.....	62
2. FACTEUR FONDAMENTAL DU BILAN HYDRIQUE.....	62
3. CALCUL DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE:.....	63
4. ÉVAPOTRANSPIRATION REELLE ET DEFICIT D'ÉCOULEMENT.....	64
4.1. Méthode de Coutagne :	64
4.2. Méthode de Wundt.....	64
4.3. Méthode de Turc.....	66
4.4. Méthode de Thornthwaite.....	66
4.5. Méthode de P. Verdeil	67
X. CONCLUSIONS.....	69
CHAPITRE III GEOMORPHOLOGIE.....	70
I. LIMITES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED M'ZI.....	71
II. PARAMETRES GEOMORPHOLOGIQUES DU B.V DE L'OUED M'ZI	71
1. CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT :	71
1.1. Caractéristiques morphologiques.....	71
CHAPITRE IV HYDROLOGIE.....	86
I- INTRODUCTION	87
II- ETUDE DES ECOULEMENTS SUR LA STATION HYDROMETRIQUE DE L'OUED SEKLAFI.....	87
1. ETUDE DES DEBITS DE L'OUED M'ZI.....	88
1.1. Estimation du volume annuel ruisselé à partir d'observations des crues.....	88
1.2. Calcul des caractéristiques empiriques.....	89
2. BILAN HYDROLOGIQUE.....	91
2.1. Introduction.....	91
2.2. Ruissellement et infiltration.....	91
2.3. Ressources en eaux souterraines	92
3. TRANSPORTS SOLIDES	93
3.1. Les charriages de fond	93
3.2. Les éléments en suspensions.....	93
4. COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE :	95
5. LE TEMPS DE CONCENTRATION:.....	95
6. VITESSE MOYENNE DE RUISSÈLEMENT [1]:.....	97
7. PLUIES MAXIMALES JOURNALIERES :	98
8. AJUSTEMENT DES PLUIES MAXIMALES JOURNALIERES :	98
9. AJUSTEMENT COMPARATIF AVEC "HYDROLAB" :	98
10. AJUSTEMENT A LA LOI DE GUMBEL AVEC "HYDROLAB" :	98
11. PLUIES DE COURTES DUREES DE DIFFERENTES FREQUENCES ET LEURS INTENSITES :	101

III- ETUDE DES APPORTS	102
.1 APPORTS LIQUIDES	102
1.1. <i>Apport moyen interannuel</i>	<i>102</i>
CE RESULTAT NOUS SEMBLE TRES SOUS-ESTIME, PUISQU'IL NE REPRESENTE QU'UNE PARTIE INFIME DES APPORTS D'EAU PAR LES PRECIPITATIONS.....	103
IV- ETUDE DES CRUES	104
1. FORMULES EMPIRIQUES	104
2. FORMULES EMPIRIQUES POUR LA DETERMINATION DE LA CRUE	105
3. HYDROGRAMME DE CRUES :	106
CHAPITRE V HYDROGEOLOGIE.....	109
I. CONSÉQUENCES DE LA LITHOLOGIE ET DE LA FRACTURATION SUR LA GENÈSE DES EAUX SOUTERRAINES.....	110
II. APPORT DE LA GÉOPHYSIQUE:	112
1. PROSPECTION GEOPHYSIQUE DE LA VALLEE DE L'OUED M'ZI	112
2. TRAVAUX REALISES	112
3. ÉCHELLE DES RESISTIVITES ADOPTEES	114
4. PRINCIPAUX RESULTATS.....	114
5. INTERPRETATION DES COUPES GEOELECTRIQUES	115
III. LES PRINCIPAUX AQUIFÈRES :	119
1. AQUIFERE DU TURONIEN.....	119
2. AQUIFERE DU COMPLEXE GRESEUX.....	122
3. AQUIFERE DU PORTLANDIEN:	123
CALCAIRE	125
APTIEN	125
IV. ÉTUDE DE L'AQUIFÈRE DU BARRÉMIEN-VALANGINIEN	125
1. STRUCTURE HYDROGEOLOGIQUE	125
2. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES.....	126
3. PIEZOMETRIE.....	128
3.1. <i>Nappe alluviale de la vallée de M'zi</i>	<i>128</i>
3.2. <i>Formation géologique en relation hydrogéologique avec les alluvions</i>	<i>130</i>
3.3. <i>Interprétation des cartes piézométriques</i>	<i>130</i>
3.4. <i>Le gradient hydraulique</i>	<i>132</i>
4. DETERMINATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DU FORAGE HAMDA FH1	132
4.1. <i>Méthode de la courbe standard de C.W.THEIS.....</i>	<i>132</i>
4.2. <i>Méthode de JACOB</i>	<i>135</i>
CHAPITRE VI HYDROCHIMIE.....	143
I- INTRODUCTION	144
II- PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES :	144
1. PARAMETRES PHYSIQUES :.....	144
1.1. <i>Le potentiel d'Hydrogène (pH) :</i>	<i>144</i>
2. NAPPE DU BARREMIEN (ANTICLINAL DE HAMDA).....	145
3. NAPPE ALLUVIALE DE LA PLAINE DE KSAR EL HIRANE	145
4. LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE :.....	145
5. LA MINERALISATION :	146
6. NAPPE BARREMIEN HAMDA.....	147
7. NAPPE ALLUVIALE KSAR EL HIRANE.....	147
8. PARAMETRES CHIMIQUES MAJEURS :.....	148

9. CARTES HYDROCHIMIQUES.....	149
9.1. Calcium (Ca^{++}).....	150
9.2. Le Magnésium (Mg^{++}).....	151
9.3. Sodium (Na^{+}) et Potassium (K^{+}).....	153
9.4. Bicarbonates (HCO_3^{-}) :.....	156
9.5. Sulfates (SO_4^{-2}) :.....	158
9.6. Chlorure (Cl^{-}).....	160
10. CLASSIFICATION ET FACIES CHIMIQUES DES EAUX :.....	162
10.1.1. <i>Faciès chimiques</i> :.....	162
11. DIAGRAMME DE SCHOELLER-BERKALOFF.....	165
12. INDICE D'ÉCHANGE DE BASE (I.E.B) :.....	168
13. QUALITE CHIMIQUE DES EAUX.....	170
14. APTITUDE A L'USAGE D'AEP.....	170
15. APTITUDE A L'USAGE AGRICOLE.....	171
III- INTERPRETATION DE LA QUALITE DES EAUX D'IRRIGATION :	176
1. ANALYSE DES CLASSES DE SALINITE ET DE SODICITE :	176
2. INTERPRETATION DES CLASSES DE COUPLES : SALINITE-SODICITE :.....	176
IV- CAS DE L'EAU MINERALE MILOK :.....	176
1. CARACTERISTIQUE CHIMIQUES :	177
2. RAPPORTS CARACTERISTIQUES:.....	177
3. LE PERIMETRE DE PROTECTION DU FORAGE DE MILOK (EAU MINERALE).....	178
3.1. <i>Périmètre de protection immédiat (zone I)</i>	178
3.1.1. <i>Délimitation</i>	178
3.1.2. <i>Servitudes</i>	178
3.2. <i>Périmètre de protection rapproché ou intermédiaire (zone II)</i>	178
3.2.1. <i>Délimitation</i>	178
3.2.2. <i>Servitudes</i>	179
3.3. <i>Périmètre de protection éloigné ou hydrogéologique (zone III)</i>	180
3.3.1. <i>Délimitation</i> :.....	180
<i>Plusieurs Oueds ou chabets, caractérisés par un écoulement temporaire, drainent le bassin versant hydrogéologique du forage et font, par définition, partie de la Zone III ainsi que les ravins.</i>	180
3.3.2. <i>Servitudes</i>	180
V- IMPACT DE LA POLLUTION.....	181
CONCLUSION.....	183
GENERALE.....	183
BIBLIOGRAPHIE.....	186

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Les différentes parties de l'Atlas saharien (Google Earth)	19
Figure 2: Schéma structural de la Méditerranée occidentale (Chalouan et al., 2008)	20
Figure 3: Esquisse structurale Nord-Sud de l'Algérie du Nord.....	21
Figure 4: Carte géologique du synclinal d'Aflou au 1/100.000°	22
Figure 5: Séries du jurassique supérieur du Djebel Amour (S.Abed ,1982)	24
Figure 6: Série complète du Jurassique et Crétacé (Djebel Chebka).....	24
Figure 7: Forage réalisé au niveau du pénitencier d'Aflou recoupant le barrémien.....	27
Figure 8: Coupe géologique recoupant les grés Barrémien dans le Djebel Gourou.....	28
Figure 9: Coupe standard des grés de l'Albien.....	29
Figure 10: Principales structures de l'Atlas saharien (Wec Algérie, 2007).....	31
Figure 11: Situation des stations pluviométriques.....	37
Figure 12: Diagrammes des Roses des vents mensuels Station d'Ain Mahdi (1973 – 1984).	40
Figure 13: Moyennes mensuelles à la station météorologique d'AFLOU	43
Figure 14: Moyennes mensuelles à la station météorologique de Tadjmout.....	43
Figure 15: Moyennes mensuelles à la station météorologique de Laghouat	43
Figure 16: Précipitations moyennes annuelles aux stations météorologiques période 1913-1938 (SEKLAF-EL GHICHA-TAOUIALA-BRIDA).....	45
Figure 17: Comparaison des précipitations annuelles	45
Figure 18: Comparaison des précipitations annuelles	46
Figure 19: Comparaison des précipitations annuelles	46
Figure 20: Ajustement à la loi de Gauss.....	49
Figure 21: Représentation des polygones par la méthode de Theissen	53
Figure 22: Variations mensuelles des températures à la station de Laghouat	54
Figure 23: Diagramme pluviométrique de Gausson et Bagnouls	55
Figure 24: Diagramme ombrothermique d'Euverte station de Laghouat (1913-1938).....	57
Figure 25: Indice annuel de De Martonne	58
Figure 26: Climagramme d'après L. EMBERGER.....	60
Figure 27: Abaque WUNDT modifiée par COUTAGNE	65
Figure 28: calcul du déficit d'écoulement par la méthode de P. Vreuil	68
Figure 29: Carte de délimitation du bassin versant de l'Oued M'zi et ses affluents	71
Figure 30: Courbe hypsométrique du bassin versant l'oued M'zi.....	73
Figure 31: Carte du relief du bassin versant	74
Figure 32: Courbes hypsométriques des sous bassins versants de oued M'zi.....	75
Figure 33: Carte des pentes du bassin versant.....	77
Figure 34: profil en long du talweg principal	78
Figure 35(a et b) : profils en long.....	79
Figure 36(a et b) : Profils en long.....	79
Figure 37: Hierarchisation du chevelu hydrographique	80
Figure 38: Diagrammes semi-logarithmique.....	84
Figure 39: Ajustement à la loi Normale (debits de la station Seklafa).....	90
Figure 40: Carte des ressources en eau de la region de Laghouat 1/500.000.....	93
Figure 41: Ajustement à la loi de Gumbel.....	100
Figure 42: Hydrogramme des crues	108
Figure 43: Carte de repartition des profils et des sondages électriques (Strojexport, 1977)	113
Figure 44: Coupe géologique : pont de Laghouat (Strojexport, 1977).....	115
Figure 45: Coupe géologique de la vallée de l'oued M'zi (Strojexport, 1977).....	116
Figure 46: Coupes géoelectriques de la vallée de l'oued M'zi (Strojexport, 1977).....	117
Figure 47: Coupes géologiques de la vallée de l'oued M'zi (Strojexport, 1977).....	118
Figure 48: Extrait de la Carte géologique de Laghouat 1/200.000.(région de Milok)	119

LISTE DES FIGURES

Figure 49: Coupe géologique du Djebel Dakhla	120
Figure 50: Complexe gréseux de la formation barrémienne aquifère	122
Figure 51: Allure générale de la nappe du synclinal d'Aflou (1/200.000)	126
Figure 52: Coupe lithologique et technique du forage : FH1 Hamda.....	127
Figure 53: Forage de l'abattoir de Laghouat	129
Figure 54: Carte piezometrique de la plaine Ksar El Hirane.....	130
Figure 55: Carte piezometrique : Hamda	131
Figure 56: Représentation théorique du forage FH1 Hamda en cours de pompage.....	133
Figure 57: Courbe de superposition Theis.....	135
Figure 58: Méthode de Jacob	137
Figure 59: Forage hamda F1, remontée.....	138
Figure 60: Courbe de descente	138
Figure 61: Forage hamda : superposition avec la courbe théorique	139
Figure 62: Methode de jacob.....	139
Figure 63: Courbe de remontée du forage AF2.....	141
Figure 64: Carte d'isoteneurs du Calcium en mg/l.....	150
Figure 65: Profil de l'évolution du Calcium (Merdja-ksar El Hirane)en mg/l	151
Figure 66: Carte en 3D du Calcium en mg/l.....	151
Figure 67: Carte d'isoteneurs du magnesium en mg/l.....	152
Figure 68: Profil de l'évolution du Magnésium (Merdja-ksar El Hirane)en mg/l.....	152
Figure 69: Carte en 3D du Magnésium en mg/l	153
Figure 70: Carte d'isoteneurs du Sodium en mg/l.....	153
Figure 71: Profil de l'évolution du Sodium (Merdja-ksar El Hirane)en mg/l	154
Figure 72: Carte en 3D du Sodium en mg/l.....	154
Figure 73: Carte d'isoteneurs du Potassium en mg/l.....	155
Figure 74: Profil de l'évolution du Potassium (Merdja-ksar El Hirane)	155
Figure 75: Carte en 3D du Potassium en mg/l.....	156
Figure 76: Carte d'isoteneur du Bicarbonates en mg/l.....	157
Figure 77: Profil de l'évolution du Bicarbonates (Merdja-ksar El Hirane)en mg/l.....	157
Figure 78: Carte en 3D du Bicarbonates en mg/l	158
Figure 79: Carte d'isoteneur du Sulfate en mg/l.....	159
Figure 80: Profil de l'évolution du Sulfate (Merdja-ksar El Hirane)en mg/l	159
Figure 81: Carte en 3D du Sulfate en mg/l.....	159
Figure 82: Carte d'isoteneur du Chlorure en mg/l.....	160
Figure 83: Profil de l'évolution du Chlorure (Merdja-ksar El Hirane)en mg/l	161
Figure 84: Carte en 3D du Chlorure en mg/l.....	161
Figure 85: Diagramme des analyses des eaux plaine Ksar El Hirane	165
Figure 86: Diagramme des analyses des eaux d'après Schoeller	166
Figure 87: Classification des eaux naturelles (d'après Piper US geologue survey)	167
Figure 88: Classification des eaux (d'après Piper US geologue survey).....	168
Figure 89: S.A.R Hamda	174
Figure 90: S.A.R vallée du M'zi	175
Figure 91: Diagramme des analyses des eaux d'après Shoeller	177

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:COMPARAISON DU VOLUME DES PRECIPITATIONS.....	35
Tableau 2:CARACTÉRISTIQUES DES STATIONS PLUVIOMÉTRIQUES	36
Tableau 3:les valeurs de la nébulosité à Aflou et Laghouat, période (1913-1938).	37
Tableau 4:Durée quotidienne d'insolation (en heures) à Laghouat	38
Tableau 5:L'humidité relative 1913-1937 SELTZER, station de Laghouat.....	38
Tableau 6:Humidité relative (Aéroport de Laghouat 1979-1980)	38
Tableau 7:Direction des vents et leurs fréquences en %.Station d'Ain Mahdi.	39
Tableau 8:Précipitations moyennes mensuelles aux diverses stations	41
Tableau 9:Précipitations mensuelles pour les deux périodes (13/38 et 13/53).....	41
Tableau 10:Précipitations moyennes annuelles	42
Tableau 11:PRECIPITATIONS OBSERVEES AU NIVEAU DES SIX STATIONS (1969/1993)	44
Tableau 12: précipitations annuelles (1990-2011)	46
Tableau 13:Répartition des précipitations en fonction de l'altitude	47
Tableau 14: Précipitations moyennes mensuelles 1990-2011 (station de Laghouat)	47
Tableau 15:Paramètres d'ajustement.....	48
Tableau 16:TABLEAU N° 16: Paramètres de calcul du X2	50
Tableau 17: Précipitations moyennes annuelles aux différentes stations	52
Tableau 18:facteurs de calcul (méthode de Theissen)	53
Tableau 19:Températures minimums, maximums et moyennes de la station météorologique de Laghouat (1913-1938)	54
Tableau 20:les températures minimums, maximums et moyennes de la station météorologique de Laghouat période 1969-1991	54
Tableau 21: Températures moyennes mensuelles et précipitations à la station de Laghouat (1913_1938)	56
Tableau 22: Indices d'aridité mensuels	58
Tableau 23: valeurs de l'indice de Moral	59
Tableau 24: valeurs de l'indice d'Emberger.....	60
Tableau 25:valeurs obtenues de l'indice de Stewart.....	61
Tableau 26: Valeurs de l'indice de Kerner	61
Tableau 27: Résultats des différents indices.....	62
Tableau 28: Moyennes mensuelles de l'évaporation (piche) Laghouat 1978-1980	62
Tableau 29: Moyennes mensuelles de l'évaporation (piche) Laghouat 1973-1980	62
Tableau 30: Calcul de l'évapotranspiration à la station de Laghouat.....	64
Tableau 31: résultats de l'évapotranspiration réelle	66
Tableau 32: paramètres de calcul de RU	67
Tableau 33: L'évapotranspiration réelle des différentes stations	67
Tableau 34: résultats du déficit d'écoulement	67
Tableau 35: Tableau de distribution hypsométrique.....	73
Tableau 36: Paramètres de calcul de l'indice de pente de Roche	76
Tableau 37: Classifications des reliefs selon la dénivelée spécifique (O.R.S.T.O.M.)	77
Tableau 38: Caractéristiques du réseau hydrographique	82
Tableau 39: nombre et longueurs des thalwegs	83
Tableau 40: volumes de quelques crues observées à la station de laghouat.....	88
Tableau 41: Nombre moyen de crues observées (1939-1949) (Document étude de faisabilité du barrage de seklefa).....	88
Tableau 42: débits des crues enregistrés à la station de Seklafa.....	88
Tableau 43: Caractéristiques empiriques.....	89
Tableau 44: Eléments de calcul du X2	90
Tableau 45: paramètres du bilan hydrologique relatifs au bassin versant de l'Oued M'zi. (Période 1964-1993).....	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 46: Ecoulements (superficiel et souterrain) exprimés en mm.....	91
Tableau 47: Ecoulements exprimés en volumes d'eau équivalents.....	92
Tableau 48: Caractéristiques des formations géologiques et volume infiltré.....	92
Tableau 49: Temps de concentration.....	97
Tableau 50: Temps de concentration selon Kirpich.....	97
Tableau 51: Paramètres statiques.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 52: Les paramètres statiques de l'échantillon.....	100
Tableau 53: les précipitations des différentes fréquences.....	100
Tableau 54: les précipitations des différentes fréquences.....	101
Tableau 55: Les résultats de calcul sont récapitulés dans le Tableau N° 55.....	103
Tableau 56: Débits maximums des crues de différentes périodes de retour.....	104
Tableau 57: Intensité des pluies par fréquence.....	105
Tableau 58: récapitulatif des résultats de la formule Mallet- Gauthier.....	105
Tableau 59: récapitulatif des résultats de débit de crue.....	106
Tableau 60: Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue δ	106
Tableau 61: Résultats de calcul pour le tracé de l'Hydrogramme de crue.....	107
Tableau 62: Echelle de résistivité des terrains.....	114
Tableau 63: Destination et usage des eaux souterraines des grés du Barrémien.....	123
Tableau 64: Log hydrogéologique synthétique.....	125
Tableau 65: paramètres hydrodynamiques (Forage Hamda FH1).....	137
Tableau 66: paramètres hydrodynamiques Forage Hamda F1.....	140
Tableau 67: Résultats des essais par paliers.....	140
Tableau 68: Pertes de charges.....	141
Tableau 69: le pH.....	145
Tableau 70: le pH.....	145
Tableau 71: conductivité.....	146
Tableau 72: TDS.....	147
Tableau 73: TDS.....	147
Tableau 74: Eléments chimiques majeurs (meq/l)-nappe barrémienne.....	148
Tableau 75: Eléments chimiques majeurs (meq/l)-nappe alluviale.....	148
Tableau 76: Eléments chimiques majeurs (meq/l)-nappe alluviale (suite).....	149
Tableau 77: Formules caractéristiques.....	162
Tableau 78 :.....	163
Tableau 79 :.....	164
Tableau 80: balance analyse des eaux de la plaine du Mzi.....	169
Tableau 81: dureté des eaux de Hamda.....	170
Tableau 82: dureté des eaux de la vallée du Mzi.....	171
Tableau 83: Résultats du SAR (nappe Hamda).....	173
Tableau 84: Résultats du SAR (nappe alluviale).....	173
Tableau 85: Caractéristiques du captage "Milok".....	176

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La présente étude est une approche méthodologique qui nous permet de localiser des aquifères susceptibles d'être exploités pour différents besoins de la région de l'oued M'zi, et d'apprécier leurs qualités chimiques. Les interprétations sont fondées, particulièrement sur le comportement hydrodynamique des eaux souterraines en milieu à double perméabilités, circonscrit dans un espace régi essentiellement par l'entité « bassin versant », représenté par la vallée de l'oued M'zi.

Le cadre géologique fait ressortir un contexte lithologique et structural spécifique à l'hydrogéologie en domaine atlasique, représenté par les formations gréseuses jurassico-crétacées, caractérisées par une double perméabilité, favorisant l'émergence de nombreuses sources, particulièrement au droit de la vallée de l'Oued M'ZI, entre autres sources du Milok.

Du point de vue climatologique, le bassin versant est soumis à un régime climatique –aride à hivers froids avec une précipitation annuelle moyenne qui varie de 150 mm à 200 mm. Le bassin présente une altitude moyenne avoisinant 1000 m. Les données concernant l'hydrologie sont insuffisantes, le climat de la région est aride à subaride les moyennes des précipitations ne dépassent guère 200 mm mais sur les montagnes sont plus abondantes. Nous avons déterminé la lame d'eau précipitée par les méthodes des isohyètes, et la moyenne arithmétique pour les différentes stations implantées dans le bassin versant. Le pouvoir évaporant approché par la formule d'estimation d'évapotranspiration réelle de Thornthwaite à la station de Laghouat est de 1036 mm. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre 169 mm à la station de Laghouat et de 154 mm à la station de Ain Madhi.

L'hydrogéologie de la région nous a permis de présenter et de classer les principaux aquifères en se basant sur l'établissement des coupes hydrogéologiques et des cartes thématiques (géologiques, structurales et piézométriques). Un essai de bilan hydrique a été établi pour le bassin versant de l'oued M'zi et par voie de conséquence, l'estimation du débit qui transite au niveau du pont du M'zi ainsi que le temps de

concentration. L'étude hydrogéologique a fait sortir tout d'abord les nappes aquifères du barrémien gréseux et la nappe alluviale de la plaine du M'zi. Ainsi, nous avons établi des cartes piézométriques pour distinguer les comportements des aquifères profonds et alluviaux.

Le chapitre relatif à l'hydrochimie nous a permis de distinguer la liaison étroite entre la teneur en sels dissous et la zonalité géologique. Un ensemble de recommandations relatives à la mobilisation des ressources exploitables a été proposé. L'hydrochimie a mis en évidence la prédominance du faciès bicarbonaté calcique provenant des calcaires, et du faciès sulfaté calcique et Magnésiens provenant des formations gypseuses.

Une attention particulière est portée à l'établissement des périmètres de protections (champ captant d'el Merdja, piémont du Milok). Des cartes de synthèses thématiques sont présentées pour illustrer l'évolution spatio temporelle des différents faciès chimiques à des fins de protection qualitative des eaux souterraine.

CHAPITRE I

GÉOLOGIE

I- HISTORIQUE DES TRAVAUX

Les premiers travaux géologiques concernant le Djebel Amour et plus généralement l'Atlas Saharien remontent à la fin du 19^{ème} siècle, dans le cadre de la réalisation de la Carte Géologique d'Algérie. Ces travaux peuvent être subdivisés en 05 grandes périodes :

- Période d'exploration (1835 – 1889)
- Période Flamand, Cornet, Galmier et Bassoulet (1889 – 1973).
- Période récente, Douihasni, Mahboubi, Aït Ouali et Mékahli (1986 – 1998).
- Travaux d'ingénieurs sur les recherches hydrogéologiques (1992 – 2012).
- Les études hydrogéologiques des directions de l'hydraulique (rapports inédits).

TISSOT (1881), PERON (1883), BROSSART (1886) et RITTER (1901) ont esquissé les premières cartes. RITTER (1901) décrit en détail les diverses formations du Djebel Amour. Il attribuait un âge Albien aux calcaires des Djebels Djahaifa, Chebka, El Mezara et El Kousia et un âge Vraconnien aux grès de la plaine d'Aflou. Par la suite, les séries géologiques de l'Atlas Saharien seront révisées par FLAMAND (1911) et LAFFITTE (1913).

FLANDRIN (1948), définit la stratigraphie du Nummulitique et sa répartition en Algérie. DURAND DELGA (1949) établit la carte géologique du Djebel Amour au 1/200.000. Il attribue ainsi au Portlandien les calcaires des Djebels Djahaifa, Chebka, El Mezara et El Kousia et à l'Albien les grès d'Aflou.

CORNET, FLANDRIN et la S.N. REPAL présentent une première synthèse stratigraphique de ces régions, bien qu'une partie de la série ait été justement reconnue comme appartenant au Jurassique supérieur.

EMBERGER (1960) publie son "Esquisse géologique de la partie orientale des Monts des « Ouled Naïl ». Il donne de nombreux détails lithologiques et stratigraphiques des différentes séries.

CARATINI (1961) range les calcaires d'Aflou et les grès dans le Barrémien - Aptien- Albien après avoir décrit minutieusement les formations du Djebel Sidi Okba (au Nord d'Aflou).

En 1967, une Mission Soviétique chargée de l'étude des formations aquifères du bassin versant de l'Oued Touil dresse une carte géologique à l'échelle 1/200.000, qui confirme les travaux de Caratini. La même année BASSOULLET (1973) découvre une faune de vertébrés associée à des bois silicifiés dans une formation

continentale près de Tiout (région d'Aïn Sèfra, Monts des Ksour). Pour lui cette formation dite "grès de Tiout" peut être attribuée à l'Albien. Dans la même année, BASSETO D. et COUMES F., révisent la stratigraphie de la région. La coupe levée dans le Djebel Azreg au Nord de Laghouat leur permet d'identifier le Kimméridgien, le Portlandien et le Berriasien.

En 1970, DELFAUD et BASSOULLET J. P., ont analysé les séries des Monts des Ksour qui constituent la partie occidentale de l'Atlas Saharien. Une litho stratigraphie des unités essentiellement continentales sera établie et un modèle sédimentaire proposé pour ces séries par DELFAUD (1974) sous la dénomination de "complexe deltaïque des Ksour". Ce dernier englobe les grès du Jurassique moyen et supérieur et les grès du Crétacé inférieur.

En 1971, Basseto D. et Guillemot F., publient une notice explicative de la carte géologique au 1/200.000 d'Ain Riche, ils y donnent des détails importants concernant le Jurassique et le Crétacé.

En 1973, PITAUD étudiant le synclinal d'El - Bayadh (Atlas Saharien central) donne la description lithostratigraphique et la synthèse stratigraphique de la région.

En 1976, dans son étude réalisée dans la région d'Aïn Ouarka (Monts des Ksour), DOUIHASNI M. a admis les subdivisions lithostratigraphiques proposées par BASSOULLET J. P (1973).

Les géologues de la SONATRACH (1978) travaillant dans les Monts du Djebel Amour, rangent les calcaires de Chebka, El - Mezara et Djahaifa (région d'Aflou) dans le Kimméridgien et les grès dans le Barrémien.

ABED et HARKET (1982) devaient donner de nombreux détails concernant la lithostratigraphie et la sédimentologie du Jurassique moyen et supérieur du Djebel Mimouna (Djebel Amour).

En 1983 MAHBOUBI M., dans son étude sur la Géologie et la Paléontologie du Crétacé post- Albien et du Tertiaire de la bordure méridionale du Djebel Amour donne des précisions stratigraphiques sur l'Albien supérieur, le Turonien inférieur et le Tertiaire ancien (cf. 1995), sur la base des coupes établies dans la région d'El Khol (Sud Est de Brézina).

II- CADRE GEOLOGIQUE GENERAL

L'Algérie est subdivisée en deux domaines qui s'opposent par leur histoire et leur structure géologique :

- Un domaine septentrional faisant partie de la chaîne alpine, édifié au cours du Tertiaire et qui demeure encore instable aujourd'hui.
- Un Domaine saharien, relativement stable, constitué d'un socle déformé, d'une couverture paléozoïque tabulaire. La frontière entre ces deux domaines est délimitée par l'accident sud-atlasique qui suit le revers sud de l'Atlas saharien.

La région étudiée (Laghouat, Djebel Amour) appartient au premier domaine et fait partie de l'Atlas saharien, une chaîne intracontinentale formée au Tertiaire, et qui constitue l'avant-pays déformé de la chaîne alpine d'Afrique du Nord (fig. 01).

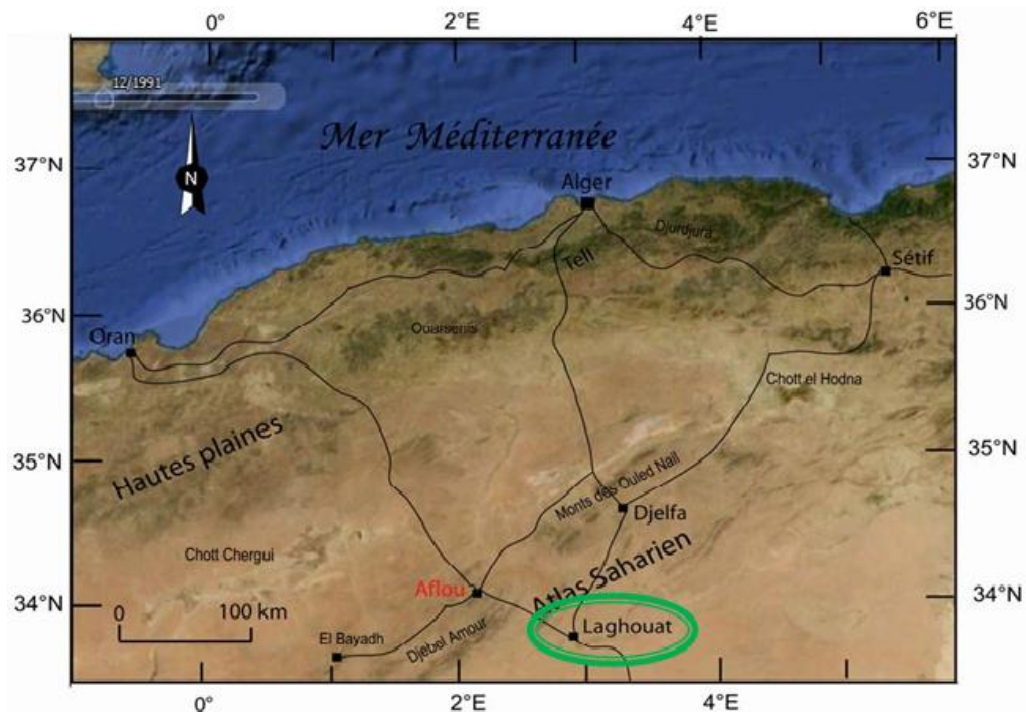


Figure 1: Les différentes parties de l'Atlas saharien (Google Earth)

L'Algérie du Nord est structurée en trois domaines qui sont du Nord au Sud (fig.01) :

- la chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides constituée d'unités allochtones charriées sur la marge africaine ;
- la zone tabulaire des Hautes Plaines, constituée de terrains méso-cénozoïques tabulaires qui reposent sur un socle paléozoïque plissé et métamorphisé ;
- l'Atlas saharien.

1. La chaîne Alpine

La chaîne alpine fait partie de l’orogénèse alpine périméditerranéenne (Durand-Delga, 1969) d’âge Tertiaire qui s’étend de l’Ouest à l’Est sur 2000 km, du Rif à la Sicile. On distingue les zones internes (Kabylie), représentées par différents massifs, dispersés le long de la côte méditerranéenne et les zones externes situées à sa périphérie. Les zones internes sont représentées par des « massifs anciens » littoraux, bordés au Sud par une « dorsale calcaire ». Les zones externes résultent du décollement au Miocène de la couverture sédimentaire mésozoïque déposée sur la marge nord de la plaque Afrique.

2. Les Hautes Plaines

Entre l’Atlas saharien et la chaîne des Maghrébides s’étend le domaine des Hautes Plaines constitué d’une plate-forme cratonique recouverte de sédiments méso-cénozoïque d’épaisseur relativement faible.

3. L’Atlas Saharien

Composé par les monts des Ksour, le Dj. Amour et les monts des Ouled Nail à l’Ouest, par les Zibans au centre et les Aurès à l’Est (fig. 02).

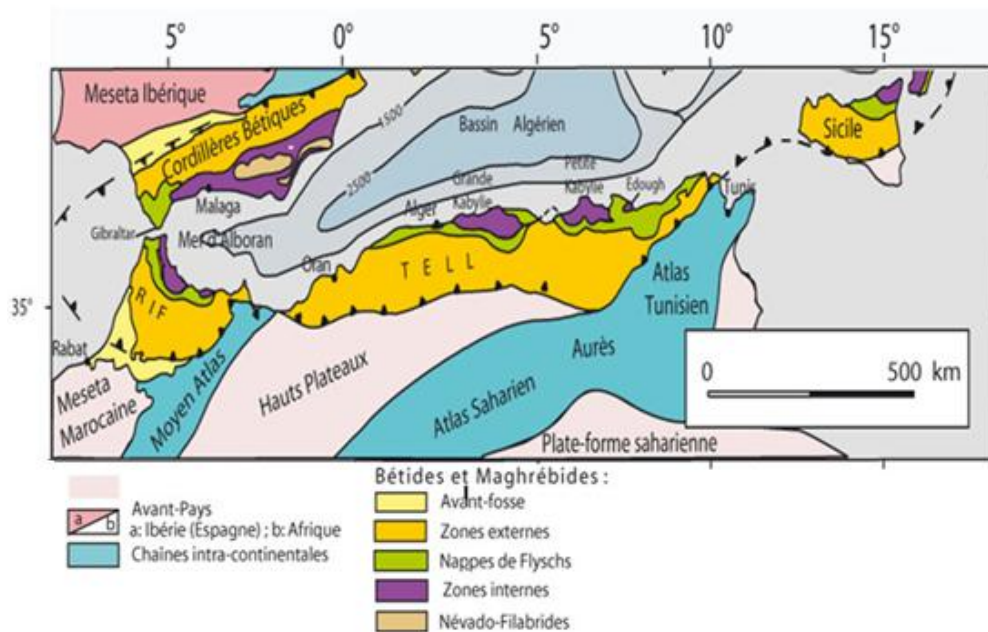


Figure 2: Schéma structural de la Méditerranée occidentale (Chalouan et al., 2008)

Il s’agit d’une chaîne intracratonique d’âge Tertiaire orientée Nord-Est - Sud-Ouest, délimitée par deux lignes de fractures : l’Accident Nord-atlasique et l’Accident Sud-atlasique (fig. 03). L’orogénèse atlasique est l’héritage d’un sillon subsident à sédimentation mésozoïque.

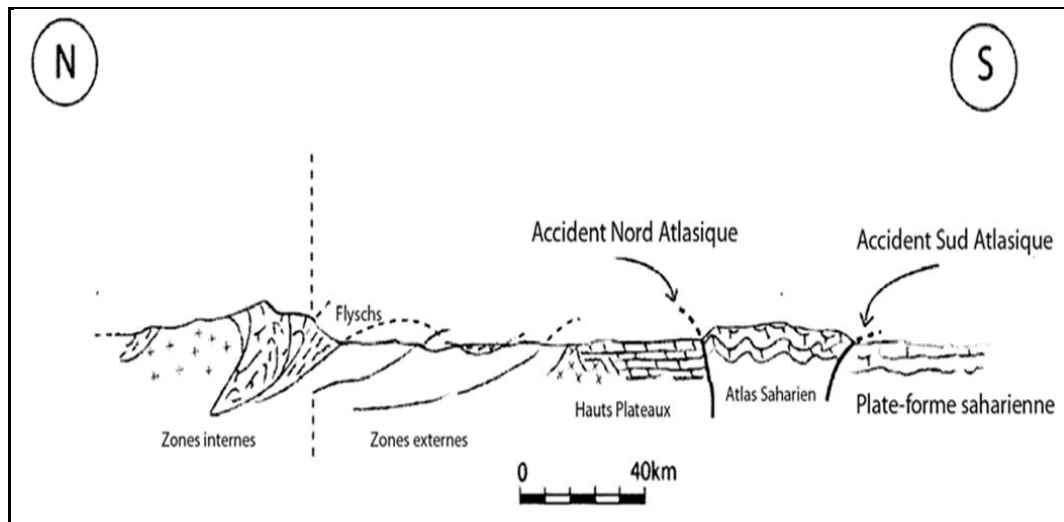


Figure 3: Esquisse structurale Nord-Sud de l'Algérie du Nord

III- CADRE GEOLOGIQUE LOCAL

La zone étudiée appartient au Djebel Amour constituant l'un des faisceaux de l'Atlas Saharien. Les monts du djebel Amour forment un nœud orographique très important, et constituent un ensemble de plis plus ou moins individualisés d'âge Jurassique et Crétacé. Ils enserrant une cuvette synclinale au centre de laquelle se trouve la ville d'Aflou (fig. 04).

Au Sahara et au début de l'ère secondaire les reliefs formés sont aplanis ; les terrains enlevés sont exportés au nord et vont combler les zones de subsidences. Durant l'ère secondaire la mer couvrait en majeure partie le Maghreb ; les grands géosynclinaux de l'atlas Saharien commencent à être comblés de sédiments dès l'ère secondaire, peu profonde vers le nord.

Au crétacé la mer va couvrir la plus grande partie de l'Afrique du Nord, elle l'évacuera au début du Tertiaire. Les dépôts terrigènes et chimiques offrent une remarquable sédimentation.

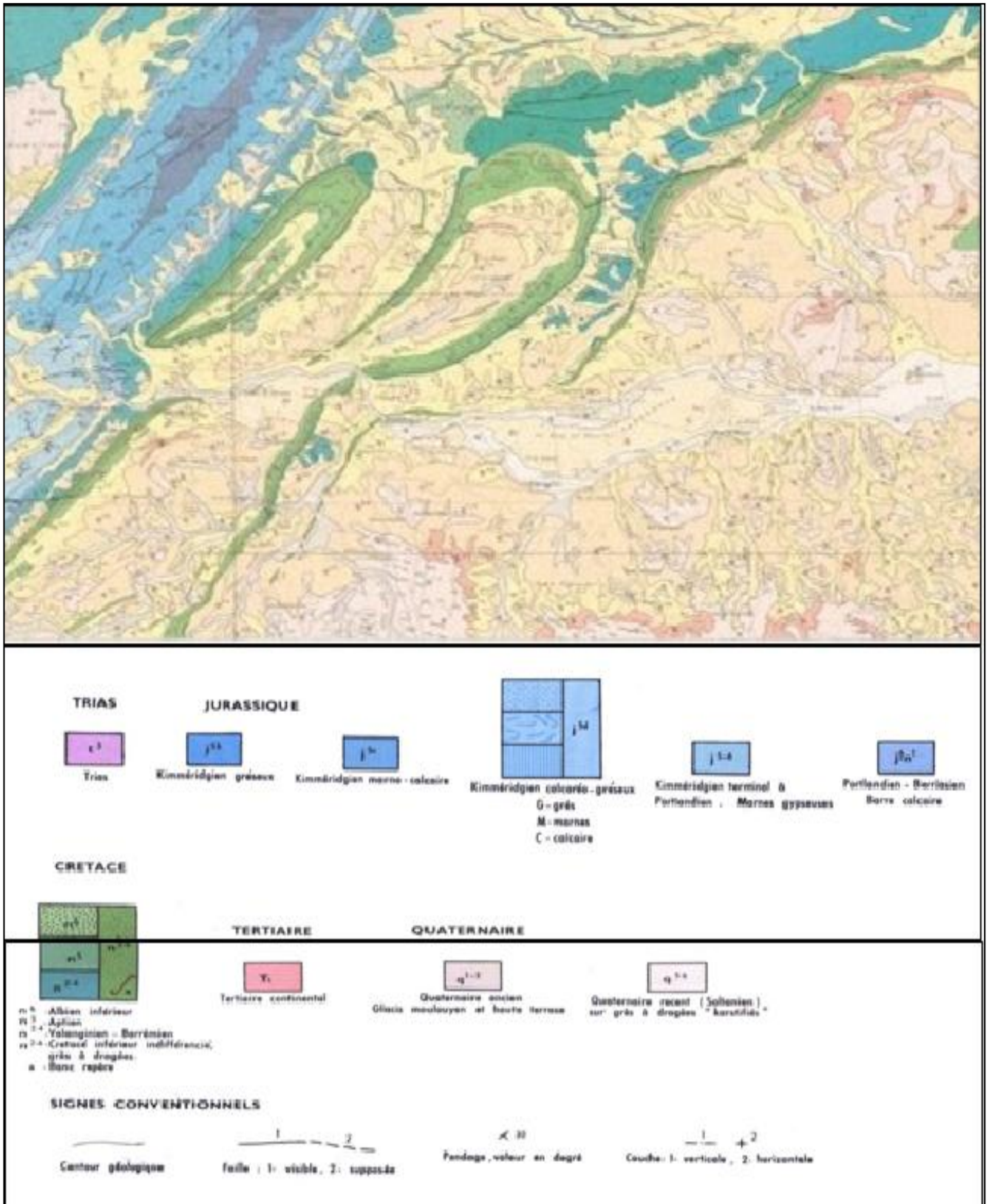


Figure 4: Carte géologique du synclinal d'Aflou au 1/100.000°

1. Lithostratigraphie (fig. 05)**1.1. Le Trias**

Il existe dans le Djebel Amour plusieurs pointements où l'on peut observer des formations caractérisées par un mélange d'argiles, de marnes, parfois de grès, brunâtres, violines ou versicolores avec des intercalations de gypse ou d'halite et présentant des intrusions de roches vertes (photo 01).



Photo 01 : Affleurement triasique

Ces formations apparaissent généralement en contact anormal avec des niveaux d'âges variés. Dans leur ensemble, ces affleurements triasiques soulignent le passage d'accidents N 30°, témoins de rejets profonds qui paraissent actuellement en mouvement ascendant. Au niveau de la région étudiée, on peut noter l'existence de quelques affleurements, tels que :

- le pointement d'Ain Fourene : situé sur la route d'Aflou el Guicha, il est constitué de roches vertes sous forme de filons en grains fins et légèrement modifiés au contact des calcaires jurassique. Ces filons de 1 à 2 mètres et sur une dizaine de mètres de long se trouvent à l'intérieur des marnes salifères et gypse. Cet affleurement se trouve enserré par l'anticlinal du djebel chebka et djebel zlag.
- le pointement du Djebel Gourou : il s'agit d'affleurements localisés dans les fonds et sur les bords des ravins souvent encaissés. Ils sont formés de gypse et microdiorites.

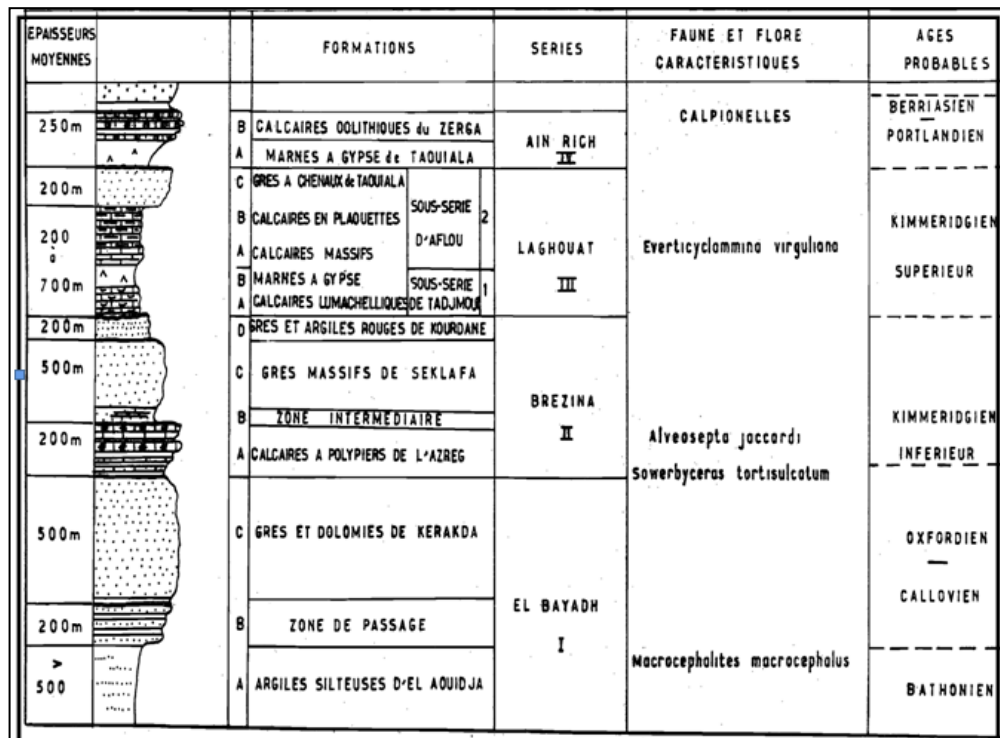


Figure 5: Séries du jurassique supérieur du Djebel Amour (S.Abed ,1982)

1.2. Le Jurassique

La série la plus complète du Jurassique supérieur affleure dans la localité de Djebel Ech Chebka (fig.06). Cette province est marquée par des sédiments mixtes détritiques et carbonatés. Cependant, nous nous sommes limités aux seules formations affleurant au niveau de la région étudiée.

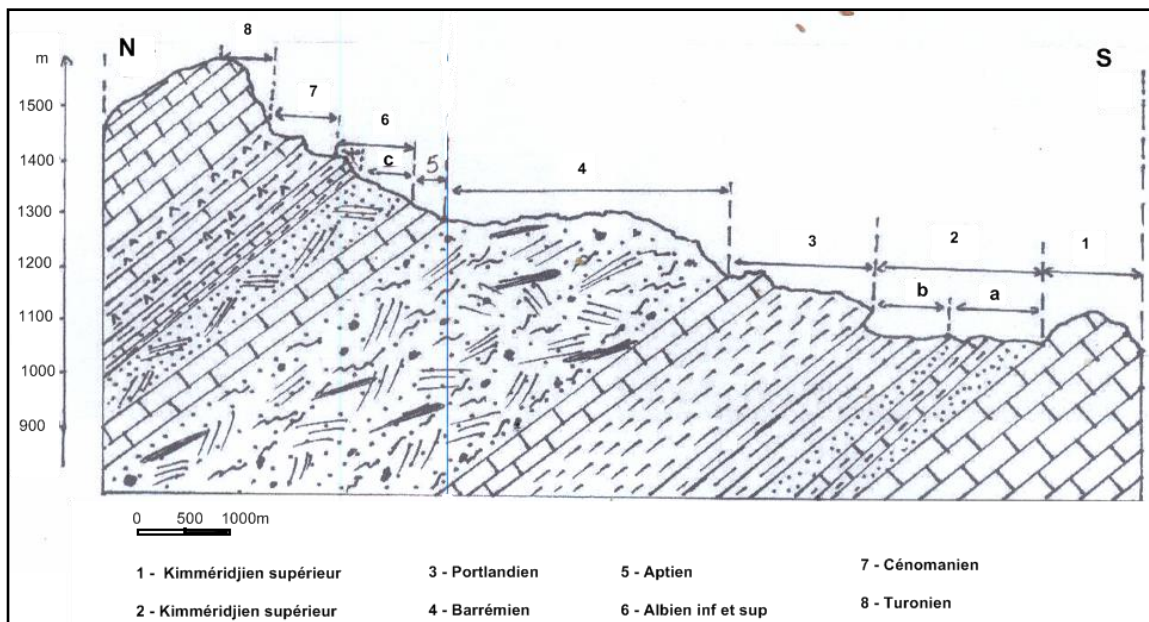


Figure 6: Série complète du Jurassique et Crétacé (Djebel Chebka)

*a/ - Le Kimmeridgien**• Kimméridgien gréseux*

Il occupe le cœur des anticlinaux. C'est au niveau de l'anticlinal de Taouiala Kef Labiod au nord de Aïn Sdi Ali, Djebel Zlag qu'affleurent ces grès. D'après les forages effectués à Taouiala et Kef Labiod, et tout récemment à El Ghicha, l'épaisseur de ces grès varie d'un endroit à un autre. On peut noter une épaisseur de 100 mètres au niveau de Taouiala et plus de 200 m à Kef Labiod.

• Kimméridgien marno-calcaire (photo 02)

La série présente une épaisseur de 100 m au niveau de djebel Djéhaifa et l'anticlinal de Taouiala au niveau de ses structures, la série se présente comme suit :

- Des calcaires sous forme de bancs métriques alternant avec des marnes vertes gypseuses.
- Une succession de calcaire et marno-calcaire de couleur grise.
- Des marnes parfois feuilletées de couleur grise dans lesquelles s'intercalent des bancs de calcaires. Un âge Kimméridgien inférieur est attribué à la formation marno-calcaire basale et le kimméridgien supérieur est représenté par l'ensemble gréseux massif.

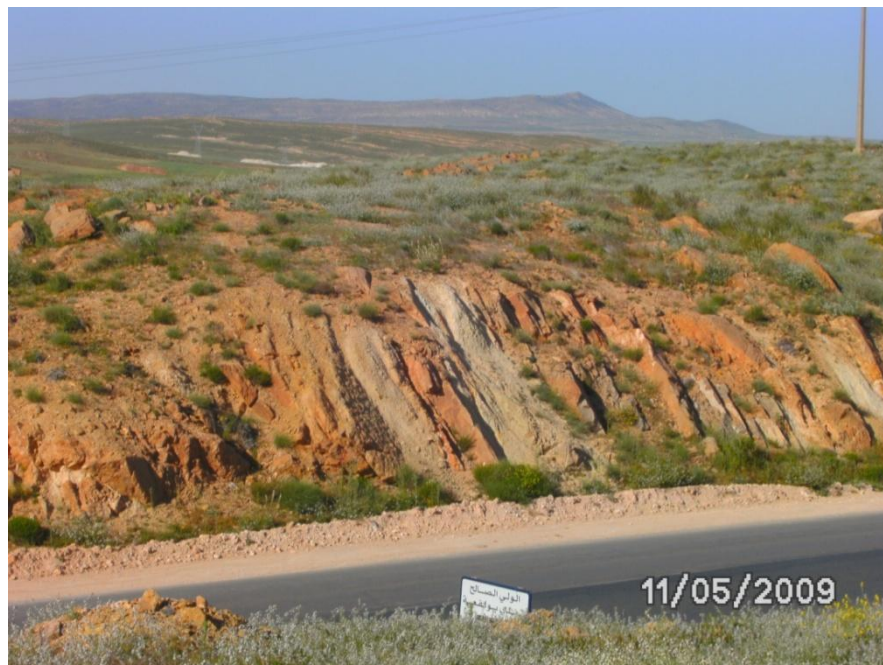


Photo 02 : Marno calcaire très redressés du Kimméridgien inférieur

b/ - le Portlandien

Déterminant les plaines qui séparent les grands reliefs, cette série a une épaisseur de 200 m, elle débute par :

- Une assise calcaire, dure et homogène (photo 03), de couleur grisâtre à jaunâtre.
- Le portlandien se termine par des bancs de calcaires bien visibles et forme parfois de véritables corniches. Ces calcaires à lumachelles deviennent parfois oolitiques et prennent des formes plus régulières.



Photo 03 : Calcaires du Portlandien

Les terrains anciens du jurassique occupent généralement les cœurs des anticlinaux. Dans le djebel Amour les faciès calcaires, calcaire dolomitique se présentent surtout sous forme de bancs plus ou moins épais et mal lités. Cette épaisseur varie du mètre à quelques mètres. Les couches de la partie supérieure sont situées immédiatement au-dessous d'un ensemble puissant de grès sans fossiles. Dans la chaîne du djebel Sidi Bouzid le bord de l'oued M'zi et le djebel Lazreg des fossiles caractéristiques du jurassique ont été rencontrés. La faune nombreuse et variée a suffi pour déterminer cet étage avec certitude.

1.3. Le Crétacé

a/ - Barrémien-Vallanginien

Dans le Djebel Amour cet étage est représenté par un complexe très puissant de grès, présentant un faciès habituel de grès à stratifications entrecroisées allant de quelques centimètres à plusieurs mètres. La roche est friable avec un ciment calcaire. C'est une

série uniforme à grains grossiers qui en beaucoup de points contient de nombreux galets de quartz de diamètre variable allant de quelques millimètres à 2-3 centimètres. Un forage réalisé au niveau du pénitencier d'Aflou sur 200 m de profondeur recoupe cette formation Barrémienne (fig. 07).

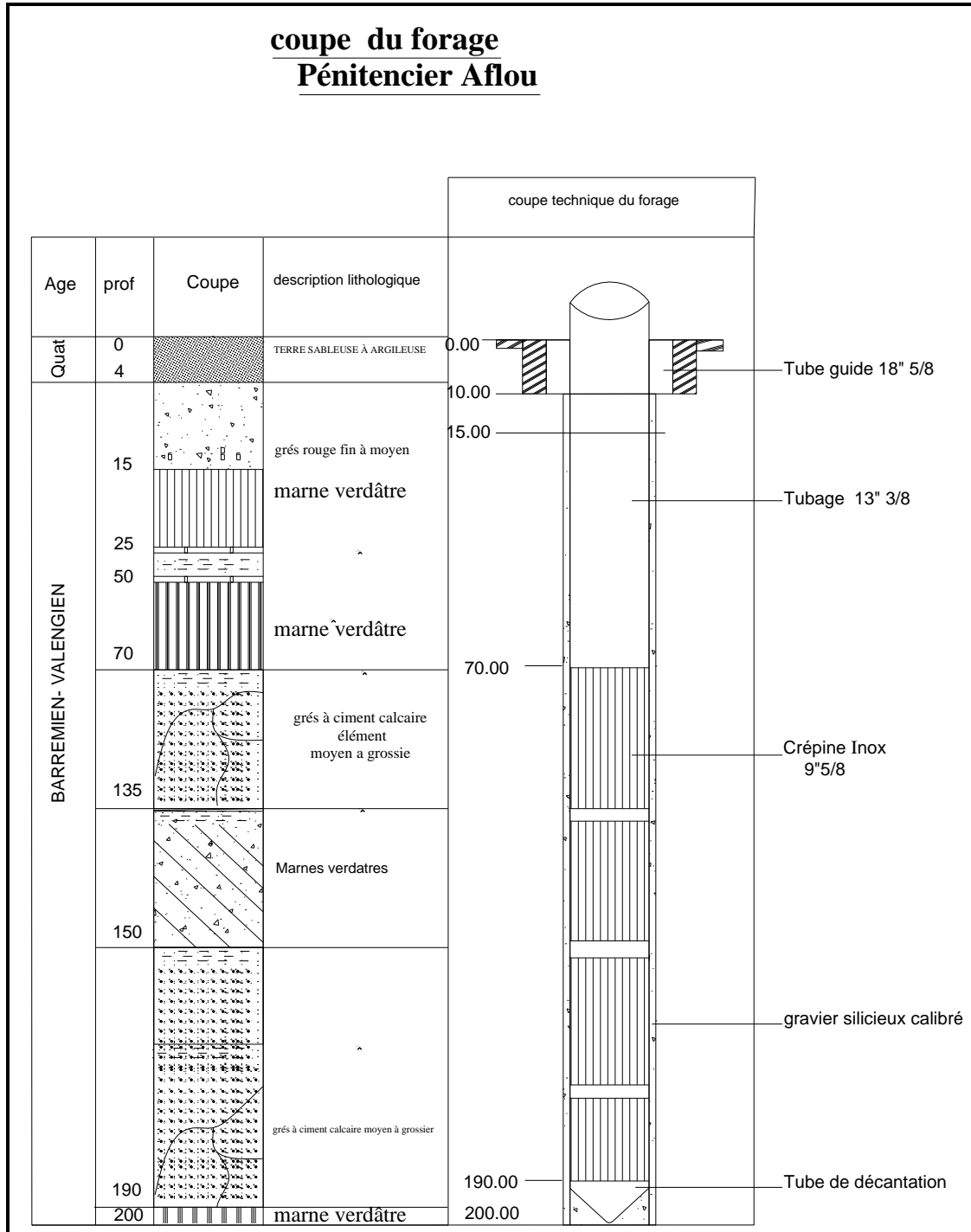


Figure 7: Forage réalisé au niveau du pénitencier d'Aflou recoupant le barrémien

Ces grès sont largement fissurés suivant deux directions majeures d'orientation N60°E et N130°E. Ce sont ces grès qui couvrent les plus grands espaces et constituent la cuvette du synclinal d'Aflou. Ces grès sont largement affectés par une tectonique cassante. La figure 08 illustre d'une façon très significative l'importance de ces grès très fissurés en contrebas du Djebel Gourou.

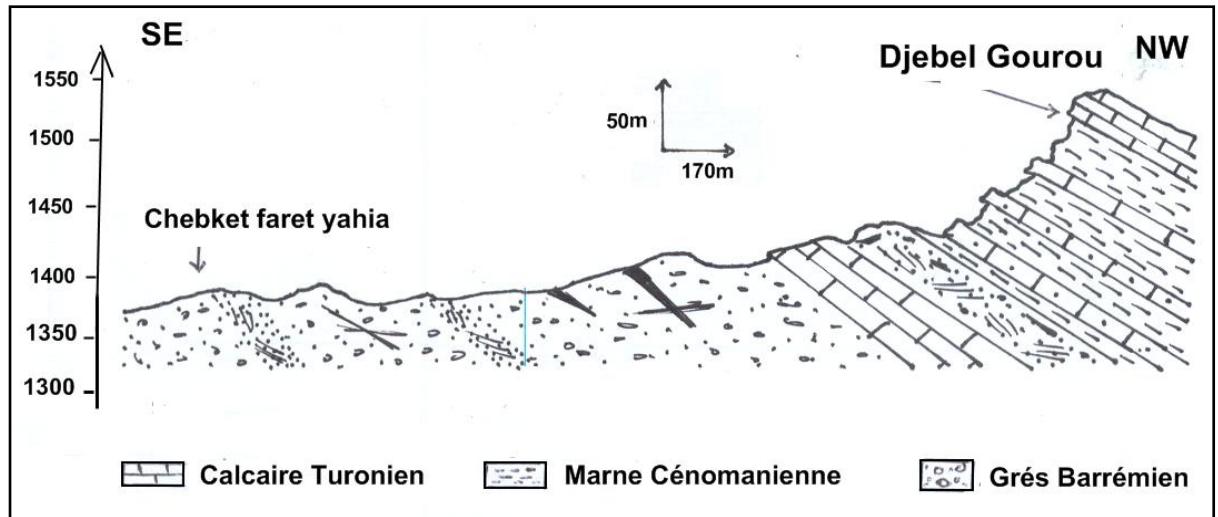


Figure 8: Coupe géologique recoupant les grès Barrémien dans le Djebel Gourou

b/ - Albien-Aptien

Cet étage commence à affleurer au pied de la pente qui forme le djebel Sidi Okba et Le kef Gourou. A la partie supérieure on trouve une brève alternance de marnes calcaire et calcaire gréseux. Cet ensemble est attribué à l'Albien supérieur. Puis des grès en gros bancs très faiblement inclinés, de 2 à 6 mètres séparés par des lits marneux de l'ordre du décimètre ; le tout est attribué à l'Albien inférieur. Au-dessous apparaissent des calcaires jaunes marneux. Ces calcaires présentent des niveaux fossilifères. Cette barre de calcaire est attribuée à l'Aptien

Dans la région d'Aflou, l'Albien inférieur présente une épaisseur de 300 m. ce sont généralement des grès moyens à grossiers contenant des dragées de quartz dans lesquelles sont intercalées des marnes verdâtres (fig. 09).

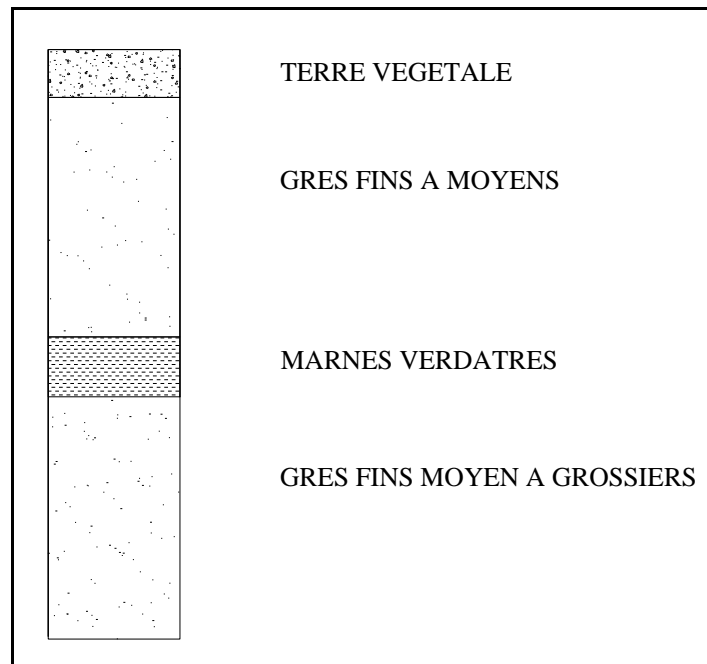


Figure 9: Coupe standard des grés de l'Albien

Ils présentent des traces de minéralisation (pyrite) avec souvent des débris de bois silicifiés (photo 04).



Photo 04 : Bois silicifié dans les grés Barrémien

c/ - Cénomanién

Correspond à une sédimentation marine transgressive sur les grès Albien. La formation cénomaniénne est constituée exclusivement de Marnes verdâtres gypseuses. Dans certains cas des bancs métriques de calcaire dolomitique viennent s'intercaler dans les marnes. Cette formation a une puissance de 200 mètres environ.

d/ - Turonien

D'une épaisseur moyenne de 80 mètres, le Turonien apparaît au niveau des sommets du Kef Gourou, Sidi Okba. Il forme des corniches constituées exclusivement de calcaire dolomitique, très dur de couleur blanchâtre et à surface rugueuse. Dans l'ensemble, le Turonien n'est pas riche en faune, voir dans la plupart des cas ces calcaires sont azoïques.

1.4. Le Tertiaire

Les formations récentes sont le plus souvent conservées dans les cuvettes synclinales alors qu'elles ont été enlevées par l'érosion au niveau des anticlinaux.

a/ - Oligocène

Dans l'Atlas Saharien on le rencontre au niveau de très nombreuses localités. C'est un conglomérat à éléments grossiers bien arrondis (5 à 8 cm), le ciment est marno-calcaire dans la plupart des cas. Dans le djebel Amour, ces dépôts sont localisés au Djebel Hairech et Djebel Gourou.

b/ - Miocène – Pliocène

Il nous a été difficile de les séparer ; mais dans le Djebel Amour, ils sont largement représentés. Toutefois, ces dépôts forment des collines à têtes plates dans les régions de Sidi Bouzid. Entre Hadj-Mechri et Sidi Naceur, ils occupent de vastes étendues. Leur profondeur varie entre 120 et 150 mètres. Le Miocène est caractérisé par des dépôts détritiques, constitués de la base au sommet par :

- des argiles grises alternant avec des sables et des calcaires à éléments bréchiqes,
- des marnes gréseuses alternants avec des grés et quelques passées de calcaires et gypses,
- des argiles rouges avec des niveaux calcaires.

1.5. Le Quaternaire

Il résulte de l'accumulation dans les zones topographiquement basses d'alluvions constituées de sédiment généralement à granulométrie fine. Le Quaternaire ancien formé d'éléments grossiers, est déposé sur de très vastes étendues, généralement entre les collines témoins du Mio-Pliocène et forme parfois les berges des oueds qui atteignent plusieurs mètres.

Le Quaternaire récent lui aussi est largement représenté dans le Djebel Amour. On le rencontre au niveau de la cuvette synclinal d'Aflou. Au Nord, entre Aflou et Gueltet Sidi Saad. Ce Quaternaire est formé par une argile sableuse de couleur grisâtre parfois rougeâtre et tranche par sa couleur sur les autres dépôts.

2. Analyse structurale

Avant d'atteindre la plate forme saharienne, le Djebel Amour est la dernière barrière montagneuse qu'on rencontre. Sur tout son ensemble, l'atlas Saharien garde les mêmes caractéristiques du Maroc jusqu'au Aurès. Les anticlinaux et synclinaux de l'Atlas Saharien ont subi une tectonique très poussée durant le Tertiaire. Les plis anticlinaux sont généralement coffrés et faillés au cœur (fig. 10). Ces failles ont mis à jour un Trias accompagné de roches vertes.

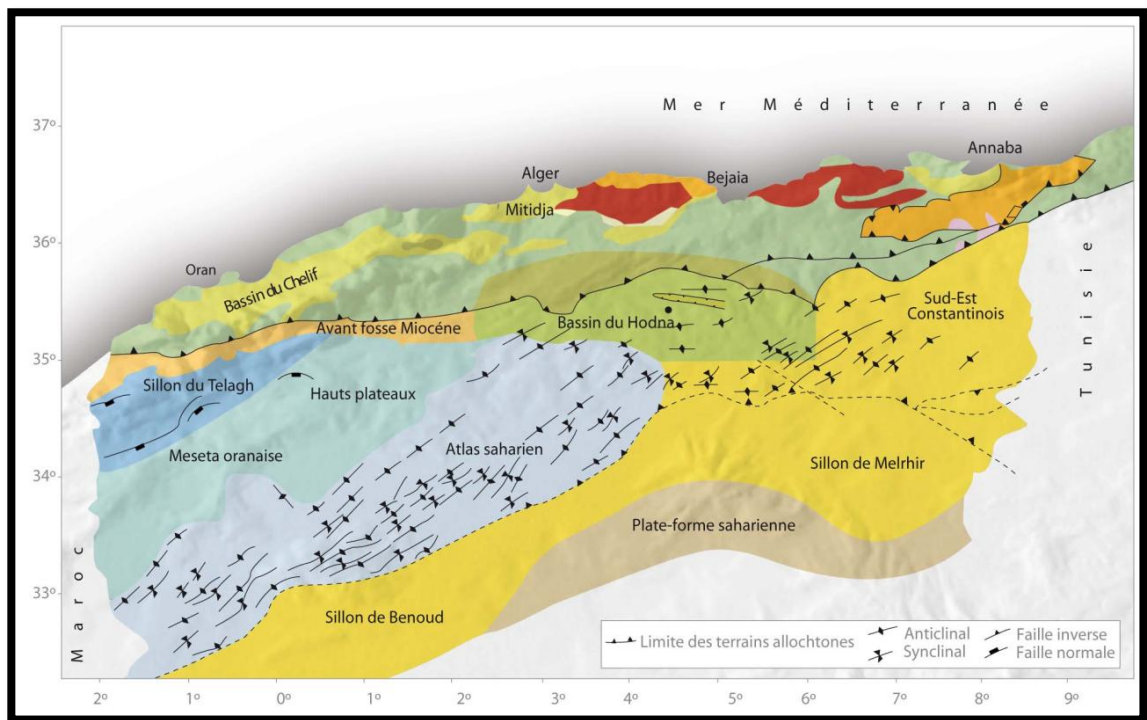


Figure 10: Principales structures de l'Atlas saharien (Wec Algérie, 2007)

2.1. Disposition structurale du Djebel Amour

Généralement les synclinaux sont remplis de grès Barremien, quant aux synclinaux perchés de Gourou, Sidi Okba, Oum el Guedour, ils sont formés exclusivement de calcaire Aptien, de grès Albien, de marnes gypseuses du Cénomaniens. Le tout est surmonté par des calcaires dolomitiques du Turonien. La liaison avec les hautes plaines oranaises se fait par des accidents complexes le plus

souvent décrochant des rejets qui peuvent atteindre 1200 mètres et viennent s'éteindre au niveau d'Aflou (Durant Delga, Cornet 1950).

Ces flexures se relaient du SW au NE avec des rejets qui peuvent atteindre 2000m, ces failles constituent la flexure Sud Atlasique.

Dans le Djebel Amour, les plis sont bien individualisés, les anticlinaux sont à cœur érodé, et présentent des couches bien redressées. Les synclinaux très larges et à fond plats.

Enfin, on peut citer la présence de synclinaux perchés qui constituent un élément remarquable dans la morphologie du Djebel Amour. Du SW au NE on peut reconnaître les éléments suivants :

- L'anticlinal du Djebel Aouidja et Sidi bouzid
- Synclinal du Djebel Tafza
- Synclinal perché du Djebel Oum El Guedour, Sidi Okba et Gourou
- L'anticlinal du Djebel Chebka
- Synclinal d'Aflou
- L'anticlinal du Djebel Zlag
- Synclinal de la Gaada
- L'anticlinal d'El Ghicha
- Synclinal du Stah

2.2. Système de fracturation

a/ - Les failles

L'analyse des éléments structuraux réalisée sur Djebel Amour a permis de reconnaître quatre directions principales :

- N 10° - N 30°, marquées par des rejets importants, soulignés parfois par des roches triasiques.
- N 50° - N 70°, affectant généralement les formations du Barrémien. Ils sont marqués par des rejets faibles et responsables de l'émergence de plusieurs sources.
- N 80° - N 120°, qui constitue des accidents de nature profonde marquée par l'injection de roches triasiques.
- N 140° - N 160°, de nature profonde, responsables souvent des pertes totales au niveau des grands oueds du Djebel Amour.

b/ - Les fissures

Les mesures sur les directions des fissures ont permis de faire ressortir quatre directions correspondant à des maxima de fréquences, parmi lesquelles on peut souligner celles qui affectent plus particulièrement les grès du Barrémien. Il s'agit des orientations principales N 60° - N 80° et N 140° - N 160° (photo 05).



Photo 05 - Affleurement de grès barrémiens affectés par des fissures N60° et N140°

On peut remarquer une certaine concordance entre les failles et les fissures suivant les directions N 60° - N 80° et N 140° - N 160°. A ce niveau, les failles constitueraient des drains naturels des eaux souterraines et pourraient être le siège de zones privilégiés au captage de la nappe formée par les formations gréseuses du Barrémien. Sur le plan hydrogéologique, elles facilitent l'infiltration des eaux en direction des nappes profondes participant ainsi à leur alimentation. En effet, la circulation des eaux souterraines dans les formations gréso-albo-aptien se fait à travers les fissures. L'étude de la fissuration dans les différents forages a montré qu'elle se poursuivait jusqu'à une profondeur dépassant les 100 mètres.

C'est aussi au niveau de ces fissures à côté du réseau de failles principales que se localisent la plupart des émergences naturelles importantes d'eau souterraine.

CHAPITRE II

HYDROCLIMATOLOGIE

I. INTRODUCTION

L'exploitation des eaux superficielles et souterraines et l'aménagement de la région sont en étroite dépendance avec les différents facteurs régissant le climat (régime des précipitations, température, vent et l'humidité) et ceux qui interviennent dans le partage successif des eaux à la surface du sol (lithologie, végétation, morphologie générale du bassin versant). L'ensemble concourant à l'établissement d'un bilan hydrologique pour une période déterminée et qui va constituer la base essentielle d'un modèle d'aménagement à adopter. L'étude des nappes souterraines est liée à l'étude hydro climatologique.

II. RELATION ENTRE LES PLUIES ET LES PERTURBATIONS**1. Perturbations liées aux fronts polaires :**

Elles présentent un maximum de fréquence lors des périodes de déplacement des zones de hautes pressions et lorsque le front atteint sa période la plus méridionale autour du 30^e parallèle à l'automne et au printemps. Lorsque l'isobare 1025 se situe au niveau des hauts plateaux un courant Sud-Ouest, peut se développer, les températures seront alors plus élevées que la normale et l'on pourra avoir des précipitations de longues durées.

2. Perturbations liées aux fronts méditerranéen II

Parfois des coulées d'air froid polaire pouvant s'enfoncer très loin vers le sud constituant un système de front au contact de l'air saharien chaud .On observe alors une série de fronts qui se déplace d'Ouest en Est du Maroc à la Tunisie.

3. Les perturbations liées au front des alizés ou au front atlantico-méditerranéen

Ce dernier occupe une direction méridienne sur la bordure centrale des hautes pressions atlantiques on observe des averses orageuses au niveau de l'atlas saharien et ses bordures ainsi que sur les hauts plateaux.

Ce maximum d'activité se présente lorsque les vents pluvieux arrivent du Nord-Ouest. Les perturbations venant de l'ouest ou du Sud-ouest seront partiellement dégénérées après leur passage sur le Maroc. Il est intéressant de comparer les volumes des précipitations observées sur la bordure atlasique avec celles relevées au Sud.

Tableau 1:COMPARAISON DU VOLUME DES PRECIPITATIONS

Période	Bordure de l'atlas	Beni-abbes	Timimoun
1926-1950	100	32,1	15,4
1926-1960	100	40,7	20,4

III. LE RÉSEAU PLUVIOMÉTRIQUE.

Les données climatologiques sont fournies par les stations anciennes (Aflou, Tadjmout, Laghouat) et récentes fonctionnant à partir de 1960 et 1967. Les caractéristiques de toutes les stations sont mentionnées dans le tableau N°02 ci-dessous. Les données climatologiques nous sont fournies par deux types de stations : les unes que nous qualifierons d'anciennes et étudiées par SELTZER, les autres récentes mises en service postérieurement à 1960.

Tableau 2: CARACTÉRISTIQUES DES STATIONS PLUVIOMÉTRIQUES

Stations	Latitudes	Longitudes	Z (m)	Installation	Stations	Latitudes	Longitudes	Z (m)	Installation
Gueltet S.Saad	34°17'50'' ,	1°56'32''E	1110	Après 1960	Tadjmout	33°52'34'' ,	2°31'39''E	894	1925
Aflou	34°6'46''	2°6'8''E	1406	1874	Sidi Makhlouf	34°7'41''	2°55'59''E	886	Après 1960
O. Morra	34°9'34''	2°19'9''E	1304	Après 1960	Laghouat	33°46'	2°56'E	765	1885
S. Bouzid	34°20'35'' ,	2°15'43''E	1267	Après 1960	Ksar Hirane	33°47'42'' ,	3°8'50''E	719	Après 1960
Seklafa	33°59'51'' ,	2°21'3''E	1233	Après 1960	Tadjrouna	33°29'53'' ,	2°6'12''E	906	Après 1960
El – Ghicha	33°55'48'' ,	2°8'54''E	1100	Après 1960	Sebgag	34°00'10'' ,	1°54'16''E	1402	Après 1960
A. Mahdi	33°47'42'' ,	2°17'32''E	985	Après 1960	Brida	33°56'56'' ,	1°45'6''E	1400	Après 1960
El – Houita	33°38'45'' ,	2°27'08''E	900	Après 1960	Taouiala	33°52'1''	2°48'19''E	1257	Après 1960

Les données concernant la zone d'étude (bassin versant du M'zi Atlas saharien central) sont fournies par huit (08) stations réparties sur l'ensemble du bassin versant (fig. 11).

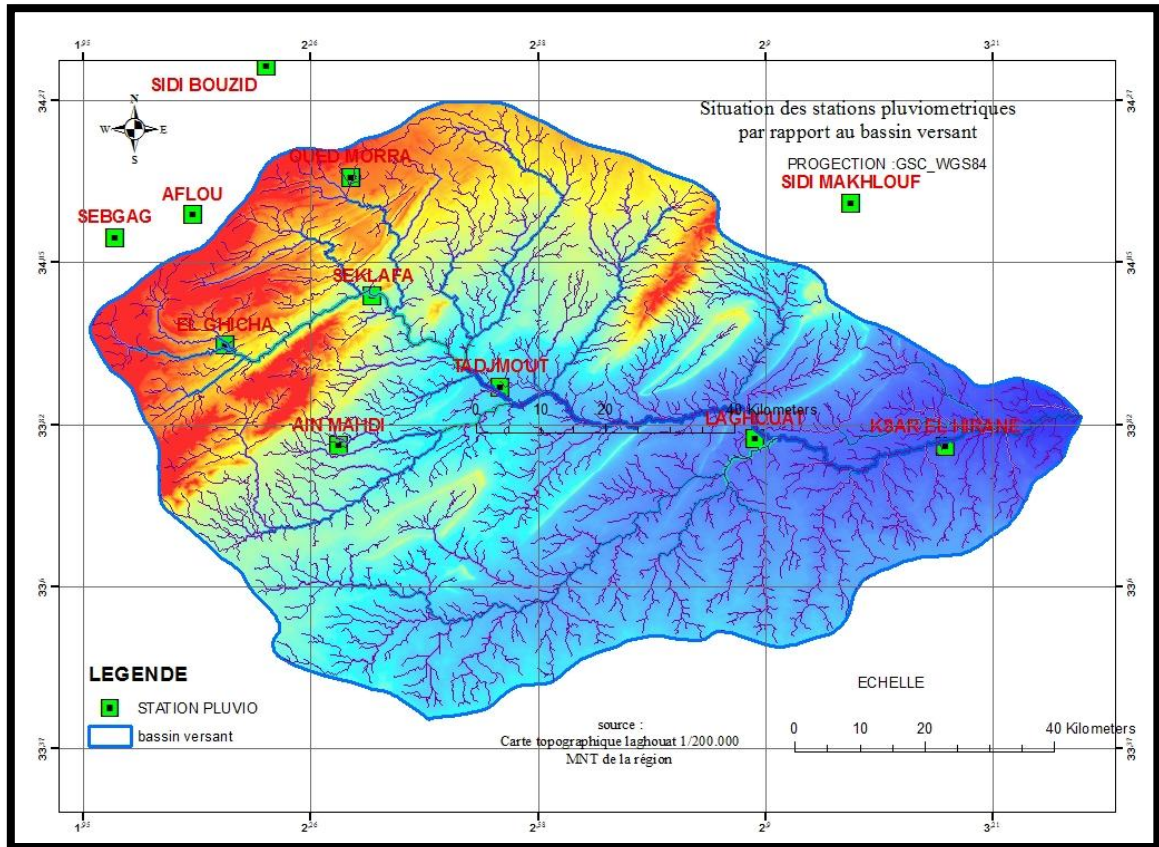


Figure 11: Situation des stations pluviométriques

IV. LES ÉLÉMENTS DU CLIMAT :

1. Nébulosité :

La nébulosité intéresse la fraction du ciel couverte par les nuages exprimée en dixième. Elle varie de 0 pour un ciel clair à 10 pour un ciel entièrement couvert ; malheureusement nous ne disposons que des observations réalisées à Aflou et à Laghouat et rapportées par SELTZER (1913-1938).

Les nuages sont donc relativement plus nombreux à Aflou qu’à Laghouat. Le ciel est plus clair au mois de juillet qu’au mois de décembre et janvier

Tableau 3: Les valeurs de la nébulosité à Aflou et Laghouat, période (1913-1938).

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	Sp	O	N	D	Année
Aflou	4,5	4,7	4,1	3,8	3,6	3,0	2,0	2,2	2,8	3,2	4,0	4,2	3,5
Laghouat	2,7	3,0	2,5	2,2	2,4	2,2	1,8	2,0	2,5	2,4	2,9	2,7	2,4

2. Insolation :

L’insolation influe directement sur la température des sols en surface aussi bien par sa durée journalière que par l’angle d’incidence du rayonnement solaire. La durée moyenne

mensuelle est de 76 heures à la station de Laghouat. Nous avons réuni les données d'insolation pour la période 1913-1938 SELTZER dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4:Durée quotidienne d'insolation (en heures) à Laghouat

Mois	J	F	M	A	M	J	JT	AT	SP	OCT	NOV	DEC
Laghouat	68	75	76	77	78	80	83	81	81	76	71	67

La répartition de la durée moyenne quotidienne d'insolation présente un maximum de 83 heures en Juillet pour Laghouat et un minimum de 67 heures en Décembre.

3. L'humidité relative :

L'humidité ou état hygrométrique c'est le rapport exprimé en % de la tension de vapeur, à la tension maximum correspondant à la température (t).

Tableau 5:L'humidité relative 1913-1937 SELTZER, station de Laghouat

Mois	Heure (7h)	Heure (13h)	Heure (18h)	Moyenne
Septembre	60	35	37	44
Octobre	66	39	42	49
Novembre	75	46	49	56,66
décembre	80	52	59	66,64
Janvier	80	52	60	64
Février	72	43	46	53,66
Mars	70	39	41	50
Avril	57	32	35	41,3
Mai	55	32	34	40,3
Juin	48	28	28	34
Juillet	43	24	26	31
Août	43	23	24	30
moyenne	-	-	-	46,46

Tableau 6:Humidité relative (Aéroport de Laghouat 1979-1980)

S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JL	At	moyenne
58	68	63	66	68	52	63	60	50	48	34	33	55

4. Les vents :

Le vent est un élément important du climat. Les hautes pressions tropicales qui forment la limite entre les courants d’Ouest des moyennes altitudes et alizés des zones dites tropicales connaissent des déplacements en latitude au cours des saisons. En hiver, elles occupent les latitudes les plus basses permettant aux perturbations du front polaire de descendre sur les marges Sud Atlasique et le Sahara septentrional. En été, gagnant des latitudes plus élevées, elles permettront aux influences sahariennes de s’étendre sur l’Algérie septentrionale et le sud de l’Europe. Le régime des vents sera en rapport avec la circulation atmosphérique. En hiver les vents soufflent avec régularité sur la partie méridionale des hautes pressions tropicales, en réalité le véritable alizé n’existe que sur le domaine océanique. Au Nord-Est, on pourra observer des vents Etésiens qui sont des vents saisonniers secs soufflant du Nord à Nord-Est.

Tableau 7: Direction des vents et leurs fréquences en %. Station d’Ain Mahdi.

Nombre d'observations de chaque direction																	
Mois	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Mois	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
J	200	54	116	8	110	51	82	44	At	108	49	258	57	226	125	173	16
F	175	40	77	9	77	54	96	40	S	100	43	245	83	215	99	122	18
Mars	216	56	101	27	87	57	98	40	O	156	74	108	58	124	55	117	55
A	166	81	189	45	130	63	143	60	N	101	56	110	17	65	48	114	27
Mai	209	68	210	49	191	10	158	48	D	143	50	86	15	67	48	117	34
J	88	76	328	63	228	84	108	16	Anné	172		209		177		145	
Jt	64	39	269	86	253	11	127	18	e	6	686	7	517	3	867	5	432

1.1. Les vents du Nord :

Ils présentent un maximum de fréquence en Janvier, Février et un minimum en novembre et septembre. Ils sont associés à d’importantes précipitations quand les perturbations qu’ils accompagnent se sont renforcées lors de leur passage sur la Méditerranée atteignant le sud de l’Algérie.

1.2. Les vents d'Est :

C'est en Juin qu'ils présentent leur maximum de fréquence mais ils règnent sur le domaine Atlasique d'Avril à Septembre.

1.3. Les vents du Sud :

On a longtemps attribué à l'ensemble des vents chauds et secs venus du sud l'appellation commune de Chehili ou de Sirocco.

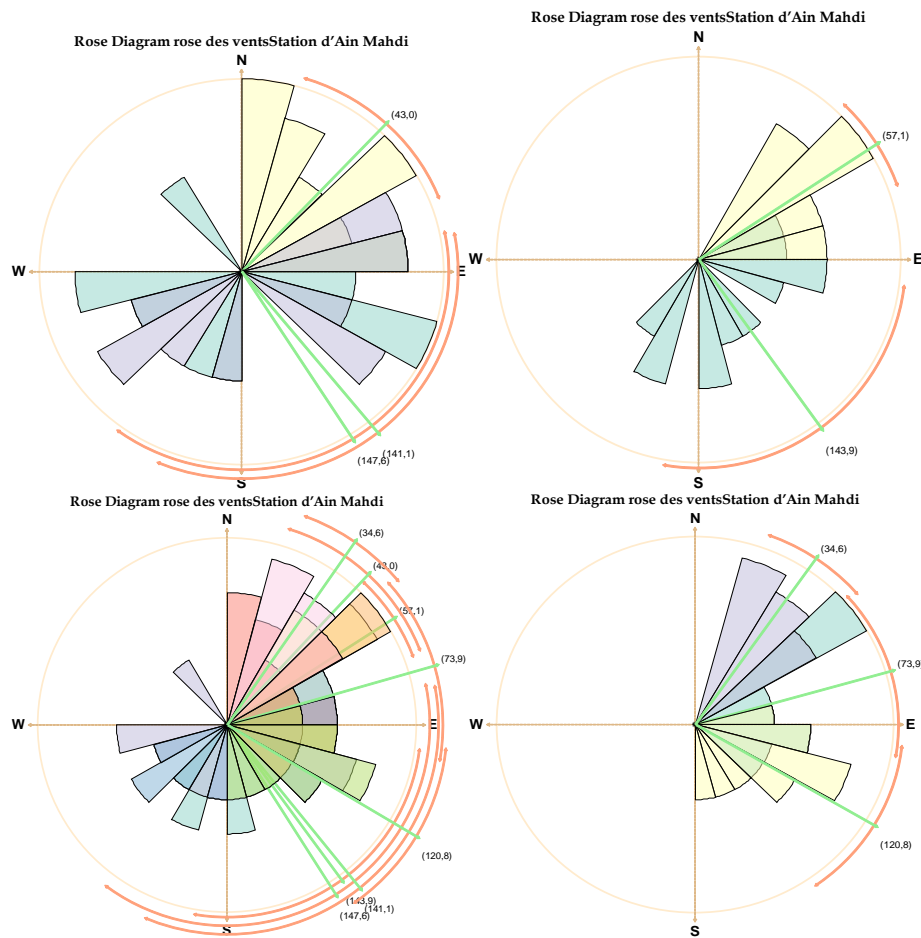


Figure 12: Diagrammes des Roses des vents mensuels Station d'Ain Mahdi (1973 – 1984).

V. ÉTUDE DES PRÉCIPITATIONS

Les données utilisables intéressent 12 stations.

1. Les précipitations mensuelles :

Tableau 8:Précipitations moyennes mensuelles aux diverses stations

Stations	Périodes	J	F	M	A	M	J	JT	AT	S	O	N	D	Année
Aflou (moy)	1913-38	31	31,9	37,6	30,5	25	24,6	11,1	12,2	23,8	30,9	28,8	30,9	325,4
Ain Madhi	1968-1989	7,68	6,67	17,44	14,35	17,43	12,67	3,09	5,21	34,34	18,52	15,52	8,52	161,4
El - Ghicha	1968-1989	10,68	5,10	16,56	6,72	10,24	5,98	1,86	2,74	23,86	12,28	18,52	11,91	126,9
Tadjmout	1980-1986	15,5	12,1	14,0	9,8	21,0	10,0	5,0	10,0	32,8	14,20	6,90	8,2	159,5
Oued Morra	1979-1980	12,5	19	59	33	41	pdp	pdp	pdp	26	33,5	9	9	235
Ksar Hirane	1980-1986	1,0	14,10	10,7	13,0	15,6	4,1	1,5	2,3	12,4	13,1	9,0	3,1	100
Laghouat	1980-1986	14,10	10	13	9,5	18,4	8,8	3,8	6	22,5	17	9,6	16,7	149,4
Seklafa	1971-1989	8,7	12,7	38,1	21,9	8	15,6	1,3	1,8	14,8	18,3	20,9	7,4	169,6

Tableau 9:Précipitations mensuelles pour les deux périodes (13/38 et 13/53)

STATION		J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	moyenne annuelle
AFLOU	moyenne de SELTZER (1913-1938)	31	33	38	32	28	28	9	11	24	25	30	33	322
	moyenne de 40 ans (1913-1953)	30	26	24	39	30	17	6	21	43	30	24	42	332
TADJMOUT	moyenne de SELTZER (1913-1938)	10	14	17	9	14	19	4	9	19	23	18	16	172
	moyenne de 40 ans (1913-1953)	9	11	17	14	16	14	7	10	25	21	13	20	177
LAGHOUAT	moyenne de SELTZER (1913-1938)	12	12	11	12	19	12	5	7	23	17	18	14	162
	moyenne de 40 ans (1913-1953)	10	12	17	14	19	12	5	10	26	19	16	16	176

Tableau 10: Précipitations moyennes annuelles

Stations	Altitudes en m	SELTZER 1913-1937	MEDINGER 1913-1953	S.C.E.T.Coop 1950-1961	1960-1980	1979-1980
Aflou mairie	1406	342	332	357	312	339
Aflou hydraulique	1400				284	348
Oued Morra	1304					235
Seklafa	1233				173	178
El Ghicha	1160				129	266
Tadmit	1040		243	232		
Aïn Medhi	985				163	164
El Houita	900				114	122
Tadjmout	894	172	177	192	164	131
Sidi Makhlof	886				161	71
Laghouat	765	167	176	172	151	184
Ksar El Hirane	716				107	136

2. Comparaison de la pluviométrie moyenne à différentes périodes (fig. 13, 14, 15) :

La répartition de la pluviométrie mensuelle moyenne mesurée sur différentes périodes montre que d'une période à l'autre il existe des différences entre les stations météorologiques.

- **A la station de Laghouat** : la pluviométrie mensuelle varie entre 5 mm (juillet) et 19 mm au mois de Mai avec une moyenne annuelle de 162 mm. On observe les mêmes variations pour la période 1980-86 avec un minimum au mois de juillet 3,8 mm et un maximum au mois de janvier 22,53 mm pour une moyenne annuelle légèrement plus faible par rapport à la précédente (149,4 mm).

- **A la station de Tadjmout** : la pluviosité varie entre 5 mm (juillet) et 14,2mm (octobre) avec une moyenne annuelle de 159,5 mm la pluviosité varie de 32,80 mm (septembre) à 5 mm (juillet).

- **A la station d'Aflou** : Pour la période de SELTZER, les mois les plus pluvieux sont Octobre (30,9 mm) et Mars (25 mm), les plus secs s'observent en Juillet (11,1mm) et Août (30,9mm) pour une moyenne annuelle de 325,4mm.

Au total, on peut observer au Sahara deux maxima de printemps et d’automne et deux minima d’hiver et d’été. La prédominance de l’un ou de l’autre de ces maxima varie avec le temps et en fonction de la latitude, plus proche de l’hiver au Nord et de l’été au Sud.

Dans les régions très arides il sera difficile de préciser la distribution du régime climatique. Dans les régions méridionales de l’Atlas, les influences méditerranéennes entraîneront un maximum pluvial d’hiver peu accusé, tandis que se développera un maximum d’été ou de fin de printemps lié aux dépressions sahariennes et à la mousson Soudano – Saharienne.

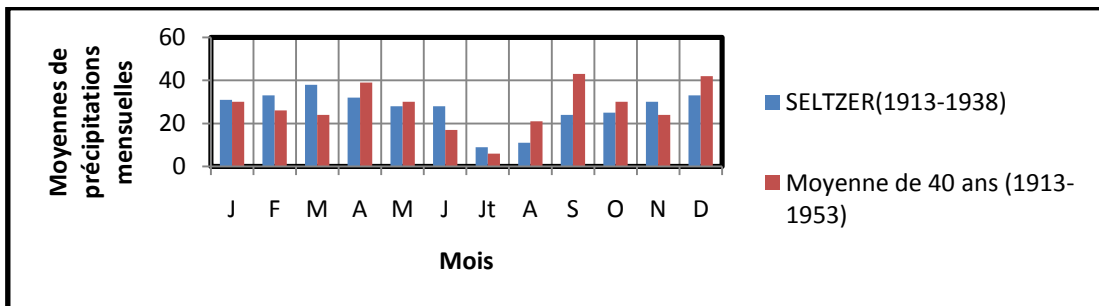


Figure 13: Moyennes mensuelles à la station météorologique d'AFLOU

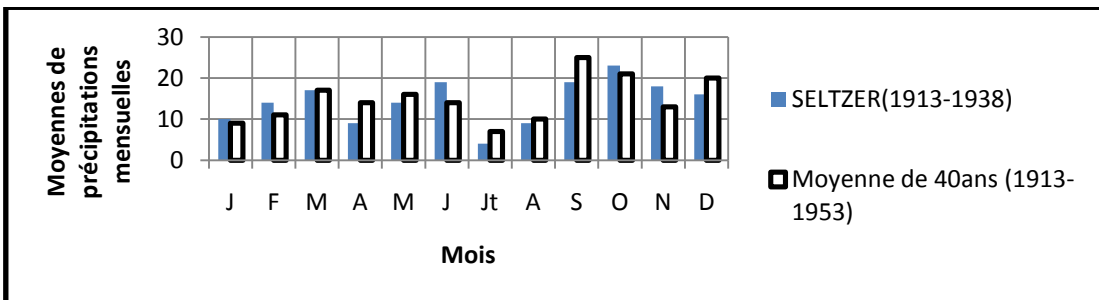


Figure 14: Moyennes mensuelles à la station météorologique de Tadjmout.

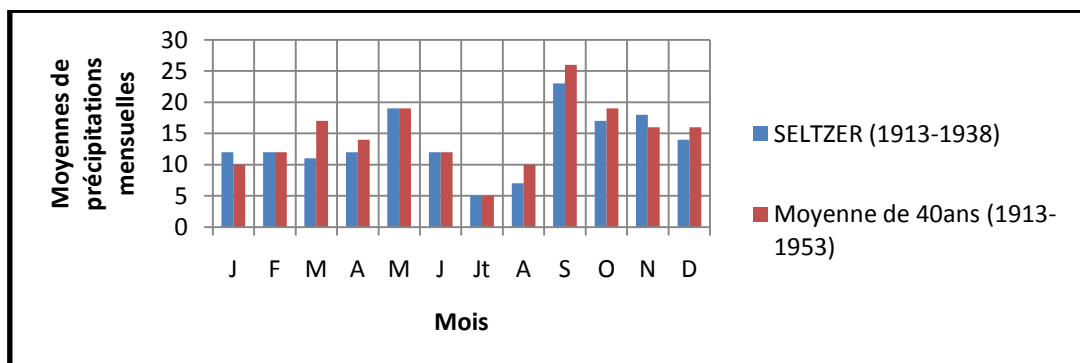


Figure 15: Moyennes mensuelles à la station météorologique de Laghouat

3. Les précipitations annuelles

Les données dont nous avons pu disposer sont très hétérogènes, aussi bien en raison des périodes de fonctionnement des diverses stations que des conditions d'installations des appareils ou des prises de relevés. Les éléments dont nous avons pu disposer intéressent quatre stations dont certaines présentent de nombreuses lacunes d'observations.

Tableau 11:PRECIPITATIONS OBSERVEES AU NIVEAU DES SIX STATIONS (1969/1993)

ANNÉE S	SEKLAF A	EL GHICHA	TAOUIAL A	BRID A	ANNÉE S	SEKLAF A	EL GHICHA	TAOUIAL A	BRID A
1969	116.2	107.5	143.3	180.2	1982	116.2	107.5	164.8	122.2
1970	116.2	80.9	143.3	119.7	1983	118.1	107.5	133.8	122.2
1971	156.7	107.5	131.8	162.0	1984	85.6	107.5	154.3	122.2
1972	122.4	107.5	142.9	146.9	1985	130.7	139.1	146.3	121.2
1973	165.8	107.5	144.8	127.6	1986	115	107.5	159.6	123.6
1974	130.3	107.5	147.4	141.7	1987	82	93.8	151.8	89.1
1975	153	102.2	142.0	122.2	1988	52.4	133.6	143.3	89.8
1976	129	93.1	184.5	122.2	1989	114.8	107.5	143.3	115.1
1977	79	91.1	96.7	122.2	1990	106	107.5	143.3	115.6
1978	114.2	91.9	135.9	121.3	1991	143.4	107.5	143.3	137.8
1979	135.4	150.5	143.0	133.8	1992	102	79.8	143.3	77.2
1980	120	135.3	167.1	120.1	1993	84.6	98.2	143.3	90.5
1981	116.2	107.5	90	122.2					

3.1.Variation de la pluviométrie annuelle (fig. 16, 17)

La comparaison des moyennes pluviométriques des stations Seklafa-el Ghicha-Taouiala-Brida pour les différentes périodes d'observations montre qu'elles sont équivalentes et qu'il n'y a pas eu de changement notable dans le climat.

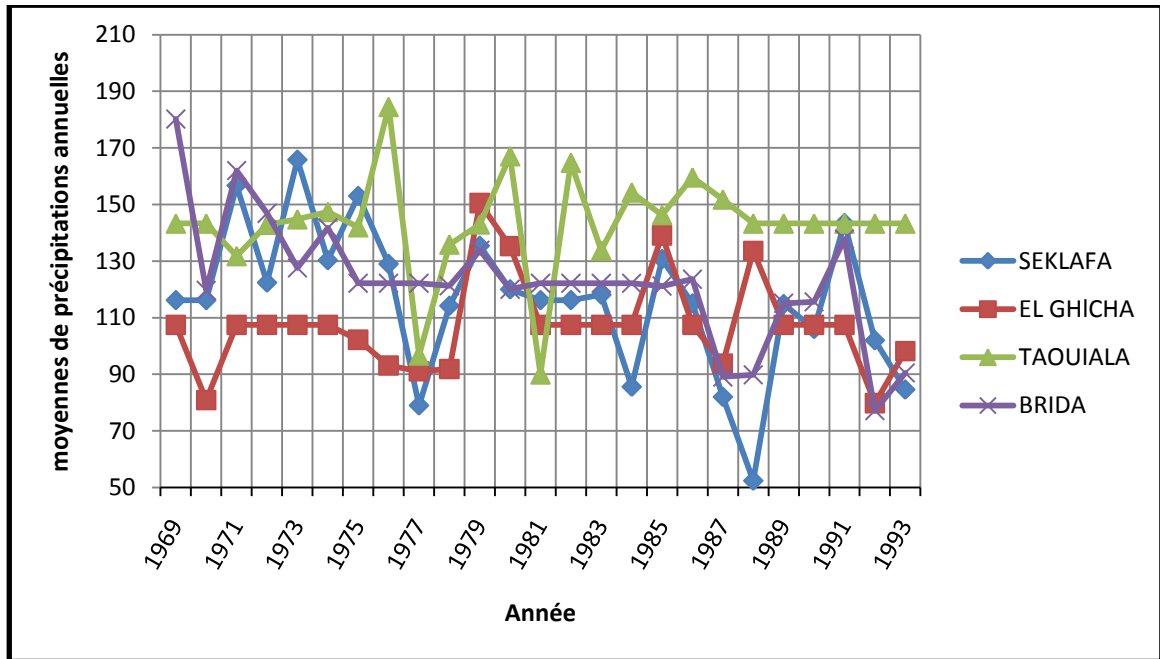


Figure 16: Précipitations moyennes annuelles aux stations météorologiques période 1913-1938 (SEKLAF-EL GHICHA-TAOUIALA-BRIDA)

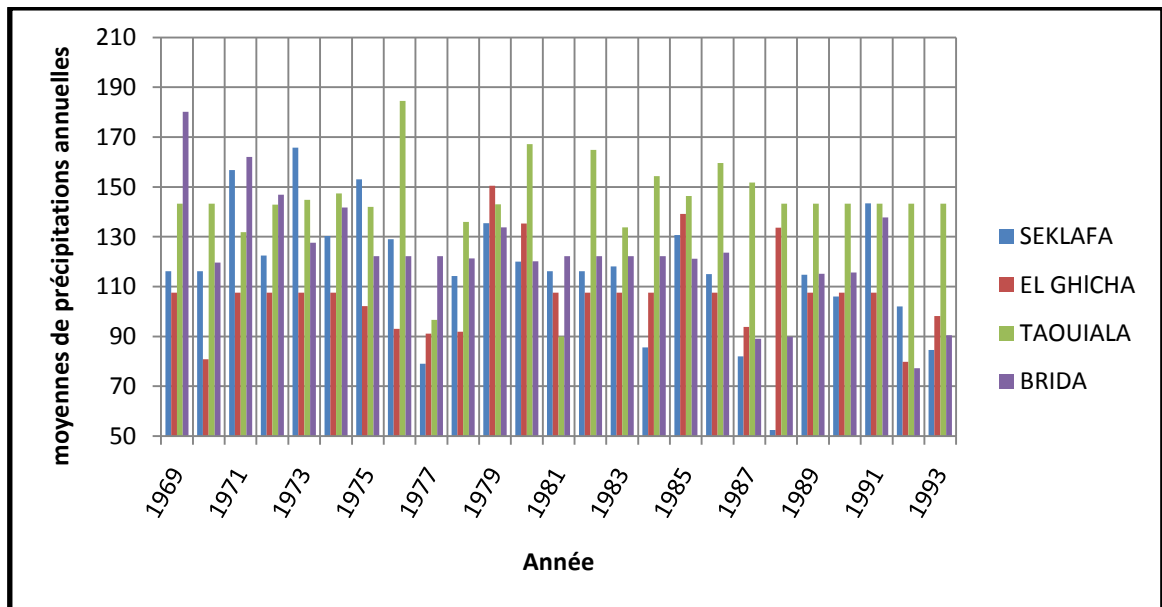


Figure 17: Comparaison des précipitations annuelles

La répartition de la pluviométrie moyenne annuelle, calculée à différentes périodes montre une légère diminution pour les périodes récentes. A première vue, cette diminution va dans le sens des observations réalisées par SELTZER qui estimait qu'entre 1913-1938, le climat algérien avait évolué par rapport à la période précédente. Pour le Djebel Amour on remarque cette même diminution durant les différentes périodes à l'exception de celle allant de 1951-1960 qui nous paraît plus humide.

Tableau 12: précipitations annuelles (1990-2011)

ANNÉES	SEKLAFA	Laghouat	Ain Madhi	Tadjmout	ANNÉES	SEKLAFA	Laghouat	Ain Madhi	Tadjmout
1990	116	112	195,6	201,4	2001	138,4	95,2	91,9	71,5
91	205,1	178	186,7	226,9	2002	81	101,4	61,2	171,4
92	109,32	102	67	128,3	2003	266,8	148,2	271	171
93	70,7	65	81,5	92	2004	98,1	228,4	91,3	170,3
94	263	119	248,7	257,5	2005	223,5	121,9	242,6	245,5
95	317,9	121	266,3	299,5	2006	172,04	251,2	192,4	281,4
96	159,1	180,9	158,4	140,6	2007	121,02	91,4	84	99
97	193,3	236,7	190	86,8	2008		180		
98	198,3	62,7	106,3	179,4	2009		159,7		
99	119,7	251,3	145,8	35,7	2010		137,7		
2000	106,4	80,9	68,9	130,3	2011		148,7		

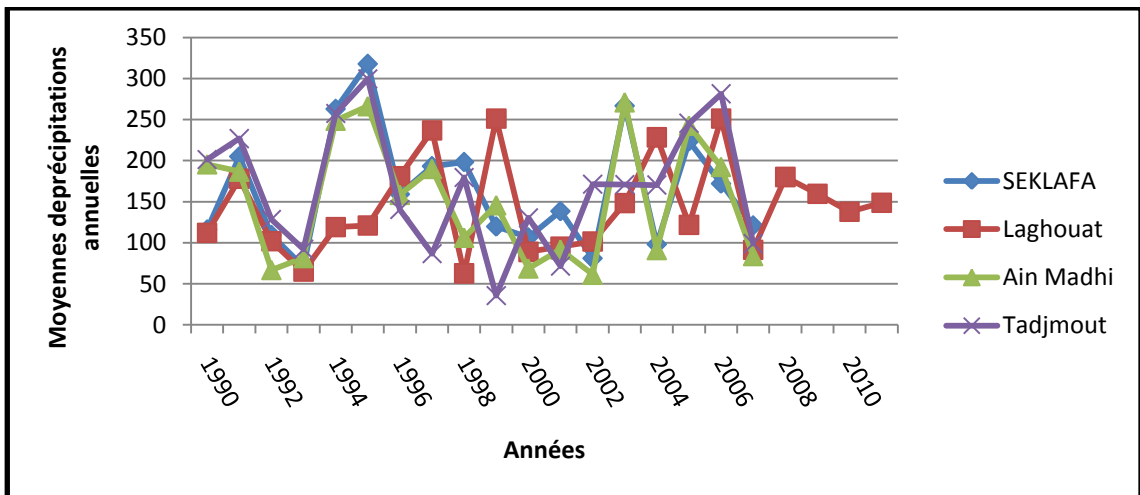


Figure 18: Comparaison des précipitations annuelles

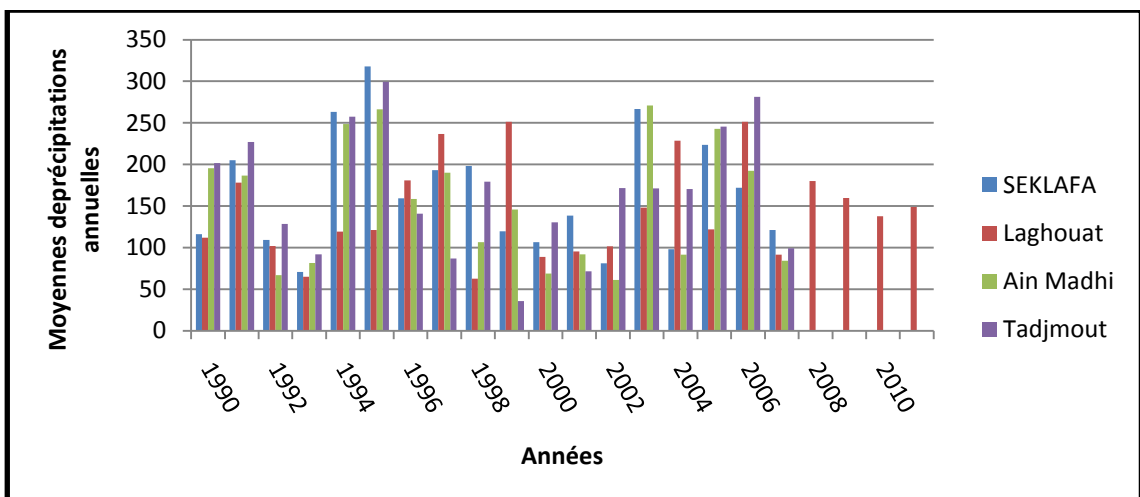


Figure 19: Comparaison des précipitations annuelles

Tableau 13: Répartition des précipitations en fonction de l'altitude

Stations	Précipitations	Altitudes	Latitudes	Longitudes
Tadjrouna	45,83	906	33°29'53''	2°6'12''E
Ksar Hirane	100	719	33°47'42''	3°8'50''E
El-Houiatata	111,48	900	33°38'45''	2°27'08''E
El-Ghicha	126,9	1160	33°55'48''	2°08'54''E
Laghouat	149,4	765	33°46'	2°56'E
A. Mahdi	161,4	985	33°47'42''	2°17'32''E
Sidi Makhlouf	162,08	886	34°7'41''	2°55'59''E
Seklafa	169,6	1233	33°59'51''	2°21'3'E
Tadjmout	159,5	894	33°52'34''	2°31'39''E
Taouiala	208,45	1257	33°52'1''	2°48'19''E
Brida	215,88	1400	33°56'56''	1°45'6''E
O. Morra	235	1304	34°9'34''	2°19'9''E
Aflou	325,4	1406	34°6'46''	2°6'08''E

D'après les données du tableau N° 13, la relation pluie/altitude est liée aux mécanismes des ascendances orographiques. Il n'existe pas de gradient simple. Les stations sont réparties exclusivement en fonction de l'altitude. Les effets d'autres paramètres peuvent se faire sentir comme la latitude.

3.2. Étude statistiques des précipitations

3.2.1. Ajustement à la loi normale

Nous avons pris en considération les données de la station de Laghouat pour la période 1990-2011 (tableau n° 14).

Tableau 14: Précipitations moyennes mensuelles 1990-2011 (station de Laghouat)

Année	P. (mm)	Année	P(mm)	Année	P(mm)	Année	P(mm)
1990	112	1996	180,9	2002	101,4	2008	180
1991	178	1997	236,7	2003	148,2	2009	159,7
1992	102	1998	62,7	2004	228,4	2010	137,7
1993	65	1999	251,3	2005	121,9	2011	148,7
1994	119	2000	80,9	2006	251,2		
1995	121	2001	95,2	2007	91,4		

- Calcul des caractéristiques empiriques

- Moyenne : $\bar{X}_i = \frac{\sum X_i}{N}$ ou X_i valeurs de l'échantillon et N = longueur de l'échantillon

Alors : $\bar{X}_i = \frac{3181,3}{21} \leftrightarrow \bar{X} = 151,49$

- Variance : $s^2 = \frac{\{\sum X_i^2 - N\bar{X}^2\}}{N-1}$

Donc : $s^2 = \frac{\{530163,77 - 21 \times 22949,36\}}{20} \leftrightarrow s^2 = 3558,82$

Écart-type : $S = \sqrt{s^2} \leftrightarrow S = 59,66$

- Coefficient de variation : $C_v = \frac{s}{\bar{X}} \leftrightarrow C_v = \frac{59,66}{3181,3} \leftrightarrow C_v = 0,02$

Tableau 15: Paramètres d'ajustement

Pluies mesurées	Pluies classées	Rang	FND	$Z_i = \frac{p_i - \bar{p}}{s}$
112	62,7	1	0,023	-1,402
178	65	2	0,068	-1,362
102	80,9	3	0,114	-1,089
65	91,4	4	0,159	-0,908
119	95,2	5	0,205	-0,843
121	101,4	6	0,250	-0,736
108,9	102	7	0,295	-0,726
236,7	112	8	0,340	-0,555
62,7	119	9	0,386	-0,554
251,3	121	10	0,432	-0,434
80,9	121,9	11	0,477	-0,399
95,2	137,7	12	0,523	-0,383
101,4	148,2	13	0,568	-0,112
148,2	148,7	14	0,614	0,068
228,4	159,7	15	0,655	0,076
121,9	178	16	0,705	0,580
251,2	180	17	0,750	0,615
91,4	180,9	18	0,795	0,630
180	236,7	19	0,841	1,447
159,7	228,4	20	0,886	1,589
137,7	251,2	21	0,932	1,838
148,7	251,3	22	0,977	1,840

Pour tracer la droite de Henry ou droite théorique, sur papier millimétré on porte deux points par lesquels passe la droite et pour lesquels on choisit arbitrairement les abscisses $Z_1 = -1$ et $Z_2 = +1$

- Soit $P_1 = \bar{p} + z_1 = 151,49 - 59,66 = 91,83 \text{ mm}$

- et $P_2 = \bar{p} + z_2 = 151,49 + 59,66 = 211,15 \text{ mm}$

Sur papier de probabilité on choisit :

- $FND1 = 0,2$ et $FND2 = 0,9$

Sur la table de Gauss on obtient :

- $Z_1 = -0,84$ et $Z_2 = 1,28$

D'où

- $P_1 = \bar{p} + z_1 = 151,49 - (59,66 \times -0,84) = 201,60 \text{ mm}$

- $P_2 = \bar{p} + z_2 = 151,49 + (59,66 \times 1,28) = 227,85 \text{ mm}$

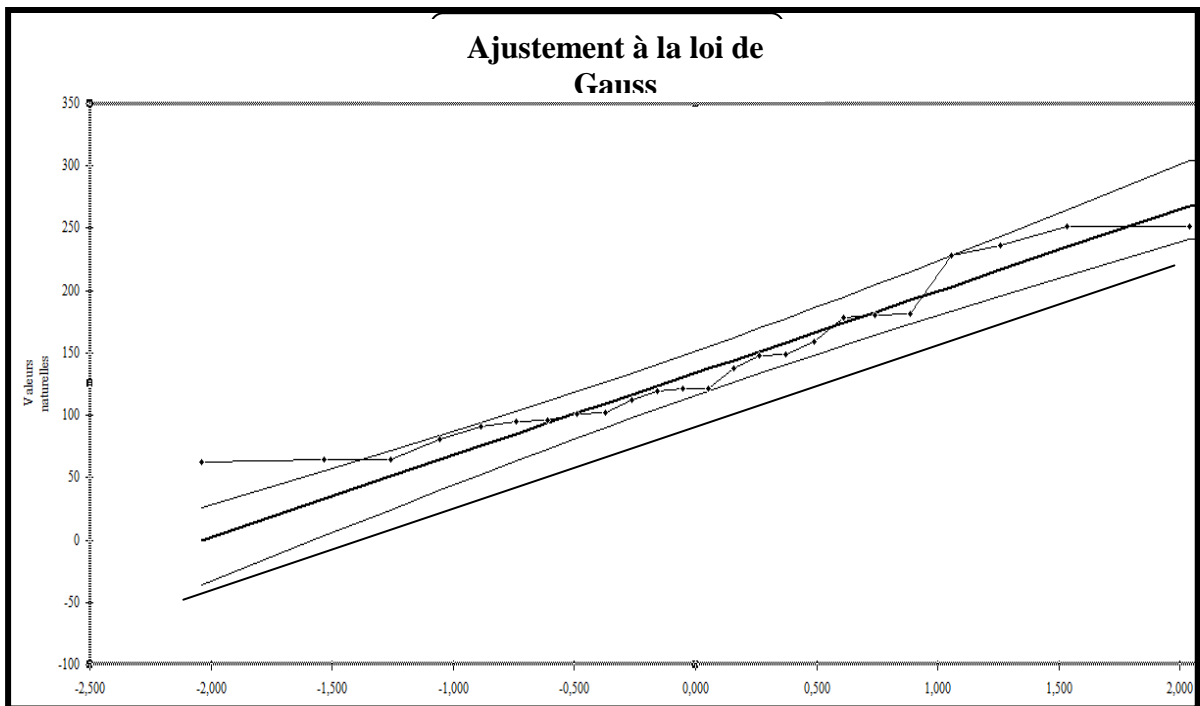


Figure 20:Ajustement à la loi de Gauss

3.2.2. Test du K_i deux

On essaye de voir si la loi normale avec une moyenne de 151.49 mm et un écart type de 59.66 mm s'ajuste à notre échantillon précipitations moyennes annuelles à la station de Laghouat à un seuil de signification de 0,05.

« K_i deux » calculé = 10,31 et le « K_i deux » tabulé = 15,51

K_i deux calculé est plus petit que le K_i deux donné par la table, on conclut que le K_i deux calculé est situé dans la zone favorable et qu'il a 95% de chances que la loi normale choisie s'ajuste à notre échantillon.

$\alpha = 0,95$ $\frac{1-\alpha}{2} = 0.025$

$0,5 - 0,025 = 0,475$

Pour 0,475 la table de Gauss donne $Z(1 - \alpha)/2 = 1,96$

Pour la moyenne - $119,92 < \mu < 168,55$

Pour l'écart type - $40,99 < \mu < 75,37$

Tableau 16: TABLEAU N° 16: Paramètres de calcul du X2

N°	B,sup Xi-1	B,inf Xi	Variance Zi-1	Variance Zi	FNDi-1	FNDi	foi	fti	X ² i
1		65		-1,36	0	0,087	1	1,91	0,43
2	65	85	-1,36	-1,02	0,087	0,154	2	1,5	0,16
3	85	105	-1,02	-0,67	0,154	0,251	4	2,13	1,64
4	105	125	-1,67	-0,33	0,251	0,37	4	2,61	0,74
5	125	145	-0,33	0,01	0,37	0,504	1	2,94	1,28
6	145	165	0,01	0,36	0,504	0,54	3	2,99	0,00004
7	165	185	0,36	0,7	0,64	0,758	3	2,59	0,064
8	185	205	0,7	1,04	0,758	0,85	0	2,02	2,02
9	205	225	1,04	1,38	0,85	0,916	0	1,45	1,45
10	225	245	1,38	1,73	0,916	0,958	2	0,92	1,26
11	245	265	1,73		0,958	1	2	0,92	1,26
									X ² =10,31

Comme le X² calculé est plus petite que celui donnée par la table, on en conclut que le X² calculé est située dans la zone favorable et qu'il y a 95% de chances que la loi normale choisie s'ajuste à notre échantillon (ajustement appréciable).

1.1.1. *Intervalle de confiance*

On peut théoriquement tirer plusieurs échantillons à partir d'une population donnée. Chaque échantillon aura sa propre moyenne et son propre écart type.

L'échantillon constitué des différentes moyennes $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{20}$ suit une loi de Gauss. La moyenne de cet échantillon ou moyenne des moyennes est égale à x déterminé à partir de l'échantillon réel que nous possédons. L'écart type de cet échantillon est égale à $\frac{s}{\sqrt{N}}$ (s= écart type de notre échantillon). $\frac{s}{\sqrt{N}}$ est l'écart type moyen entre la vraie moyenne et les différentes moyennes $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{20}$. On l'appelle l'erreur type sur la moyenne.

De la même manière, l'échantillon constitué des différentes variances s_1, s_2, \dots suit une loi de Gauss qui a pour moyenne s^2 (calculé d'après notre échantillon) et pour écart type $\frac{s}{\sqrt{2N}}$ qui est appelé l'erreur type sur la variance.

Dans notre cas, $\alpha=0.95$, soit $(1-\alpha)/2=0.025$. il y a lieu de connaître $z_{(1-\alpha)/2}$ la table de Gauss, qui donne la surface sous la courbe entre 0 et z , est utilisée. Nous avons la surface $(1-\alpha)/2=0.025$ qui va de z à $+\infty$. Pour avoir la surface de 0 à z , qui vaut donc $\alpha/2$, on doit retrancher 0.025 de .05, c'est-à-dire $0.5-0.025=0.475$. pour 0.475 la table de Gauss donne $z_{(1-\alpha)/2}=1.96$.

On connaît $p_{moy} = 151.59$ mm et $s=59.66$ mm, on applique les formules pour trouver les intervalles de confiance de μ et σ .

- pour la **moyenne**:

$$\bar{x} - z_{\frac{1-\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{N}} < \mu < \bar{x} + z_{\frac{1-\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{N}}$$

$$151.49 - 1.96 \frac{59.66}{\sqrt{21}} < \mu < 151.49 + 1.96 \frac{59.66}{\sqrt{21}}$$

$$126 < \mu < 177$$

- pour l'**écart type**:

$$s - z_{\frac{1-\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{2N}} < \sigma < s + z_{\frac{1-\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{2N}}$$

$$59.66 - 1.96 \frac{59.66}{\sqrt{42}} < \sigma < 59.66 + 1.96 \frac{59.66}{\sqrt{42}}$$

$$41.6 < \sigma < 77.7$$

Pour calculer l'intervalle de confiance de la pluie maximale journalière à Laghouat, il faut tout d'abord calculer la p_{50} . Pour cela, on utilise l'équation de la droite de Henry:

$p_{50} = \bar{p} + z_{50}.s$. La période de retour étant $T=50$ ans, d'où $FD = 1/T = 1/50=0.02$, on a $FND= 1-0.02 = 0.98$.

La table de Gauss donne alors $z=z_{50}=2.05$ et on trouve:

$$p_{50} = 151.49 + 2.05 \times 59.66 = 273.79 \text{ mm}$$

Pour calculer l'intervalle de confiance (IC), on utilise la formule:

$$x_p - z_{\frac{1-\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{2N}} \sqrt{2 + z_p^2} < x_p < x_p + z_{\frac{1-\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{2N}} \sqrt{2 + z_p^2}$$

$$273.79 - 1.96 \frac{59.66}{\sqrt{42}} \sqrt{2 + 2.05^2} < x_p < 273.79 + 1.96 \frac{59.66}{\sqrt{42}} \sqrt{2 + 2.05^2}$$

$$228.98 \text{ mm} < x_p < 318.6 \text{ mm}$$

4. lame d'eau tombée sur le bassin

L'analyse des pluies sur une zone d'étendue variable, de quelques kilomètres carrés, pour l'étude de notre bassin versant nécessite l'étude des relevés aux différents postes pluviométriques du bassin. On part de la pluie ponctuelle et on admet que celle-ci est représentative de celle tombée sur une zone plus ou moins étendue autour de la station.

La légitimité de cette hypothèse dépend :

1. Des caractéristiques météorologiques de l'averse
2. De la topographie de la région

Cependant on va utiliser pour le calcul de la moyenne pluviométrique de notre secteur d'étude les méthodes suivantes :

- La moyenne arithmétique
- La méthode Theissen
- La méthode des deux axes

4.1. La moyenne arithmétique

Une simple moyenne arithmétique de « n » postes intéressant une superficie « S » peut être une estimation valable de la lame d'eau tombée sur S, si le réseau est à la fois dense et bien réparti et si la pluviométrie est homogène.

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

Avec: P_i = précipitation au poste i, n = nombre total des postes pluviométriques.

Tableau 17: Précipitations moyennes annuelles aux différentes stations

Stations	SEKLAFa	Laghout	Ain Madhi	Tadjmout
Pi	174,10	151,49	161,74	175,79

$$\bar{P}_{moy} = \frac{174.1 + 151.49 + 161.74 + 175.79}{4} = 165,69$$

Cependant cette méthode peut donner des résultats médiocres, même dans une région de pluviosité homogène, car une averse particulière peut avoir une distribution spatiale hétérogène.

4.2. Méthode de Theissen

C'est une méthode arithmétique dans laquelle on attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à une zone d'influence définie géométriquement (fig. 21). Cette méthode ne tient compte que de la distribution spatiale en plan des stations pluviométrique. Elle ne tient compte ni de la topographie, ni d'autre facteurs qui pourraient influencer la distribution spatiale de la pluie.

Tableau 18:facteurs de calcul (méthode de Thiessen)

localité	Altitude en m	POINT_X	POINT_Y	Superficie en Km ²	Précipitaton	S x P
EL GHICHA	1159	2,15	33,93	562,36	126,9	71363,2302
TADJMOUT	883	2,53	33,87	1500,51	159,5	239331,345
SEKLAFI	998	2,35	34,00	482,05	169,6	81755,68
AIN MAHDI	980	2,30	33,79	1386,47	161,4	223776,258
OUED MORRA	1306	2,32	34,17	592,49	235	139234,68
LAGHOUAT	762	2,88	33,80	1572,63	149,4	234950,922
KSAR EL HIRANE	722	3,15	33,79	758,38	100	75838,4
SOMME				6854,89	1101,80	1066250,52

$$\bar{P} = \frac{P_a S_a + P_b S_b + \dots + P_n S_n}{S}$$

$$\bar{P} = 155.5 \text{ mm}$$

La délimitation par les médiatrices inter-postes est bonne; par contre, en zone de pluviosité non homogène, la densité des postes doit être telle que les zones d'influence déterminées par les médiatrices sont suffisamment petites pour pouvoir être considérées comme homogènes du point de vue de la pluviosité.

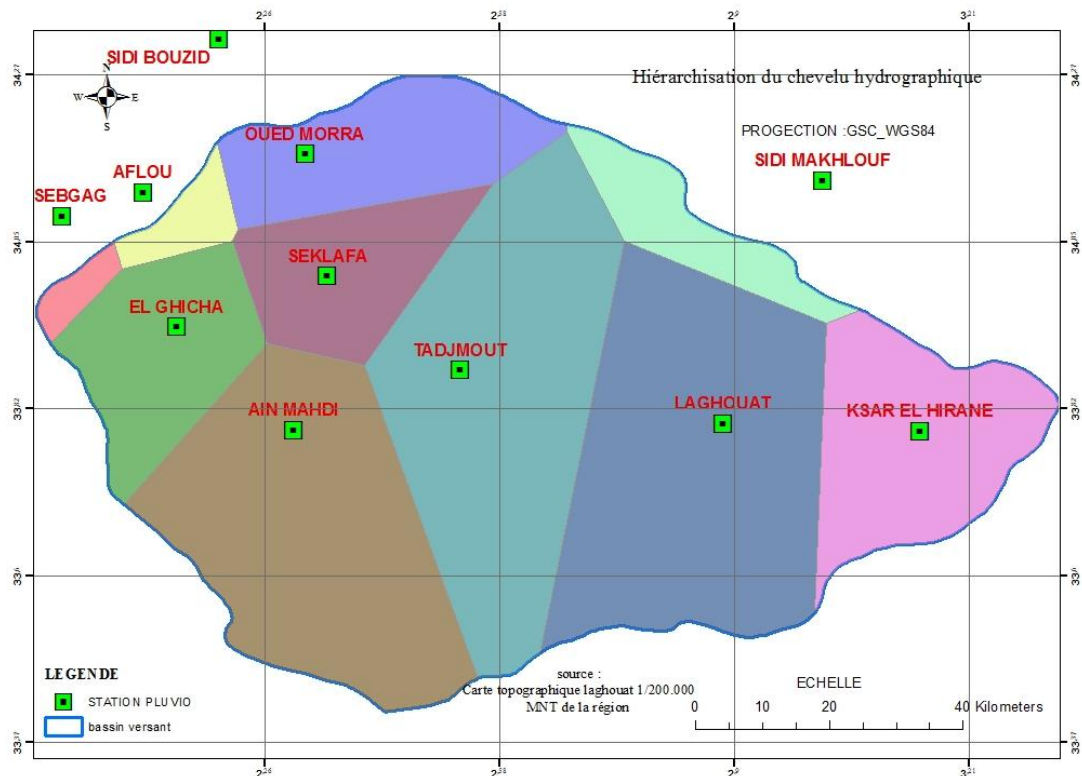


Figure 21:Représentation des polygones par la méthode de Thiessen

VI. ÉTUDE DES TEMPÉRATURES

La température est un facteur important conditionnant l'estimation du déficit d'écoulement. Nous avons pu disposer de données de la température afférant à la station météorologique de Laghouat pour les deux périodes : 1913-1938 et 1969-1991.

1. Températures mensuelles moyennes : (fig. 22)

L'amplitude maximale des températures mensuelles moyennes interannuelles s'observe dans les stations entre le mois de Juin et Juillet avec un maximum au mois de juillet (36°C). Le minimum s'observe au mois de janvier 12,5°C.

Tableau 19:Températures minimums, maximums et moyennes de la station météorologique de Laghouat (1913-1938)

Laghouat 1913-1938	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moy année
Min	17	12	5,9	3,1	2,3	3,6	6,5	9,4	13	18	21	20,4	11
Max	30	24	17	13	13	15	18	23	26	32	36	35,2	23,5
Moy	23	17	11	8,1	7,4	9,4	12	16	20	25	29	27,8	17,25

Tableau 20:les températures minimums, maximums et moyennes de la station météorologique de Laghouat période 1969-1991

Laghouat 1969-1991	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moy année
Min	16	11	5,05	2,7	1,5	4,2	5,5	8,4	13	18,2	21	20	10,59
Max	30	23	16,4	12	13	15	18	20	26	32,2	36	35	23,15
Moy	23	17	10,7	7,8	7,2	9,4	12	14	18	25,2	29	28	16,87

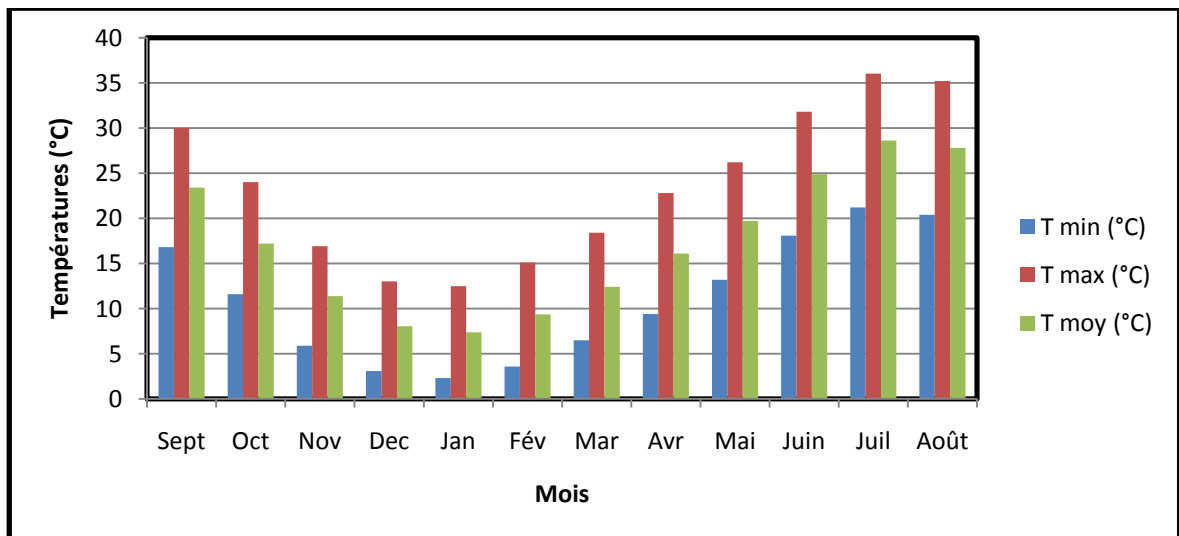


Figure 22: Variations mensuelles des températures à la station de Laghouat

VII. RÉGIME CLIMATIQUE DE LA RÉGION DE LAGHOUAT

Partant de deux paramètres, température et précipitations moyennes annuelles, il est possible de calculer un certain nombre d'indices permettant de caractériser le climat de la région de Laghouat. Les méthodes possibles sont nombreuses :

1. Représentation graphique :

1.1. Courbes pluviométriques de Gausсен et Bagnols: (Fig. 23)

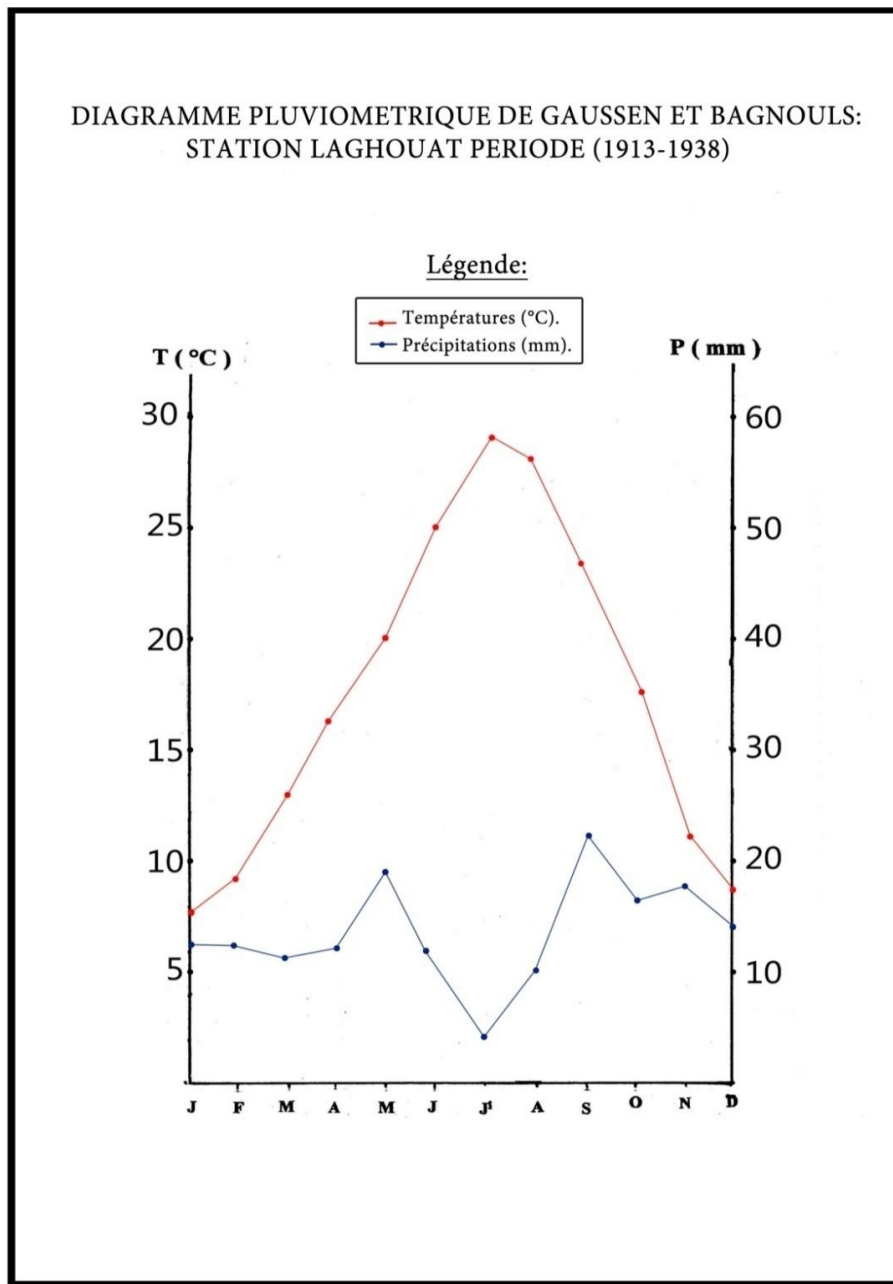


Figure 23: Diagramme pluviométrique de Gausсен et Bagnols

En A et B, les deux courbes (P) et (T) se superposent, donc au niveau de ces points les besoins en eaux sont couverts. Lorsque la courbe (P) passe en dessus de la courbe (T) on aura une période humide appelée aussi période excédentaire. Par contre si la courbe des précipitations (P) se trouve au - dessous de celle des températures (T), la période correspondante est déficitaire et la différence des abscisses nous donne la durée de la période de sécheresse. Dans notre cas les deux courbes ne se recoupent pas (fig. 23).

1.2. Courbes ombrothermiques d'Euverte (fig. 24)

Cette méthode mise au point par Euverte est fondée sur l'activité biologique des végétaux les besoins en eau suivent une progression logarithmique lorsque la température évolue arithmétiquement, il est possible de tracer un diagramme avec une échelle arithmétique pour les températures et logarithmique pour les précipitations.

Lorsque la courbe des précipitations se trouve au-dessous de celle des températures, la période correspondante est déficitaire ce qui est le cas pour Laghouat.

Si ces méthodes permettent d'atteindre des résultats intéressants en régime méditerranéen, force nous est de reconnaître que leur intérêt est très réduit lorsqu'on a affaire au domaine aride.

Tableau 21: Températures moyennes mensuelles et précipitations à la station de Laghouat (1913_1938)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Moy année
T°C	23,4	17,2	11,4	8,05	7,40	9,35	12,4	16,1	19,7	24,9	28,6	27,8	17,25
P(mm)	23	17	18	14	12	12	11	12	19	12	5	7	162

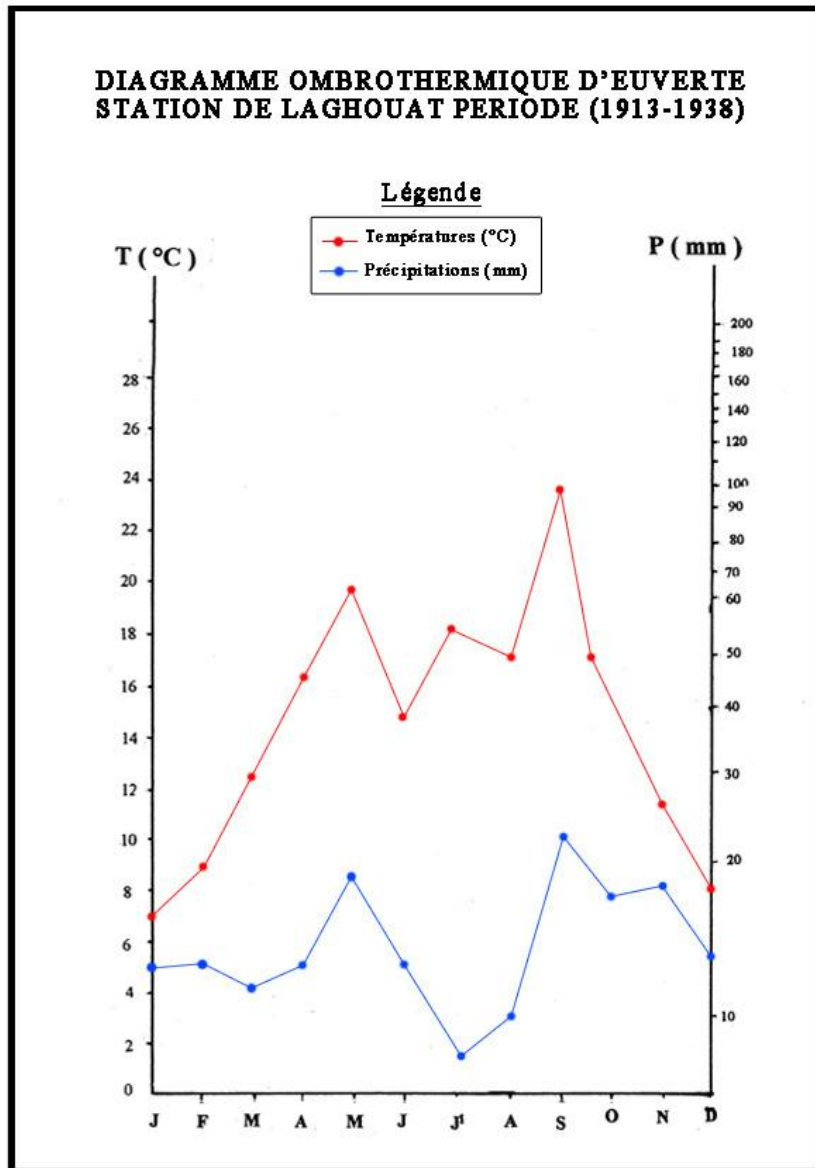


Figure 24: Diagramme ombrothermique d'Euverte station de Laghouat (1913-1938)

VIII. LES PARAMÈTRES CLIMATIQUES :

1. Indice d'aridité annuel selon De Martonne (fig. 25)

De Martonne (1923) a défini un indice d'aridité donné par l'expression :

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

Cet indice permet de préciser le type de climat qui règne sur une région. Dans la formule de cet indice, « P » représente les précipitations moyennes annuelles en mm et « T » la température moyenne annuelle en °C.

- $I_{DM} > 20$ Climat humide (de montagne)
- $10 < I_{DM} < 20$ Climat semi-aride.
- $5 < I_{DM} < 10$ Climat steppique.
- $I_{DM} < 5$ Climat hyperaride.

$$I_{DM} = \frac{162}{17.25 + 10} = 5.94$$

I_{DM} est compris entre 5 et 10, on se situe dans un climat steppique.

Indice D'aridité mensuel de De Martonne

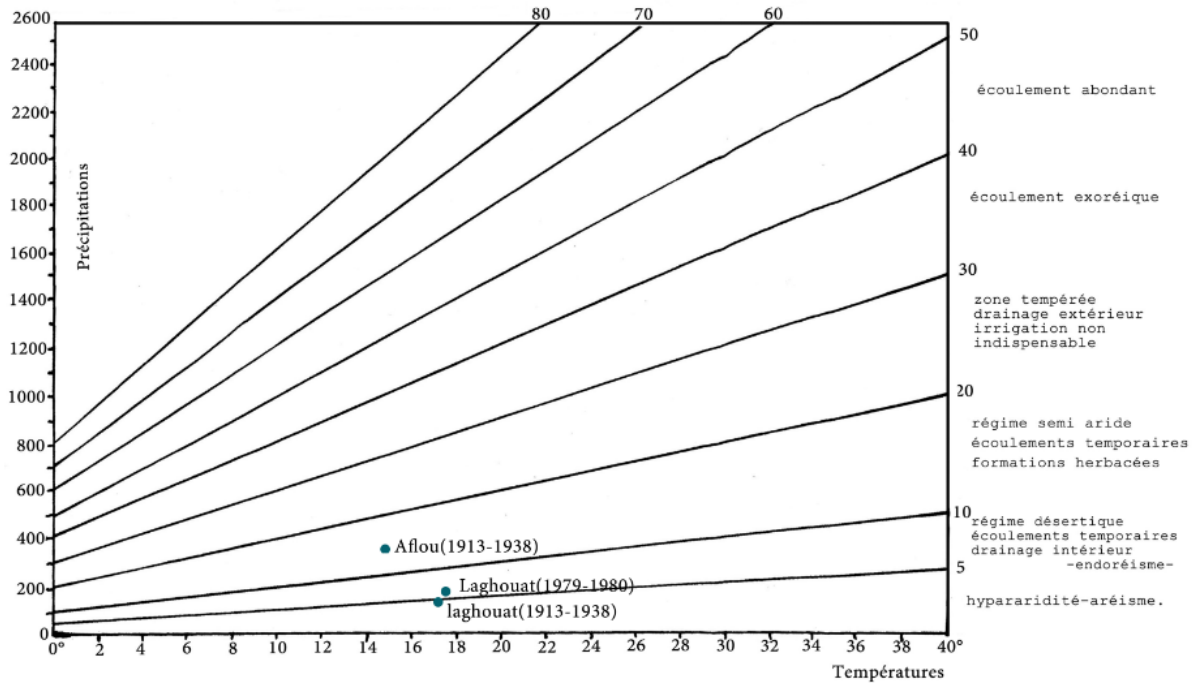


Figure 25: Indice annuel de De Martonne

2. Indice d'aridité mensuel de De Martonne

Pour préciser l'évolution du climat en cours de l'année, les élèves de De Martonne ont proposé d'appliquer la même règle en l'ajustant au cycle mensuel. 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.

Avec :
$$i = \frac{p}{t+10}$$

- p : précipitation mensuelle (mm).
- t : température moyenne mensuelle (°C).

Tableau 22: Indices d'aridité mensuels

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JL	At
Laghouat	8,26	7,5	10,1	9,31	8,23	7,38	5,88	5,52	7,68	4,2	1,55	4,4

La distribution de l'indice climatique mensuel permet de mettre en évidence quatre (04) périodes caractéristiques.

- pour $5 < i < 10$, les précipitations sont encore importantes, mais les températures sont déjà très élevées et le seuil critique est atteint. A Laghouat, le climat est

essentiellement désertique à l'exception de l'été (Juin, Juillet et Août) où le climat est hyperaride.

- A Laghouat en juin, Juillet et Août, nous entrons en régime d'hyperaridité avec $i < 5$, les températures sont très élevées, et les précipitations présentent leurs minimums.

3. L'indice pluviométrique de Moral : (Tableau N° 25)

Paul Moral inspiré par les travaux d'Aubreville tenta d'établir un indice climatique qui correspond aux régions de l'Afrique de l'Ouest. Cet indice permet d'apprécier le degré d'aridité d'une région.

$$IA = \frac{P}{T^2 - 10T + 200} = 0.5$$

IA : Indice pluviométrique annuel, l'indice IA = 1 marque la limite entre l'humidité et la sécheresse.

Avec : P: Précipitations moyennes annuelles en mm =162 mm.

Et : T : Températures moyennes annuelles en °C =17.25°C.

Et à titre de comparaison nous avons représenté au tableau n° 25, les résultats de cet indice pour différentes stations.

Tableau 23: valeurs de l'indice de Moral

Aflou	1,3	Tlemcen	2,1
Laghouat	0,5	Tizi Ouzou	2,62
Ain Mahdi	0,52	Béchar	0,19

4. Indice climatique de L. Emberger (fig. 26)

Considérant qu'à température moyenne égale, l'évapotranspiration est d'autant plus grande que l'écart entre la moyenne des maxima du mois le plus chaud (M) et la moyenne des minima du mois le plus froid (m) est plus élevée, L. Emberger propose de calculer un indice climatique. Pour l'étude du climat méditerranéen, Emberger en 1939, préconisa l'emploi d'un climagramme synthétisant les différents types de climats auxquels sont associés des groupes de végétaux de même aptitude écologique, appelés étages bioclimatiques. Sur l'axe des ordonnées est portée la valeur du quotient pluviométrique (Q₂), qui se calcule par la formule suivante ;

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

$$Q_2 = \frac{162}{\frac{309.15+275.45}{2} (309.15 - 275.45)} 1000 = 16.44$$

Q₂ : quotient pluviométrique d'Emberger

P : moyenne de précipitation annuelle (en mm) = 162 mm

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (en kelvin) = (36+273.15)= 309.15°K

m : moyenne des minima du mois le plus froid (en kelvin)= (2.3+273.15)= 275.45 °k

Où: 1°k = 1°C + 273.15.

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

Tableau 24: valeurs de l'indice d'Emberger

Aflou 34,34	Béchar 6,84
El Bayadh 28,74	Touggourt 4.79
Ain Mahdi 18,27	Beni Abbés 2,7
Laghouat 16,44	

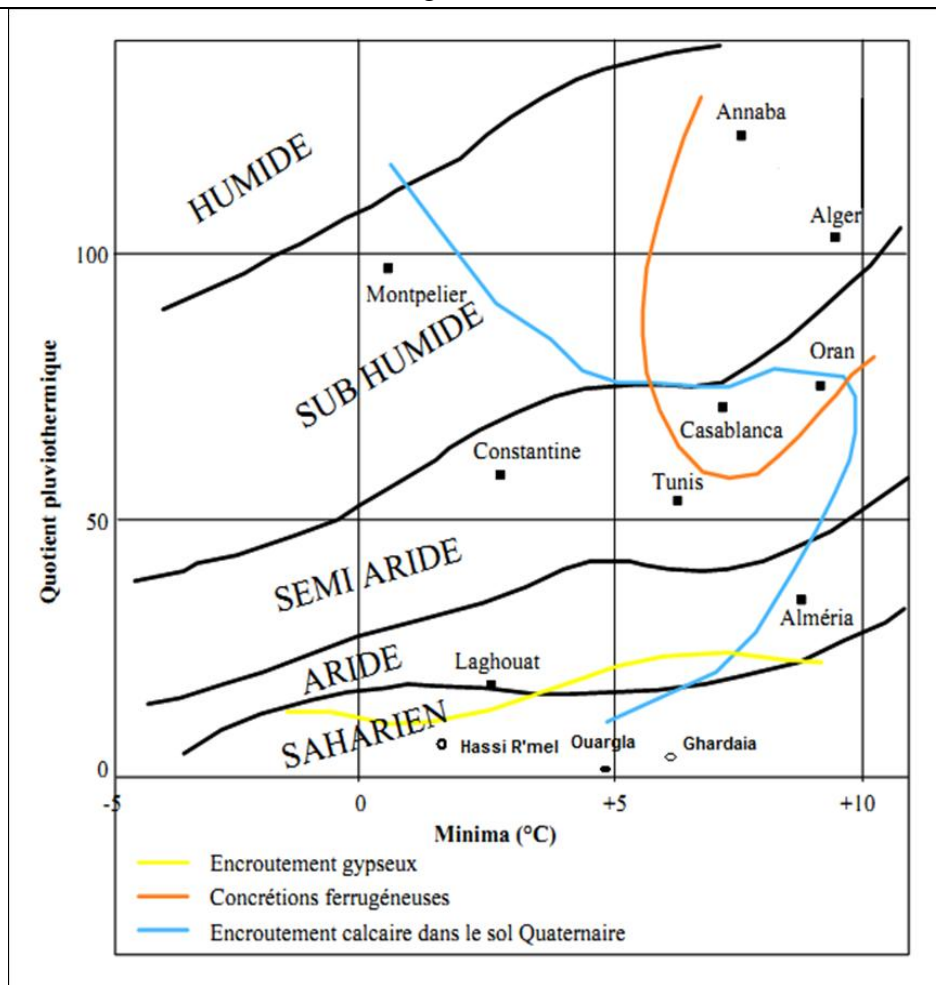


Figure 26: Climagramme d'après L. EMBERGER

5. Méthode de Stewart : (Tableau N° 25)

La formule du Q₂ 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 ;

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

$$Q_2 = 3,43 \left(\frac{162}{309.15 - 275.45} \right) = 16.49$$

Avec P : moyenne des précipitations annuelles (162 mm).

M et m : moyennes des températures extrêmes du mois le chaud et le mois le plus froid en degré absolu.

Pour :

- $10 < Q_2 < 50$ climat semi-aride.
- $Q_2 < 2$ climat désertique.

Tableau 25:valeurs obtenues de l'indice de Stewart

Aflou	35,46
El Bayadh	25,66
Ain Mahdi	14,66
Laghouat	16,49

6. Indice de continentalité de Kerner

Il traduit la continentalité où ce qui revient au même l'influence de la mer.

$$K = \frac{(T_0 - T_a).100}{A}$$

$$K = \frac{(17 - 16).100}{29 - 7} = 4.5$$

- K : indice de continentalité thermique exprimé en % dont la valeur varie de 100% pour un climat maritime à 0% pour un climat continental.
- T₀ : température moyenne du mois d'Octobre en °C.
- T_a : température moyenne du mois d'Avril en °C.
- A : amplitude thermique en °C.

Les valeurs obtenues peuvent être comparées à celles calculées sur d'autres régions :

Tableau 26: Valeurs de l'indice de Kerner

Oran	26	El Oued	8
Chellala	15,7	Touggourt	6,9
Tebessa	12,9	Béchar	5,53
Mechria	9,8	Belabbes	9,4
Laghouat	4,5	Ghardaia	1,3

Nous avons rassemblé au tableau 27 bis, les résultats des différents indices pris en considération. Les valeurs obtenues montrent bien que la région étudiée est soumise à un climat aride à hyperaride. Ceci conduirait à un déficit d'écoulement très prononcé.

Tableau 27: Résultats des différents indices

Indices	De Martonne	Stewart	Moral	Emberger	Kerner
résultats	5.94	16.49	0.5	16.44	4.5

IX. ÉVAPORATION, ÉVAPOTRANSPIRATION ET DÉFICIT D'ÉCOULEMENT

Évaporation et évapotranspiration, traduisent le retour de l'eau à l'atmosphère sous forme de vapeur .Ce phénomène pouvait être physique évaporation ou action de l'activité biologique des végétaux (transpiration).Le déficit d'écoulement représente la différence entre précipitations et volumes écoulés ou infiltrés.

1. Évaporation

Elle intéresse aussi bien les surfaces d'eau libre que les quantités d'eau retenues dans les couches superficielles.

Tableau 28: Moyennes mensuelles de l'évaporation (piche) Laghouat 1978-1980

S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jl	At	Année
61	50	38	40	38	39	54	54	89	112	98	85	718

Tableau 29: Moyennes mensuelles de l'évaporation (piche) Laghouat 1973-1980

S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jl	At	Année
61	57	52	52	37	41	52	60	85	98	96	95	786

Pour la période (1978-1980), l'évaporation totale annuelle est de 718 mm, les maximas se rencontrent aux mois de juin(112 mm) et juillet (98 mm) ; les minimas en novembre et janvier (38 mm).Pour la période 1973-1980 les maxima s'observent en juin et juillet (98 mm) et (96 mm), les minima en janvier (37 mm) et février (41 mm).

2. Facteur fondamental du bilan hydrique

Il regroupe à la fois :

- Des processus d'évaporation physique de l'eau contenue dans le sol.
- Des processus de transpiration, correspondant à l'utilisation de l'eau atmosphérique et de l'eau du sol par des végétaux et au rejet de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Dans les pays arides à semi-arides, l'approche de la connaissance des quantités d'eau évapotranspirées est délicate. L'utilisation des méthodes classiques de calcul donne des valeurs de l'évapotranspiration réelle(E_{tr}) souvent supérieures aux précipitations. Dans ces

conditions, s'il est possible sous certains climats d'extrapoler les résultats d'une station à un ensemble régional, cette démarche n'est plus possible en Algérie où l'on passe en quelques kilomètres du climat méditerranéen humide au climat de montagne puis au climat désertique sans compter les microclimats locaux qui sont multiples.

3. Calcul de l'évapotranspiration potentielle:

Elle correspond à l'évaporation maximum d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau, suivant des conditions climatiques données. Elle a été estimée par la formule de Thornthwaite qui permet de calculer l'évapotranspiration potentielle mensuelle :

$$ETP = 1,6 \left\{ \frac{10t}{I} \right\}^a \quad \text{avec}$$

a: est un paramètre fonction de la température.

I: est un indice thermique annuel égal à la somme de 12 indices mensuels $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$.

Des tableaux et abaque fournis par Thornthwaite nous donnent:

- la valeur de i en fonction de la température,
- le facteur de correction à appliquer en fonction de la latitude et de la durée du jour,
- les valeurs de l'évapotranspiration potentielle pour des raisons de températures comprises entre 26°5 et 38°.

La valeur intermédiaire étant obtenue selon l'auteur par interpolation linéaire.

Nous avons:

ETP, Évaporation potentielle en cm l⁵

T, température moyenne mensuelle en °C

I, indice thermique annuel $I = \sum_1^{12} i$

i, Indices thermique mensuel $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$

$$a = 0,49239 + 1,792 \cdot 10^{-2} - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3$$

Tableau 30: Calcul de l'évapotranspiration à la station de Laghouat

Mois	T mensuelle °C	Indice Thermique (i)	ETP non corrigée	K	ETP Corrigée (mm)
S	23,4	10,35	110	1,03	113,3
O	17,2	6,49	72	0,97	69,84
N	11,4	3,48	45	0,88	39,6
D	8,05	2,08	28	0,86	24,08
J	7,40	1,81	24	0,88	21,12
F	9,35	2,6	33	0,86	28,38
M	12,45	4,0	49	1,03	50,47
A	16,10	5,87	70	1,09	76,3
M	19,70	7,97	90	1,19	107,1
J	24,95	11,37	130	1,20	156
J	28,6	14,02	150	1,22	183
At	27,8	13,43	145	1,15	166,75
Année	17,25	6,55 (83.47)	-	-	1035.94

4. Évapotranspiration réelle et déficit d'écoulement

4.1. Méthode de Coutagne :(fig. 27)

Le déficit d'écoulement exprimé en mètres, se déduit de la hauteur annuelle des précipitations et de la température moyenne annuelle (en °C), par la relation :

$$D = P - \lambda P^2, \text{ avec } \lambda = \frac{1}{0.8+0.14T}$$

- Cette relation n'est applicable que pour P comprise entre $\frac{1}{8\lambda}$ et $\frac{1}{2\lambda}$

- Dans le cas qui nous intéresse P est inférieur $\frac{1}{8\lambda}$, le déficit d'écoulement sera inférieur égal aux précipitations.

$$p = 0.162 \times 10^{-3}(m) \text{ et } T = 17.25$$

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 \times 17.25} = 0.31$$

$$\frac{1}{8 \times 0.31} = 0.4 \text{ et } \frac{1}{2 \times 0.31} = 1.61$$

D'après les valeurs obtenues du facteur « λ », comparées à celle des précipitations, on se trouve en dehors des limites de validité de la méthode de Coutagne.

4.2. Méthode de Wundt

L'hydrologue Wundt a établi un abaque modifié par Coutagne (fig. 27), qui permet d'obtenir une valeur du déficit d'écoulement en fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations. Malheureusement, étant donné la structure de l'abaque, cette méthode est peu précise. Cependant, la station de Laghouat se situe à la limite inférieure des courbes représentatives du déficit et manifeste une valeur d'environ 220 mm

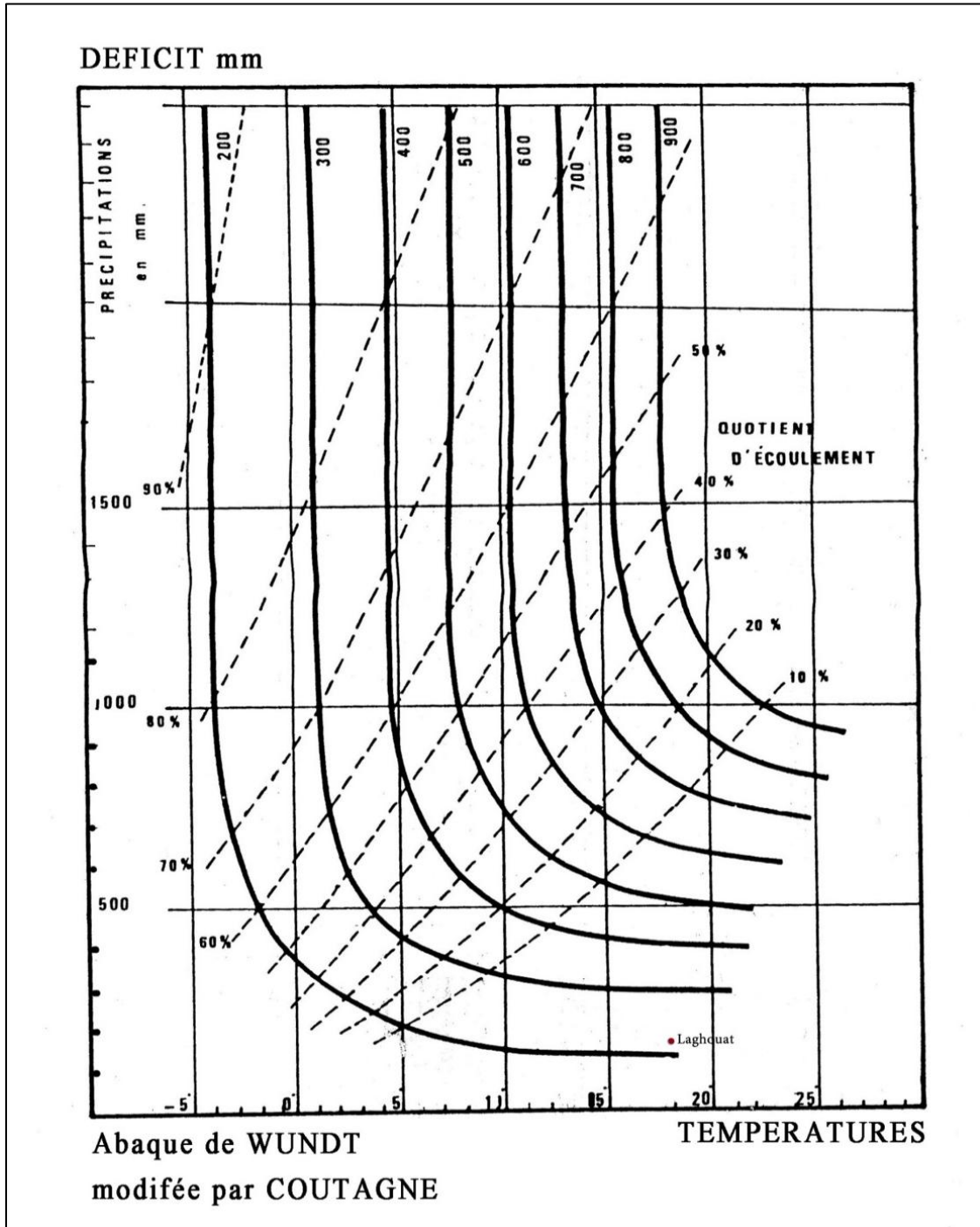


Figure 27: Abaque WUNDT modifiée par COUTAGNE

4.3.Méthode de Turc

Turc a proposé une méthode fondée sur les observations réalisées sur cases lysimétriques et intéressant 254 bassins repartis dans le monde. Cette méthode permet d'évaluer directement le déficit d'écoulement annuel d'un bassin versant à partir de la hauteur annuelle de la pluie et de la température moyenne annuelle.

$$D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}}$$

$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$

$P = 162 \text{ mm}$ et $T = 17,25^\circ\text{C}$

$L = 300 + 25 \times 17,25 + 0,05 \times 17,25^3 = 987,9 \text{ mm}$

$$D = \frac{162}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{162^2}{987,9^2}\right)}} = 168,27 \text{ mm}$$

Tableau 31: résultats de l'évapotranspiration réelle

El Bayadh : 280,8 mm	Ain Mahdi : 153,69 mm.
Aflou : 310,69 mm.	Laghouat : 168,27 mm

D'après les résultats obtenus, on aurait ainsi pour la station de Laghouat, un déficit légèrement supérieur aux précipitations. Pour les autres stations à pluviométrie plus importante, on se trouve à la limite de validité de la méthode.

4.4.Méthode de Thornthwaite

Cet auteur a proposé une méthode pratique pour le calcul de l'évapotranspiration. Partant de l'Évapotranspiration potentielle on passe à l'évapotranspiration réelle qui serait égale à l'évapotranspiration potentielle si les réserves en eau sont suffisantes. S'il existe un surplus, une infiltration pourra se produire qui ira alimenter les nappes souterraines et l'écoulement. Pour effectuer les calculs, il est nécessaire de connaître la valeur de la réserve utile :

Hallaire (1967) pour le calcul de cette réserve utile du sol a proposé d'utiliser la relation :

$$Ru = \left[\frac{(c - f)}{100} \right] \times h \times d + 30 \text{ mm}$$

Dans cette relation :

Ru : La réserve utile du sol. ; **c** : La capacité au champ. **f** : La capacité au point de flétrissement. **h** : La profondeur du sol. **d** : La densité apparente. **30 mm** : l'enracinement capillaire.

Le seul paramètre susceptible de varier dans de fortes proportions reste donc la profondeur du sol.

A défaut de mesures, pour ce qui concerne la densité apparente on la prend égale à 1. L'expérience montre que l'on peut prendre pour (c-f) les valeurs suivantes :

- Sols sableux : 5%.
- Sols limoneux : 10% à 15%.
- Sols argilo-limoneux : 20%.

Pour la profondeur nous avons retenu une moyenne. En réalité les racines peuvent descendre beaucoup plus bas, en particulier dans les régions arides (profondeur pouvant dépasser 30 mètres parfois même 100 mètres ? : Tamaris). Par ailleurs il ne faut pas oublier que la profondeur du sol est essentiellement variable d'un point à l'autre, il en est de même pour la réserve utile. Les résultats acquis ne peuvent donc être que très approchés.

$$Ru = \left[\frac{15}{100} \right] \times 300 \times 1.56 + 30 = 74.7$$

Les résultats obtenus sont réunis au tableau n° 34.

Tableau 32: paramètres de calcul de RU

	h (profondeur du sol)	(c-f)%	(densité apparente)	Ru (réserve utile)
Laghouat	300 mm.	15 %	1.56	100.2mm

Tableau 33: L'évapotranspiration réelle des différentes stations

El Bayadh : 250 mm	Ain Mahdi : 147,8 mm
Aflou : 325,4 mm	Laghouat : 100,2 mm

4.5. Méthode de P. Verdeil (Fig. 28)

Le déficit d'écoulement est donné par un abaque établi à partir de la connaissance du déficit mesuré sur l'ensemble des oueds Algériens. Pour les stations de notre secteur, les valeurs obtenues sont résumées au tableau n° 34.

Tableau 34: résultats du déficit d'écoulement

El Bayadh : 240 mm.	Ain Mahdi : 143 mm.
Aflou : 315 mm.	Laghouat : 149 mm.

D'après les valeurs du déficit d'écoulement calculées aux diverses stations de la région étudiée, on en déduit que l'ensemble des écoulements est très faible et oscille entre 10 et 15 mm de lame d'eau équivalente (ruissellement et infiltration).

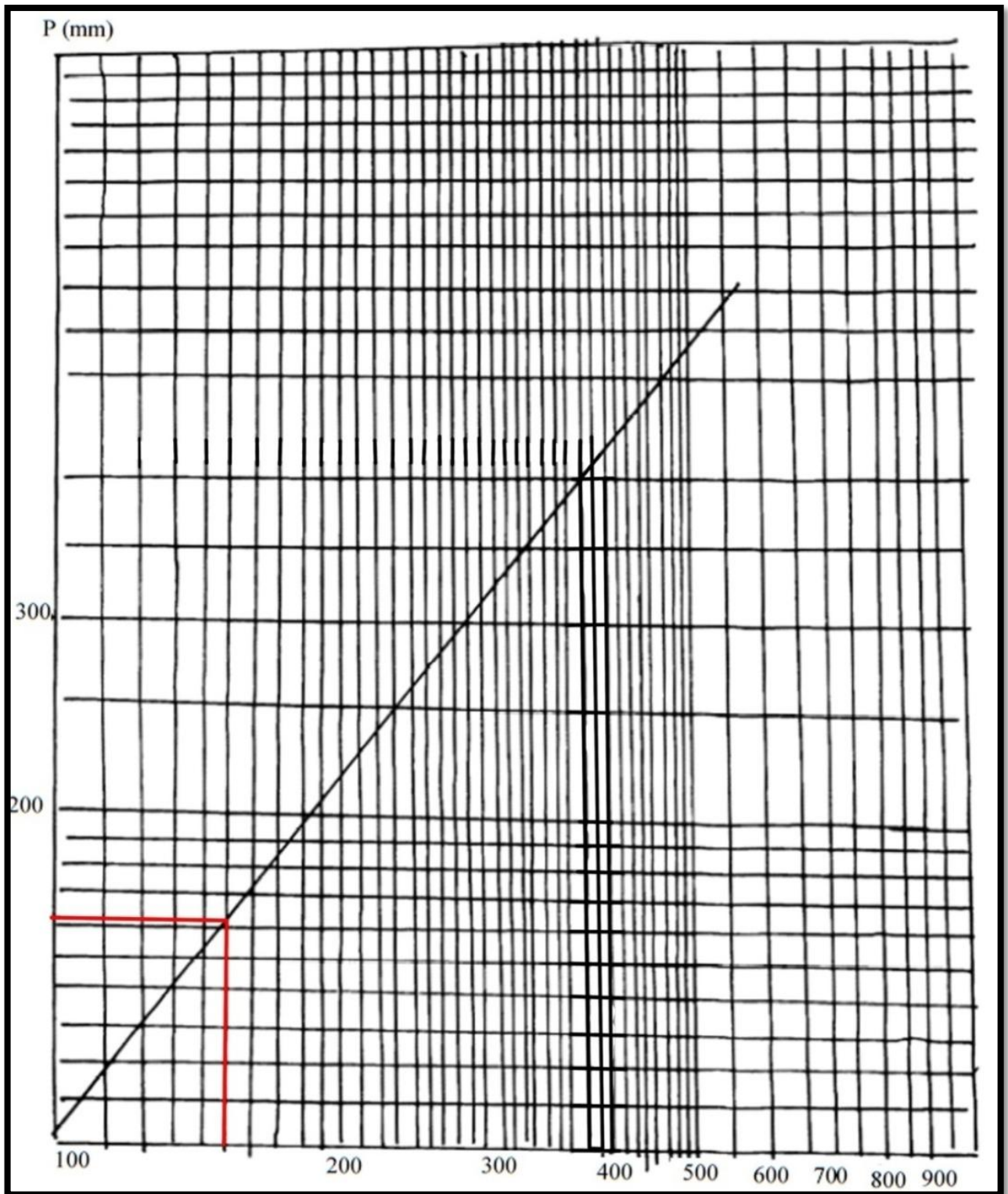


Figure 28: calcul du déficit d'écoulement par la méthode de P. Vredeil

X. CONCLUSION

Sur la base des données que nous venons de présenter et d'après les résultats obtenus des divers indices climatiques, il ressort que le Djebel Amour est soumis à un climat semi-aride à hyperaride avec des influences sahariennes et montagnardes. L'altitude y entraîne un abaissement des températures et une augmentation de la pluviosité en fonction de l'altitude. La région étudiée est caractérisée par un déficit d'écoulement très marqué entraînant ainsi des pertes en eau considérables soustraites aux apports par les précipitations.

L'établissement du bilan hydrologique par le recours aux seules méthodes classiques envisagées, s'est avéré non concluant. Néanmoins, en se rabattant à la seule méthode de P. Verdeil (1988), la mieux adaptée à notre régime climatique, nous pouvons proposer un taux d'écoulement moyen équivalent à 13 mm de lame d'eau.

Cependant, nous pensons qu'une approche du bilan n'est possible qu'à partir des données afférant aux averses qui génèrent des crues importantes d'oueds, contribuant largement à la recharge des aquifères.

CHAPITRE III

GEOMORPHOLOGIE

I. LIMITES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED M'ZI

Le bassin versant de L'Oued M'Zi d'orientation E-W appartenant à la wilaya de Laghouat (fig. 29) chevauche deux domaines géologiques assez différents avec au Nord les reliefs escarpés de l'Atlas saharien central et au Sud la plate- forme saharienne, il est limité:

- A l'Est et à l'Ouest respectivement par les longitudes 3°20'Est et, 1°58'Est.
- Au Nord et au Sud par les latitudes Nord 34 °18' et 33°24.

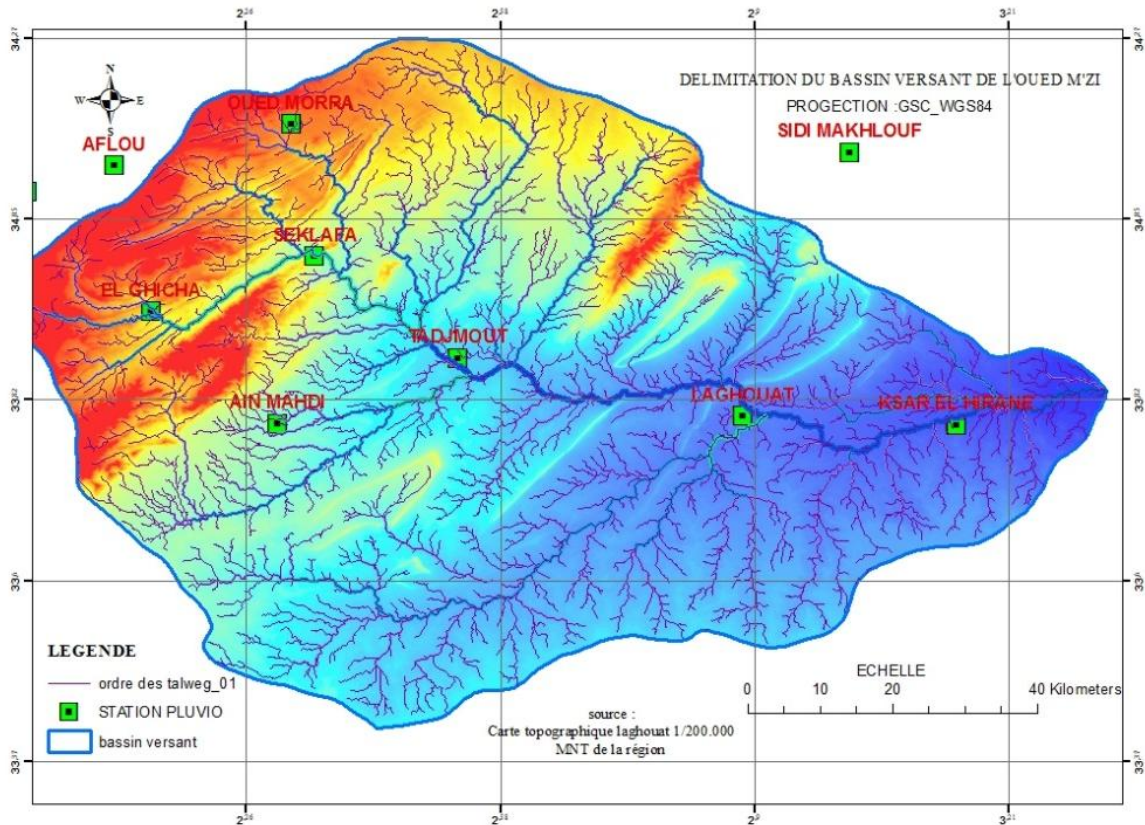


Figure 29: Carte de délimitation du bassin versant de l'Oued M'zi et ses affluents

II. PARAMETRES GEOMORPHOLOGIQUES DU B.V DE L'OUED M'ZI

1. Caractéristiques du bassin versant :

Les caractéristiques physiques et hydrologiques ont été calculées à partir des Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la région et de la carte d'Etat major de Laghouat 1/200.000.

1.1. Caractéristiques morphologiques

1.1.1. Paramètres géométriques : aire et périmètre

La superficie, le périmètre et la longueur des talwags du bassin versant de l'oued M'zi sont obtenues automatiquement à l'aide du logiciel « Arc gis v10.1 »

Superficie du bassin versant : $\bar{S} = 7338,44 \text{ km}^2$

Périmètre du bassin versant : $\bar{P} = 349,72 \text{ km}$

Longueur du thalweg le plus long : $L_P = 80,4 \text{ km}$

1.1.2. Les caractéristiques de forme

Indice de compacité (de Gravelius): Le contour d'un bassin versant enferme une superficie S , qui a une certaine forme, laquelle va avoir une influence sur l'écoulement global et sur l'allure de l'hydrogramme résultant d'une pluie donnée. Un bassin allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin de forme ramassé.

L'indice admis par les hydrologues pour caractériser la forme d'un bassin versant est l'indice de compacité de GRAVELIUS qui est le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface. Si (S) est la surface du bassin en km^2 et (P) son périmètre en km , le coefficient est calculé selon l'expression suivante :

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} = \frac{0.28 \times 349.72}{\sqrt{7338.44}} = 1.14$$

Cet indice nous permettra de préjuger de la forme du bassin :

- $K_c = 1$: bassin ramassé

- $K_c > 1$: bassin allongé

Le coefficient est supérieur à 1 et d'autant plus voisin de cette valeur que le bassin est compact. La valeur de cet indice pour le bassin de l'oued M'zi (1.14) traduit un très faible allongement.

Rectangle équivalent : Le bassin est assimilé à un rectangle de longueur « L » et de largeur « l » qui a la même surface, le même périmètre, le même coefficient de compacité que notre bassin.

- Longueur du rectangle « L » :
$$L = K_c \frac{\sqrt{S}}{1.128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right]$$

$$L = 1.14 \frac{\sqrt{7338.44}}{1.128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{1.14} \right)^2} \right] = 99.41 \text{ km}$$

- Largeur du rectangle « l » :
$$l = K_c \frac{\sqrt{S}}{1.128} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right]$$

$$l = 1.14 \frac{\sqrt{7338.44}}{1.128} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{1.14} \right)^2} \right] = 73.73 \text{ km}$$

1.1.3. Le relief

Hypsométrie du bassin :

Les caractéristiques les plus significatives d'un bassin versant est la nature du relief ; elle nous renseigne sur le taux de surface supérieure ou inférieure à une altitude donnée sur l'aptitude des terrains à l'infiltration et l'évaporation. On trace la courbe hypsométrique (Fig. 30) en utilisant les données consignées au TABLEAU N°35.

Tableau 35: Tableau de distribution hypsométrique

Elévation (m)	Bornes sup(m)	Surfaces entre courbes		Surfaces cumulées	
		Si (km ²)	%	Si (Km ²)	%
600-700	700	123,44	1,68	123,44	1,68
700-800	800	1051	14,33	1174,44	16,01
800-900	900	1944	26,5	3118,44	42,51
900-1000	1000	1541	21,01	4659,44	63,52
1000-1100	1100	807	11	5466,44	74,52
1100-1200	1200	635	8,65	6101,44	83,17
1200-1300	1300	427	5,8	6528,44	88,97
1300-1400	1400	632	8,6	7160,44	97,57
1400-1500	1500	178	2,43	7338,44	100

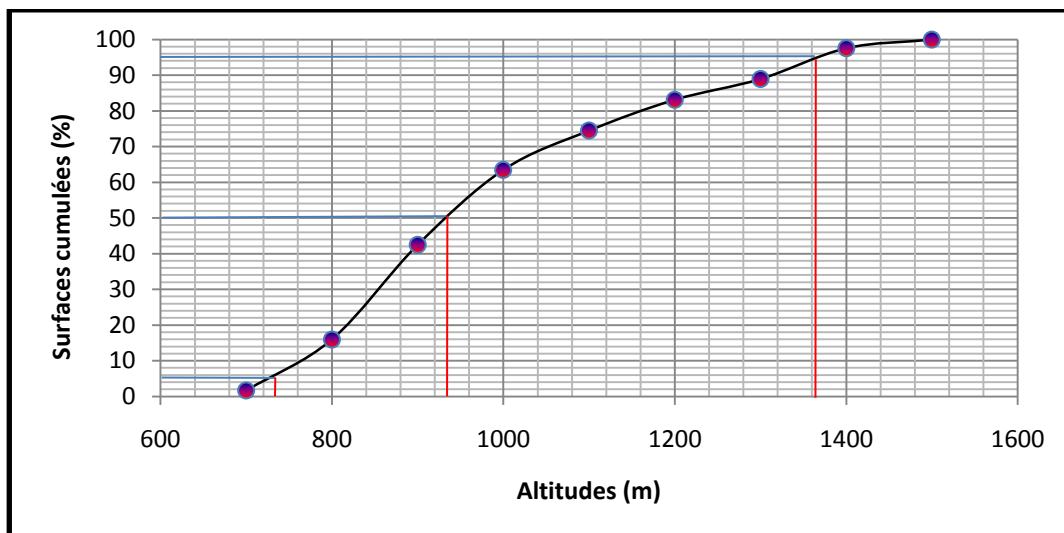


Figure 30: Courbe hypsométrique du bassin versant l'oued M'zi.

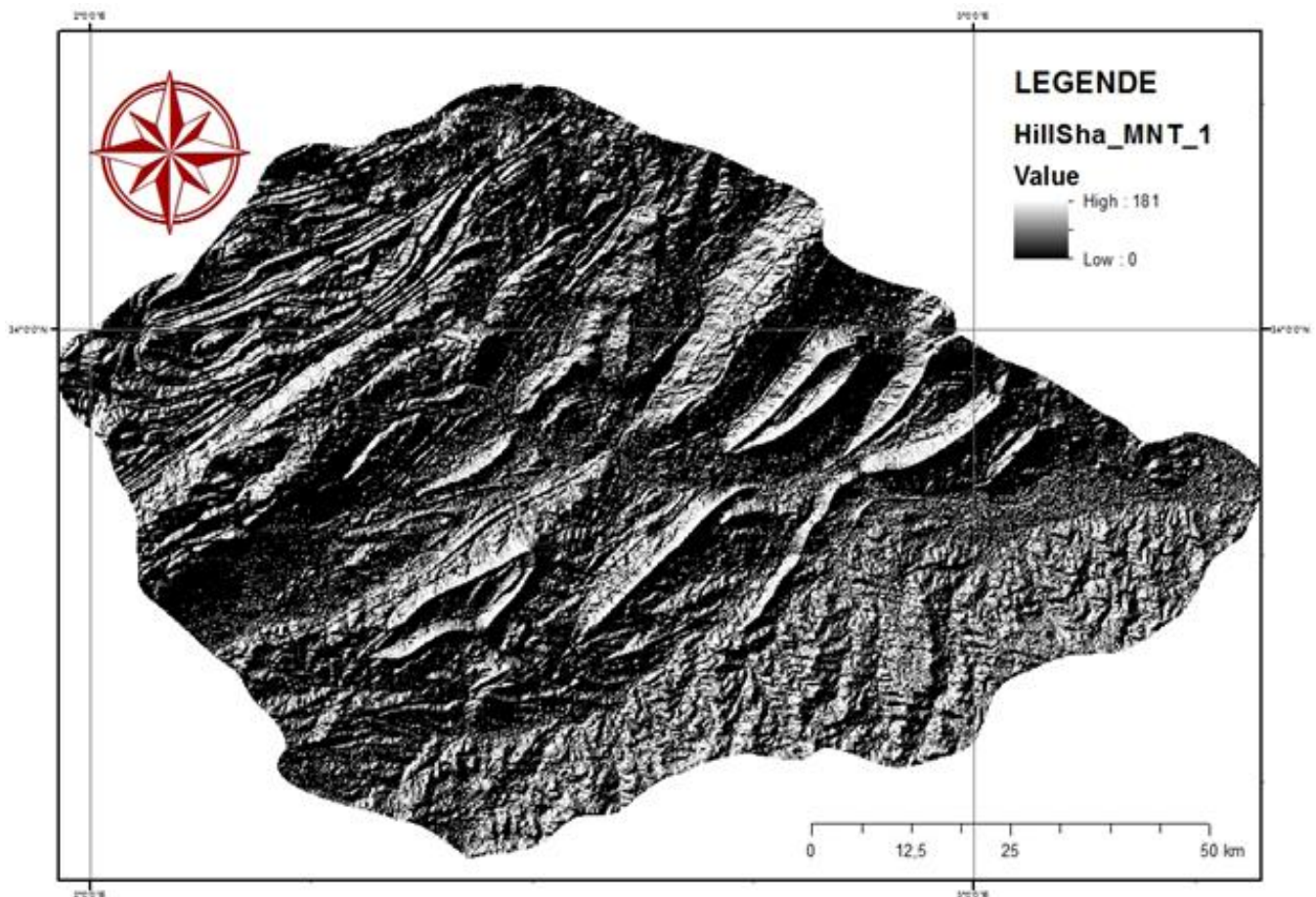


Figure 31: Carte du relief du bassin versant

Nous avons de même procédé à l'établissement des courbes hypsométriques des principaux sous-bassins de l'oued M'Zi (fig. n°32) La forme de ces courbes comme celle de l'oued M'Zi, est sensiblement identique et traduit dans l'ensemble une dynamique d'un bassin en stade d'équilibre.

Altitude moyenne du bassin

A partir de la courbe hypsométrique, on peut calculer l'altitude moyenne et déterminer l'altitude médiane du bassin versant. Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe de sa répartition hypsométrique.

L'altitude moyenne peut-être calculée par deux méthodes :

- Méthode graphique : 935 m
- Méthode analytique: 1082 m

$$H_{moy} = \frac{\sum S_i H_i}{\bar{S}} = 1082m$$

S_i : surface partielle entre deux courbes de niveau (Km^2), \bar{S} : Aire du bassin versant (Km^2),

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau successive (m)

COURBES HYPSONOMETRIQUES DES
SOUS BASSINS VERSANTS DE
OUED M'ZI.

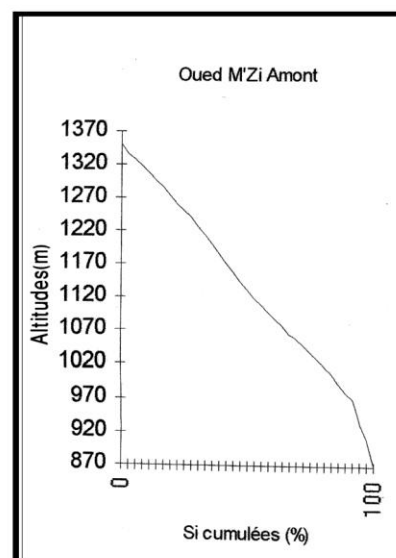
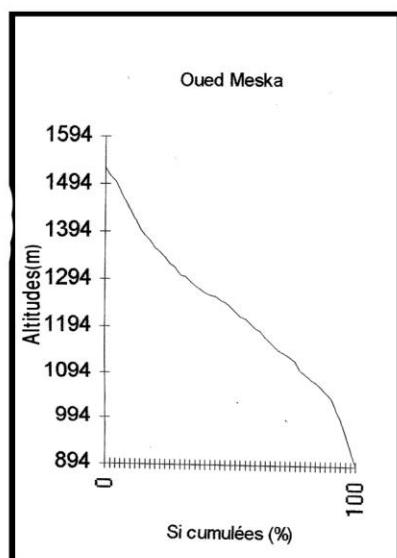
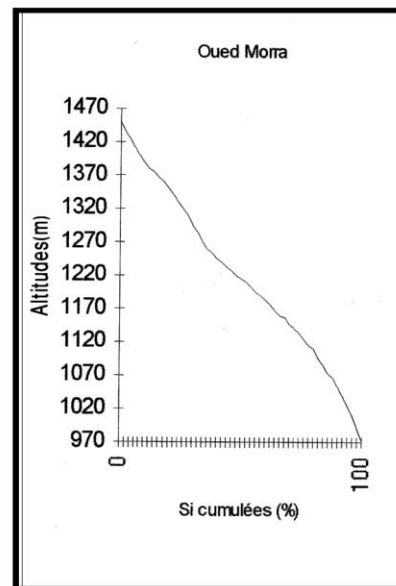
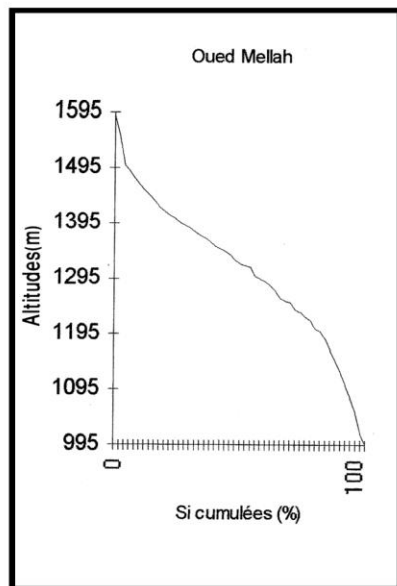


Figure 32: Courbes hypsométriques des sous bassins versants de oued M'zi

Les indices de pente

a. Indice de pente global : déterminé par la formule suivante : $I_g = \frac{D}{L} = 6.33m/km$

D, dénivellation (H_{95%}-H_{5%}), D=1365-736 = 629 m.

L, la longueur du rectangle équivalent, L = 99.41 Km.

Le résultat obtenu de cet indice (0.633 %) dénote d'un relief à pente faible.

b. Pente moyenne du bassin : Elle peut être calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$I_m = \frac{\Delta H}{L} = \frac{(H \max - H \min)}{L} = \frac{900}{99.41.10^3} = 9.1\%$$

c. Indice de pente de Roche « Ip » : il est donné par la formule :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_1^i \sqrt{\beta i (a_i - a_{i-1})} = 0.317$$

Avec ;

I_p : indice de pente de Roche

L : longueur du rectangle équivalent (km)

β : fraction de la surface comprise entre deux courbes de niveau consécutive a_i et a_{i-1}

Tableau 36: Paramètres de calcul de l'indice de pente de Roche

Elévation (m)	(ai -ai-1) (m)	Si (km ²)	β	$\beta(ai -ai-1)$	$\sqrt{\beta(ai -ai-1)}$
600-700	100	123,44	1,68	168	12,96
700-800	100	1051	14,33	1433	37,85
800-900	100	1944	26,5	2650	51,48
900-1000	100	1541	21,01	2101	45,84
1000-1100	100	807	11	1100	33,17
1100-1200	100	635	8,65	865	29,41
1200-1300	100	427	5,8	580	24,08
1300-1400	100	632	8,6	860	29,33
1400-1500	100	178	2,43	243	15,59

L'indice de pente de Roche calculé pour le bassin versant du M'zi est : $I_p = 0.317$, ce qui traduit une pente faible du bassin (fig. 33).

Dénivelée spécifique D_s

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 ;

$$D_s = I_g \sqrt{S} = 6.33 \sqrt{7338.44} = 542.23 \text{ m}$$

La classification des reliefs d'après d'O.R.S.T.O.M. en fonction de la dénivelée spécifique, a défini sept classes (Tableau 40) ;

Tableau 37: Classifications des reliefs selon la dénivelée spécifique (O.R.S.T.O.M.)

Classe	Relief	D_s
R1	Relief très faible	$D_s < 10$
R2	Relief faible	$10 < D_s < 25$
R3	Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
R4	Relief modéré	$50 < D_s < 100$
R5	Relief assez fort	$100 < D_s < 250$
R6	Relief fort	$250 < D_s < 500$
R7	Relief très fort	$D_s > 500$

D'après la classification de l'O.R.S.T.O.M, notre bassin versant présente un relief très fort. Cependant, il faut remarquer que cet indice adapté pour des bassins de faible superficie, n'est pas représentatif du bassin versant considéré puisqu'il donne une valeur très élevée et qui ne reflète pas le relief très modéré à l'échelle de tout le bassin de l'oued M'Zi couvrant une grande superficie.

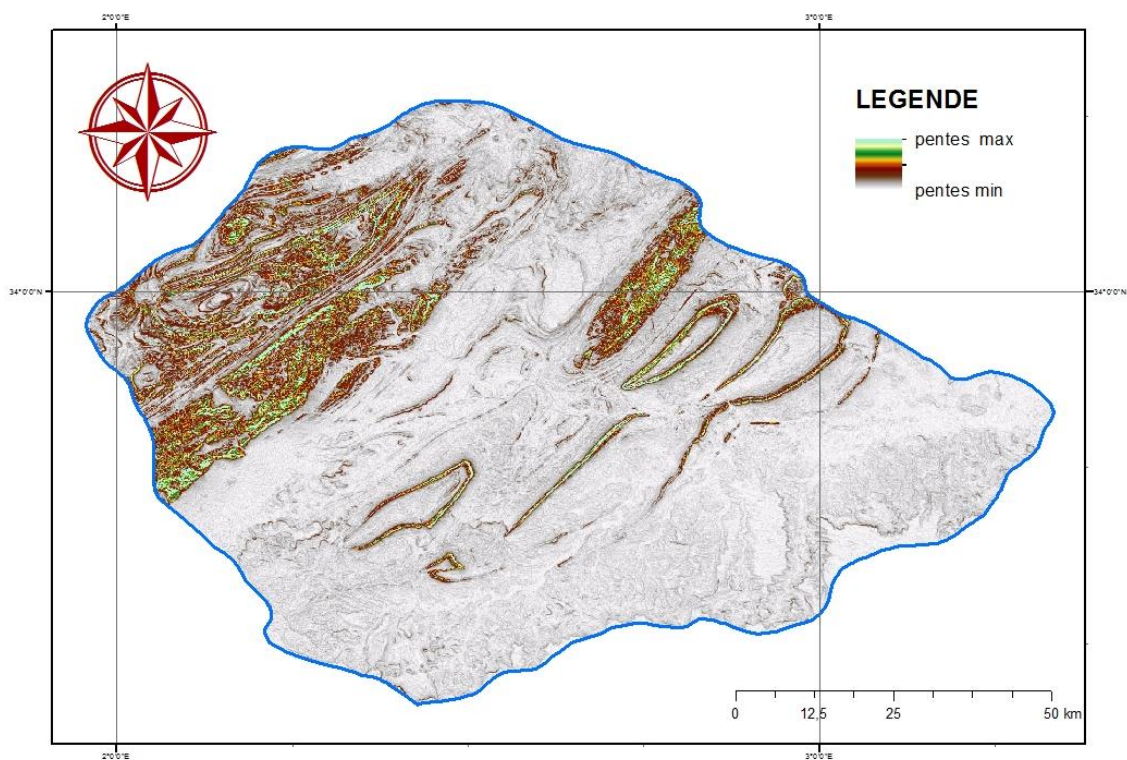


Figure 33: Carte des pentes du bassin versant

1.1.4. profils en long

Le profil est tracé automatiquement par le logiciel arcgis a partir de MNT de la région (fig. 33) .

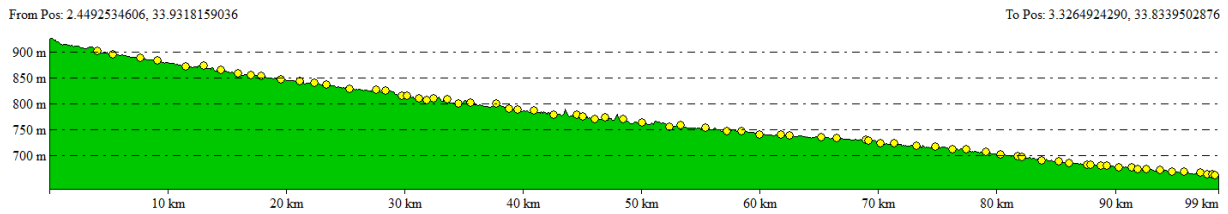


Figure 34: profil en long du talweg principal

Dans ce contexte, nous avons procédé au tracé des profils en long des principaux cours d'eau des sous-bassins de l'oued M'Zi (fig. 35, 36) . l'allure des tracés permet de faire les observations suivantes :

- La fig. 35(a) permet de remarquer que le profil d'équilibre du sous-bassin versant de l'Oued Meska localisé sur le flanc Sud-Est de l'Atlas saharien présente une forme presque rectiligne à l'amont du fait d'une érosion moins prononcée que dans ceux de l'Oued Mellah et l'Oued Morra. Il est à noter que dans ce cas le profil d'équilibre n'est pas encore atteint.
- La fig. 35(b), montre que pour le sous-bassin versant de l'Oued Messaad , le profil d'équilibre a une allure concave indiquant une érosion assez faible du lit du cours d'eau, dans ce cas l'équilibre est pratiquement atteint.
- La fig. 36 (a, b) montre que les sous-bassins versants de l'Oued Mellah et l'Oued Morra appartenant à l'Atlas saharien sont caractérisés par des profils d'équilibre dynamiques convexes, attestant d'une érosion active se poursuivant actuellement du fait du réajustement des structures atlasiques.

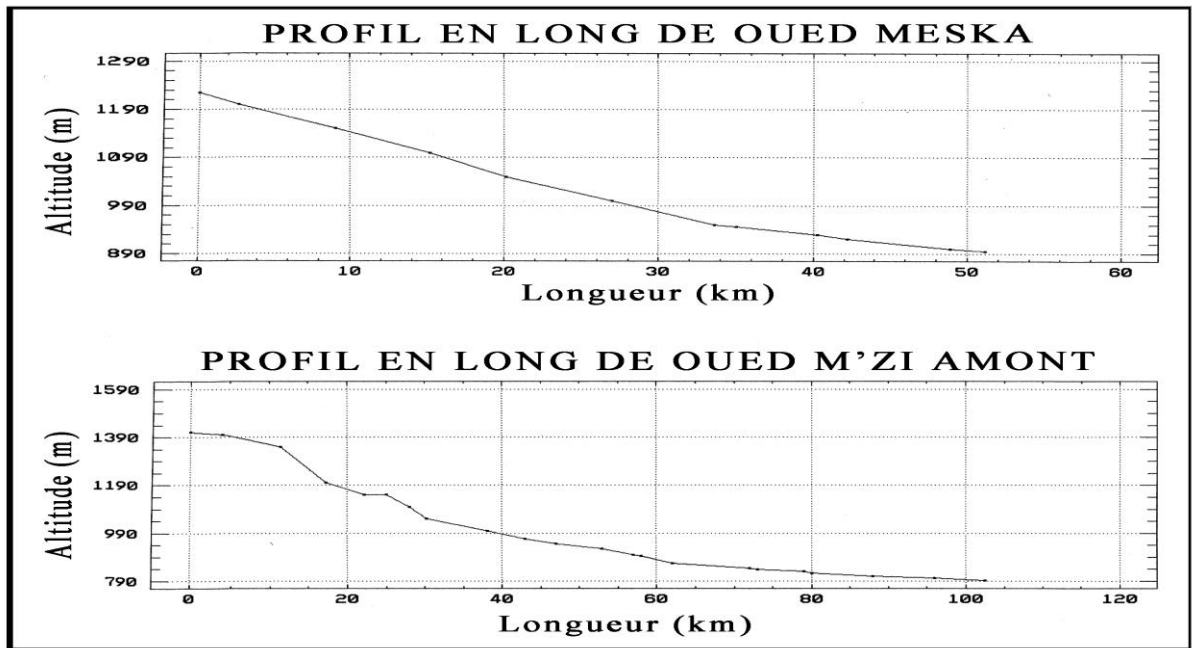


Figure 36(a et b) : Profils en long

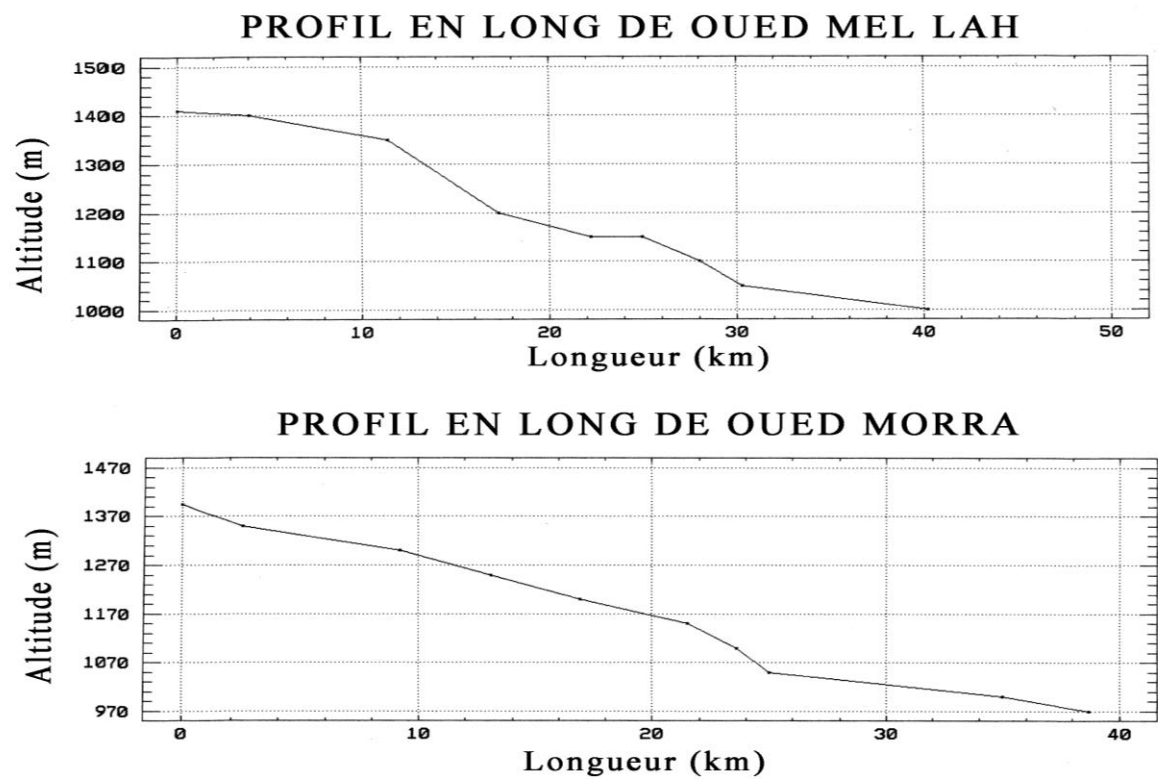


Figure 35(a et b) : profils en long

1.1.5. *Hierarchisation du chevelu hydrographique*

La hierarchisation nous permet d'étudier la ramification du reseau, pour laquelle chaque cours d'eau reçoit un numero fonction de son importance appele ordre du cours d'eau.

Classification de Shumm-Strahler (1952)

Parmi les methodes de numerotation elaborees, on a adopte celle de Shumm-Strahler (1952) basee sur trois regles (fig. 37);

- Tout thalweg sans affluent est dit d'ordre 1
- Au confluent de deux thalwegs d'ordre n, le resultat est d'ordre n+1
- Un thalweg recevant un affluent d'ordre inferieur garde son ordre.

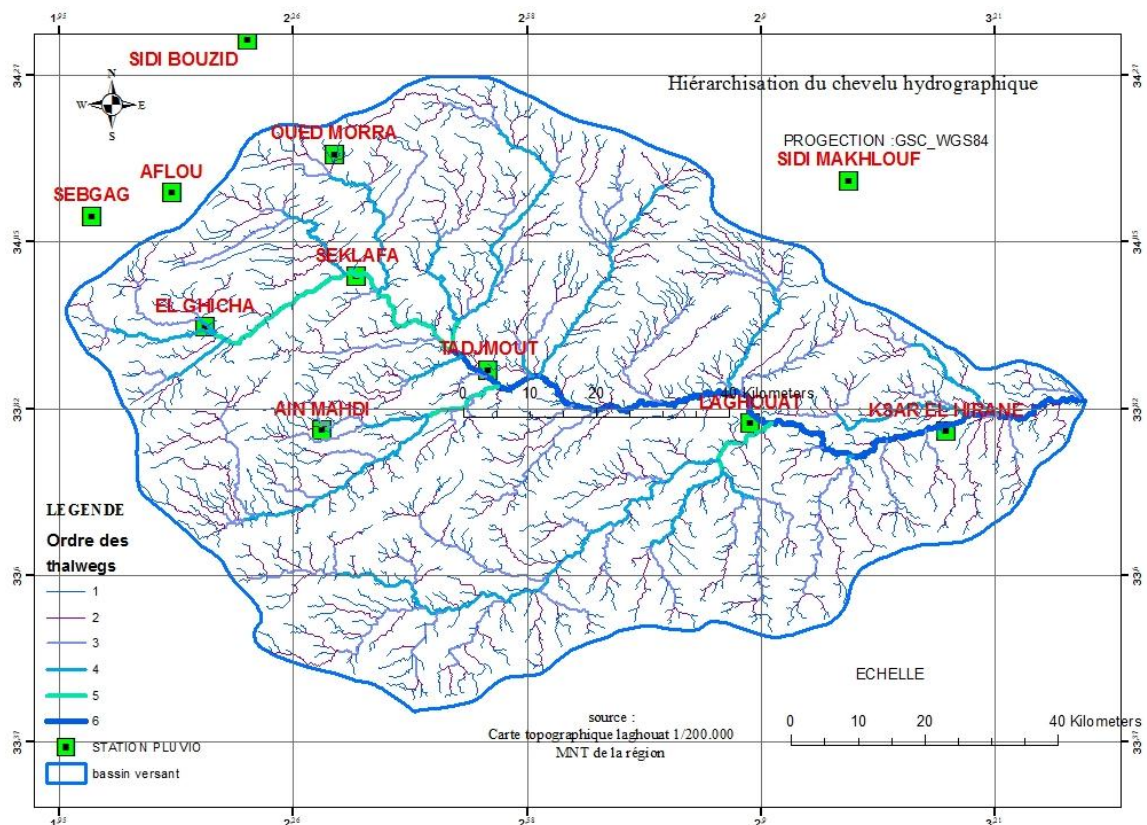


Figure 37: Hierarchisation du chevelu hydrographique

Classification de Horton

On classe de facon rationnelles differents cours d'eau selon leur importance

1. ordre 1 : talweg qui n'a pas de tributaire(ou d'affluent)
2. ordre 2 talwegs qui à au moins un affluent d'ordre 1
3. ordre 3 oued qui a des tributaires du 2eme ordre et meme du premier ordre.

1.1.6. Facteurs physiographiques du bassin versant du M'zi

L'ensemble des données réunies pour le calcul des différents paramètres envisagés, a été déduit à partir de la carte du chevelu hydrographique (fig. 36).

La densité de drainage D_d : TABLEAU N° 41

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 le bassin versant de l'Oued M'zi : $D_d = 1,02$

Pour une longueur totale des thalwegs du bassin versant du M'zi $L_x = 7481,88$ km et une superficie de 7338.44 km², on obtient une densité de drainage $D_d = 1.02$ km/km². Cette valeur reflète un développement lâche du réseau hydrographique.

Densité des thalwegs élémentaires

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'zi nous donne :

$$F_1 = 0.2 \text{ thalwegs/km}^2.$$

Ce résultat confirme le faible drainage des surfaces du bassin.

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 le bassin versant du M'zi un coefficient de torrentialité très faible de l'ordre de **0,204**.

Tableau 38: Caractéristiques du réseau hydrographique

Bassin versant	Dd km/ Km ²	Frequence F1	Coefficient de torrentialité Ct
Oued Mzi	1,02	0.2	C _t = 0,204.

Les résultats présentés au tableau ci-dessus montrent que le bassin versant de l’oued M’Zi est caractérisé par un réseau hydrographique mal organisé et par conséquent un faible drainage par les eaux superficielles.

Calcul du rapport de confluence

Sur la base de la classification des cours d'eau, Horton (1932) et Schumm (1956) ont établi différentes lois :

Loi des Nombres	$R_n = \frac{N_u}{N_{u+1}}$
Loi des Longueurs	$R_L = \frac{L_u}{L_{u+1}}$
Loi des Aires	$R_B = \frac{A_u}{A_{u+1}}$

Avec :

- R_B : rapport de confluence des cours d'eau ("bifurcation ratio") ;
- R_L : rapport des longueurs des cours d'eau ;
- R_A : rapport des aires des cours d'eau ;
- u : ordre d'un cours d'eau u varie entre 1 et n (n est l'ordre du cours d'eau principal, classification selon Strahler) ;
- N_u : nombre des cours d'eau d'ordre u ;
- N_{u+1} : nombre des cours d'eau d'ordre suivant ;
- L_u : longueur moyenne des cours d'eau d'ordre u ;
- A_u : aire tributaire moyenne des cours d'eau d'ordre u.

On s’est limité au seul calcul du rapport de confluence (Rc).C’est un nombre sans dimension exprimant le développement du réseau de drainage. Il varie suivant l'ordre considéré. C'est un élément important à considérer pour établir des corrélations d'une région à une autre. Selon Strahler (1964). Ce rapport varie de 3 à 5 pour une région où la géologie n'a aucune influence.

C'est le rapport du nombre de thalwegs d'ordre (x) par celui des thalwegs d'ordre supérieur (x+1):

$$Rc = \frac{Ni}{Ni + 1}$$

La valeur moyenne du rapport de confluence peut être estimée directement à partir de la pente de la droite obtenue à l'aide des points N_{x+1} et x (ordre des thalwegs) portés sur un diagramme semi-logarithmique (fig. 38). L'ensemble des points représentatifs montre un ajustement graphique satisfaisant accusant une hiérarchisation appréciable du chevelu hydrographique.

Pour le calcul de R_c , nous avons utilisé la classification de Schumm, selon laquelle, tout tronçon d'un cours d'eau formé par la réunion de deux cours d'eaux d'ordre (x) est d'ordre (x+1). Les calculs ont donné les résultats suivants:

Tableau 39: nombre et longueurs des thalwegs

Ordre des thalwegs	Longueurs des thalwegs(km)
1	1451
2	658
3	373
4	262
5	55
6	1

Par ajustement graphique, nous avons obtenu un rapport de confluence égal à 3.56. Cette valeur du rapport de confluence R_c traduit une organisation moyenne du drainage superficiel à l'échelle de l'ensemble du bassin de l'oued M'Zi malgré la faible densité du réseau hydrographique.

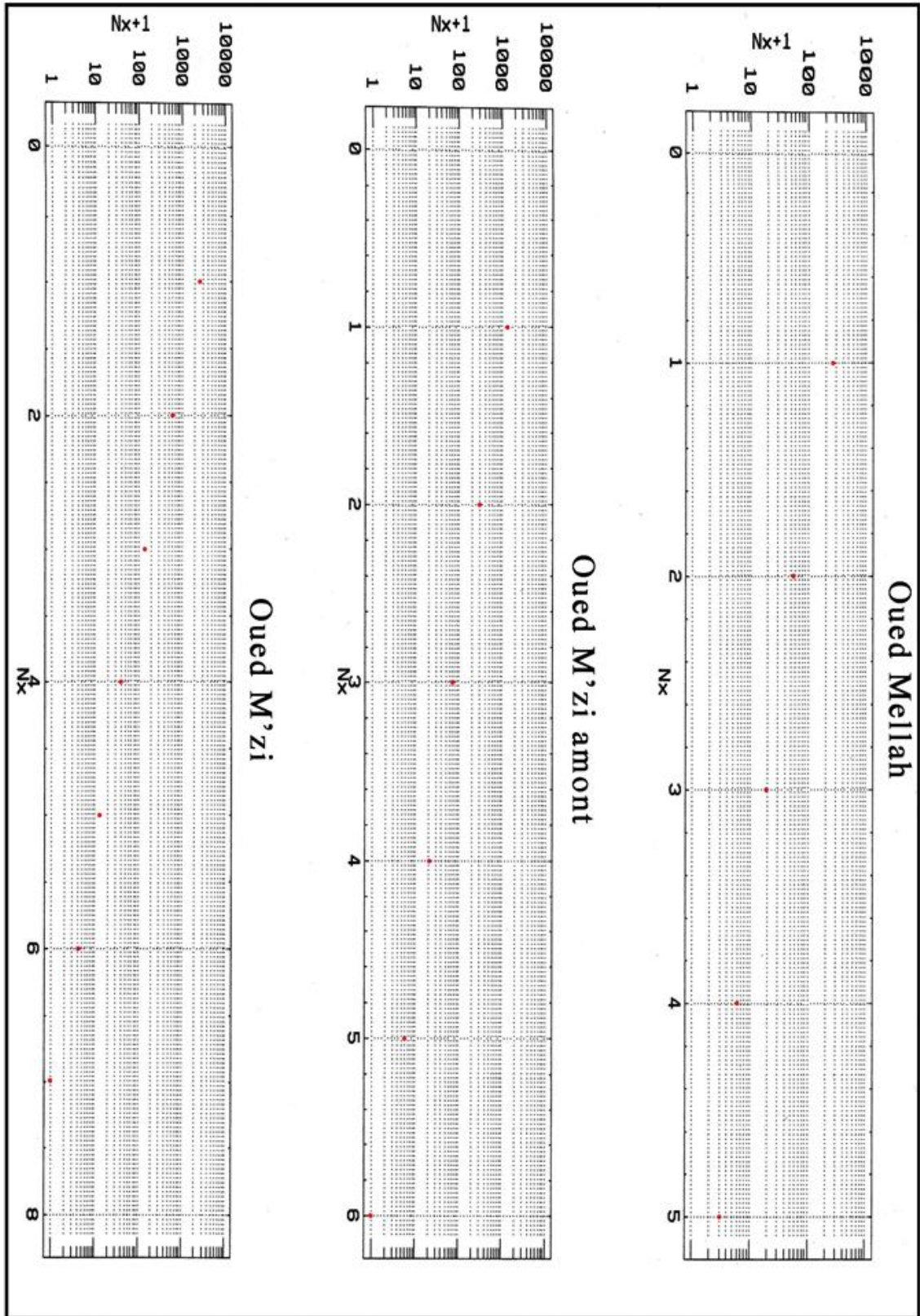


Figure 38: Diagrammes semi-logarithmique

III – CONCLUSION

Les résultats obtenus des différents paramètres physiographiques permettent de distinguer au niveau de l'Atlas saharien deux types de sous-bassins:

- Le sous-bassin de l'Oued M'zi avec un rapport de confluence $R_c = 3,56$, un indice de pente $I_p = 0.317$, une compacité élevée où le chevelu hydrographique est représenté par une prédominance des thalwegs d'ordre « 1 » constituant essentiellement des torrents de montagnes. Lors de fortes averses, ces cours d'eau peuvent générer un tirant d'eau important se manifestant par des crues dans le cours d'eau principal. Celles-ci sont à l'origine d'une partie de la recharge appréciable des aquifères centrés sur le bassin.

- Le sous-bassin de Meska et Messaäd où le chevelu hydrographique est représenté par un rapport de confluence faible et un indice de compacité lus au moins élevé ($k = 1.54$ et 1.86) avec des pentes plus faibles, dans ce cas le chevelu est plus régulier. Les ordres 2 et 3 sont plus importants.

A l'échelle de tout le bassin, le développement du réseau hydrographique montre une organisation faible des thalwegs et par conséquent un drainage superficiel rudimentaire. Le relief est représenté par une pente moyenne du bassin très modérée, ce qui offre une condition favorable à l'épandage des eaux en périodes de crues sur un impluvium de bonne perméabilité. Cette situation contribue largement à la réalimentation des nappes.

CHAPITRE IV

HYDROLOGIE

I- INTRODUCTION

Sur un plan purement hydrographique, les crêtes du Djebel Amour dessinent une ligne de partage des eaux qui, pour les unes, vont rejoindre les Dayas, les Sebkhas et les Chotts parsemés sur les Hauts Plateaux Oranais (Oued Sidi Naceur) et l'oued Touil qui va devenir oued Chelif et se jette à la mer (côte Est de Mostaganem). Tandis que l'oued M'zi qui prendra le nom de oued Djedi rejoint Biskra pour aller se jeter au chott *Melghir*. Les autres sont à l'origine des oueds qui circulent sur la Hamada avant d'aller se perdre en bordure des sables du Grand Erg Occidental.

Dans leur grande majorité, les cours d'eau issus de l'Atlas Saharien répondent bien à leur appellation d'oueds, puisqu'ils sont à sec la majeure partie de l'année. Certains cependant sont régulièrement alimentés par le déversement des nappes souterraines. Ce sont : l'Oued M'zi qui prendra plusieurs appellations en fonction des régions traversées sur son parcours. Ce sera l'Oued Seklafa au niveau de la station hydrométrique établie à son niveau. Plus à l'aval, il deviendra l'Oued M'zi et plus loin la dénomination de l'Oued Djedi.

Bien que la pente générale soit assez forte vers le Sud, les oueds ne participent que faiblement au déblaiement des produits de l'érosion qui constituent de vastes glacis faiblement entaillés par les eaux au pied des Djebels.

L'étude que nous allons mener sur l'hydrologie superficielle du Djebel Amour s'intéresse à des écoulements permanents ou temporaires, sur des cours d'eau équipés ou non de stations hydrométriques. Dans ce contexte, nous analyserons les écoulements observés sur la station hydrométrique de Seklafa.

II- ETUDE DES ECOULEMENTS SUR LA STATION HYDROMETRIQUE DE L'OUED SEKLafa

Situé au Sud-Est d'Aflou, il constitue l'affluent le plus important de l'Oued M'zi avec une longueur de 80 kilomètres, drainant un bassin de 7338 km².

C'est au niveau des grès du Barrémien - Aptien - Albien et des calcaires du Jurassique que jaillissent à débit très faible et variable les sources de l'atlas saharien.

Le débit de l'Oued est contrôlé par une station hydrométrique implantée au niveau de Seklafa, situation qui lui permet de prendre en compte l'ensemble des eaux venant de l'amont. La station fonctionne temporairement depuis 1975 avec des lacunes importantes.

1. Etude des débits de l'oued M'zi

1.1. Estimation du volume annuel ruisselé à partir d'observations des crues

Le débit maximum reconnu de 0.99 m³ /s a été observé en 1983. De Novembre à la fin Avril les débits oscillent entre 0.45 m³ /s et 0.60 m³/s. On a pu reconnaître une série de crues intermédiaires dont le débit de pointe moyen reste inférieur à 1 m³/s.

Tableau 40: volumes de quelques crues observées à la station de laghouat

Date	11.12/9 /1967	27/5/68	24/5/68	23/8/68	10.11/1/69	28/4/69	20/8/69	29.30/8/69	CRUES MOYENNES
Volume en 10 ⁶	1,2	1	2	0,3	1,5	4	0,5	2	1,5

Tableau 41: Nombre moyen de crues observées (1939-1949) (Document étude de faisabilité du barrage de seklefa)

période	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	Nbre Moyen de crues annuelles
Nbre de crues annuelles	5	8	8	3	10	3	4	5	4	7	4	4à6

Le volume moyen qui transite au niveau du pont de Laghouat est d'environ **9.10⁶m³**

Tableau 42: débits des crues enregistrés à la station de Seklafa

Années	Débits maximuns(m ³ /s)
75-76	0,63
76-77	0,72
77-78	0,45
78-79	0,62
79-80	0,83
80-81	0,86
81-82	0,48
82-83	0,99

1.2. Calcul des caractéristiques empiriques

- **Moyenne** : $\bar{X}_i = \frac{\sum X_i}{N}$ ou X_i valeurs de l'échantillon et N = longueur de l'échantillon
Alors : $\bar{X}_i = \frac{5.58}{8} \leftrightarrow \bar{X} = 0,6975$
- **Variance** : $s^2 = \frac{\{\sum X_i^2 - N\bar{X}^2\}}{N-1}$
Donc : $s^2 = \frac{\{4.1412 - 8 \cdot 0,6975^2\}}{7} \leftrightarrow s^2 = 0,03559$
- **Ecart-type** : $S = \sqrt{s^2} \leftrightarrow S = 0.188$
- **Coefficient de variation** : $C_v = \frac{s}{\bar{X}} \leftrightarrow C_v = \frac{0.188}{0.6975} \leftrightarrow C_v = 0,270$

Tableau 43: Caractéristiques empiriques

débits mesurés	débits classés	rang n	FND	Z _i (theo)
0,63	0,45	1	0,0625	-1,3165
0,72	0,48	2	0,1875	-1,1569
0,45	0,62	3	0,3125	-0,4122
0,62	0,63	4	0,4375	-0,3590
0,83	0,72	5	0,5625	0,1197
0,86	0,83	6	0,6875	0,7048
0,48	0,86	7	0,8125	0,8644
0,99	0,99	8	0,9375	1,5559

Pour tracer la droite de Henry ou droite théorique :

Sur le papier millimétré on porte 2 points par lesquels passe la droite de Henry et pour lesquels on choisit arbitrairement les abscisses $Z_1 = -1$ et $Z_1 = +1$. Prenons par exemple les ordonnées:

- $D_1 = \bar{D} + Z_1 s \leftrightarrow D_1 = 0,6975 - 0,188 = 0,5095 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $D_1 = \bar{D} + Z_1 s \leftrightarrow D_1 = 0,6975 + 0,188 = 0,8855 \text{ m}^3/\text{s}$

Sur le papier de probabilité, on choisit arbitrairement les abscisses (fig. 39) :

$FND_1 = 0.2$ et $FND_2 = 0.9$

On cherche ensuite sur la table de Gauss Z_1 et Z_2 correspondant à FND_1 et FND_2 ; on trouve $Z_1 = -0.84$ et $Z_2 = 1.28$

D'où : $D_1 = \bar{D} + Z_1 s = 0,6975 - (0,84 \cdot 0,188) \leftrightarrow D_1 = 0,53958 \text{ m}^3/\text{s}$

$D_2 = \bar{D} + Z_2 s = 0,6975 + (1,28 \cdot 0,188) \leftrightarrow D_2 = 0,93814 \text{ m}^3/\text{s}$

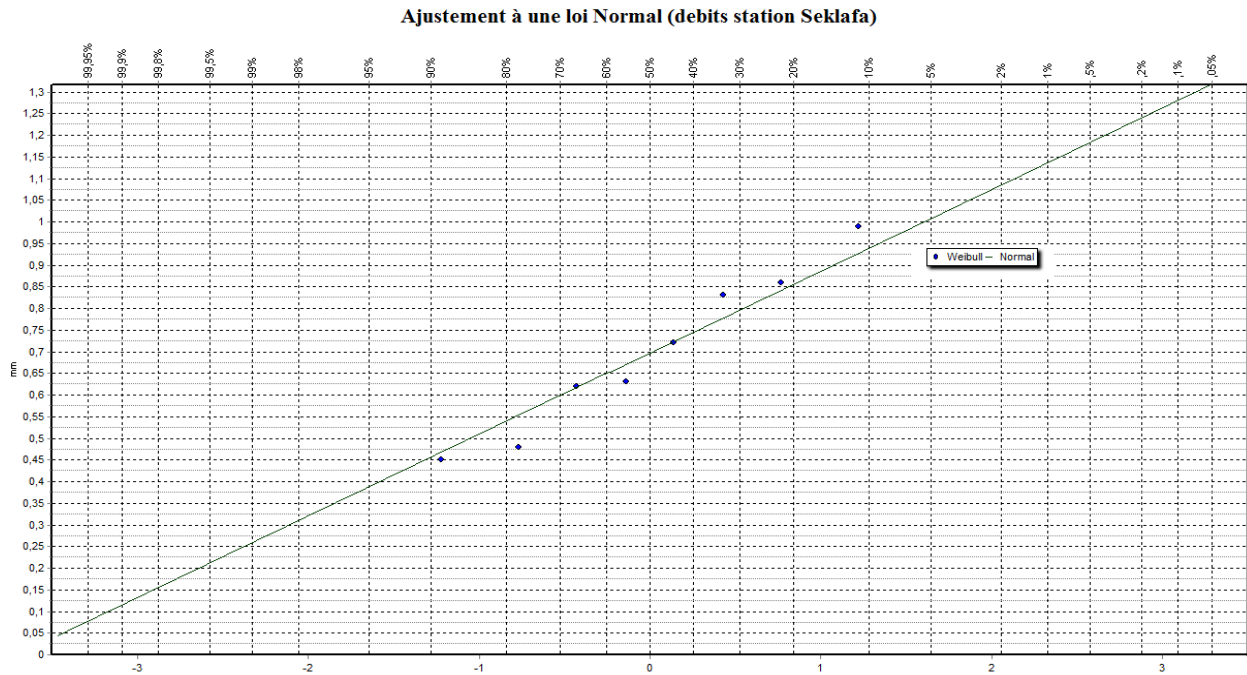


Figure 39: Ajustement à la loi Normale (debits de la station Seklafa)

Tableau 44: Eléments de calcul du X2

test du khi-deux appliqué à la série de pluies maximales à la station de seklafa									
N°	Borne inf X_{i-1}	borne sup X_i	variable réduite Z_{i-1}	variable réduite Z_i	FND _{i-1}	FND _i	f _{oi}	f _{ti}	X ² _i
1	$-\infty$	0,42	$-\infty$	-1,48	0	0,069	1	0,552	0,364
2	0,42	0,48	-1,48	-1,16	0,069	0,123	1	0,432	0,747
3	0,48	0,54	-1,16	-0,84	0,123	0,2	0	0,616	0,616
4	0,54	0,6	-0,84	-0,52	0,2	0,3	2	0,8	1,800
5	0,6	0,66	-0,52	-0,20	0,3	0,42	1	0,96	0,002
6	0,66	0,72	-0,20	0,12	0,42	0,547	0	1,016	1,016
7	0,72	0,78	0,12	0,44	0,547	0,67	1	0,984	0,000
8	0,78	$+\infty$	0,44	$+\infty$	0,67	1	2	2,64	0,155
								X ² =	4,699

Maintenant, l'on cherche sur la table du X² le X² v,α théorique ou : v nombre de degrés de liberté donc $v = k - 1 - r$

k : nombre de classes = 8

r : nombre de paramètres qui définissent exactement la loi loi normale dans notre cas)

r = 2

D'où $v = 8 - 1 - 2 = 5$

α = seuil de signification ou degré de risque, c'est-à-dire la probabilité que le X^2 dépasse une valeur donnée (surface sous la courbe qui se trouve à droite de la valeur du X^2). Notez que la table du X^2 donne la FND= $1 - \alpha = 0.95$ = seuil de confiance.

Pour $v = 5$ et $1 - \alpha = 0.95$, la table donne : $X^2_{5, 0.95} = 11.1$

Comme le X^2 calculé est plus petit que celui donné par la table, on conclut que le X^2 calculé est situé dans la zone favorable et qu'il y a 95% de chances que la loi normale choisie s'ajuste à notre échantillon.

2. Bilan hydrologique

2.1. Introduction

Pour l'établissement de cet essai de bilan, nous avons pu disposer de documents concernant l'étude de faisabilité du barrage de seklafa.

Tableau 45: paramètres du bilan hydrologique relatifs au bassin versant de l'Oued M'zi. (Période 1964-1993)

Sous bassin versant	Précipitations moyennes Annuelles en mm	Débit écoulé en m ³ /s
OUED M'ZI	162	0,70

Cette période couvre les averses de 1985.

2.2. Ruissellement et infiltration

Pour le calcul de l'infiltration et du ruissellement moyen à l'échelle du bassin versant nous avons tenu compte de la lame d'eau écoulée, déterminée à partir de valeurs réellement mesurées à la station hydrométrique de Seklafa et qui représente 24% des précipitations moyennes annuelles. La lame ruisselée et la lame infiltrée moyennes obtenues à partir de la décomposition de l'averse du 01/11/1985 et du 01/12/1985 correspondent respectivement à 11,57% et 0,83% des précipitations. Ces données sont mentionnées sur le tableau n° 46 : (période 1964-1993).

Tableau 46: Ecoulements (superficiel et souterrain) exprimés en mm

Bassin versant	Lame d'eau précipitée	Lame d'eau ruisselée	Lame d'eau infiltrée
Oued M'zi	162	18,74	1,34

D'après ces résultats, l'ensemble des écoulements équivaut à une lame d'eau d'environ 20 mm.

Les ressources en eaux superficielles :

- Superficie du bassin versant : 7338.44 km²
- Précipitation au niveau du bassin versant (1964-1993) puisque cette période couvre les crues de 1985
- Lamé d'eau ruisselée : 18,74mm
- Lamé d'eau infiltrée : 1,34mm

Tableau 47: Ecoulements exprimés en volumes d'eau équivalents

Volume total au niveau Du BV 10 ³ (m ³)	Volume ruisselé 10 ³ (m ³)	Volume infiltré 10 ³ (m ³)
1188827.28	137522.36	9833.5

2.3. Ressources en eaux souterraines (fig. 40)

Tableau 48: Caractéristiques des formations géologiques et volume infiltré

Formations géologiques	perméabilité	Superficie Km ²	Vol. infiltré 10 ³ m ³
QT Sables ,graviers	perméable	1535	2056,9
PC Sables et graviers et argiles sableuse	perméable	180	241,2
MP Sables graviers et argiles	perméable	1380	1849,2
Cs : Calcaire marno calcaire gypse	Imperméable	330	/
Ct : Calcaire dolomitique fracturé	perméable	360	482,4
Ci Alternance grés fracturé et argile	perméable	1511	2024,74
Cic :grés et argile (alternance)	perméable	1880	2519,2
Js : Alternance de marno calcaire	Semi- permeable	160	214,4
Jc : alternance de grés et d'argile	perméable	102	136,68
	Total	7338,5	9524,72.10 ³

Il est à noter que les volumes moyens infiltrés calculés ne tiennent pas compte des exutoires vers d'autres bassins ni des alimentations en provenance des limites extérieures au bassin versant. Pour cela il serait nécessaire pour préciser d'avantage les volumes infiltrés de comparer les limites des bassins versants topographiques et ceux du bassin versant hydrogéologique en tenant compte de la structure géologique (pendage, lithologie etc.....).

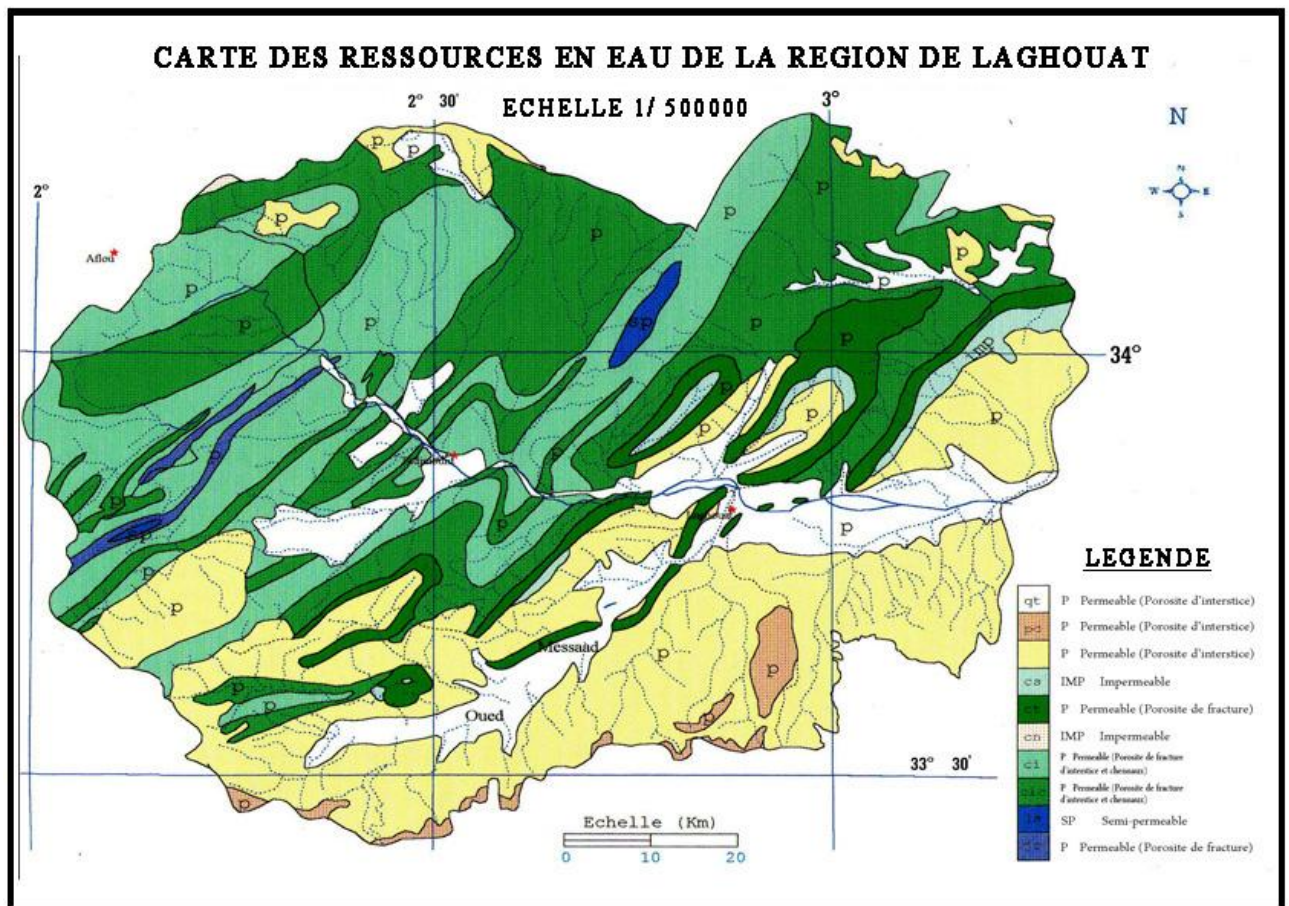


Figure 40: Carte des ressources en eau de la region de Laghouat 1/500.000

3. Transports solides

Du fait de l'amplitude thermique assez élevée en zone aride favorisant les effets du gel et du dégel qui augmentent l'érosion mécanique, le transport solide et plus particulièrement les éléments en suspension transitant dans le réseau hydrographique sont importants.

3.1. Les charriages de fond

Les charriages de fond étant assez difficiles à approcher, lors de l'étude réalisée par **Hydroplan** dans le cadre de cette étude, nous considérons que les charriages de fond représentent En moyenne 10% des éléments en suspensions.

3.2. Les éléments en suspensions

Pour la quantification des éléments en suspension et du fait de la nature géologique peu érodable du sous bassin versant de l'Oued M'zi (prédominance des formations compactes, on considère qu'elle représente 0,3% du débit écoulé selon l'étude de hydroplan).

Le bassin versant de l'oued M'zi pour la période 1984-1985, le débit moyen annuel écoulé au niveau de l'oued M'zi est de $0,480\text{m}^3/\text{s}$. selon les méthodes utilisées, ce débit nous permet d'estimer le volume en suspension transporté annuellement.

➤ **Formule de Tixeront**

$$Ta = 350 \times Le^{-0.15}$$

Le = lame écoulé en mm = 18,74

Ta =érosion spécifique en tKm2./an

$$Ta = 350 \times 18,74^{-0.15} = 226.87 \text{ t/Km}^2/\text{an}$$

➤ **Formule de GAVRILLOVIC :**

Cette relation largement utilisée en Algérie a été élaborée en Yougoslavie.

Elle fait intervenir des caractéristiques physiques et un indice climatique du bassin versant.

La formule est basée sur deux fonctions :

1/ une fonction donnant une la production annuelle de sédiments

$$T_s = T_{sp} \cdot C_{rm}$$

T_{sp} : est le taux de la production annuel des matériaux en (m³/km²/an), il se calcule selon la relation ci-après :

$$T_{sp} = T \cdot \bar{P} \cdot 3.14 \cdot \sqrt{Z^3}, \text{ Tel que } T = \sqrt{\frac{t}{10} + 0.1}$$

m³/km²/an

\bar{P} : Pluie moyenne annuelle du bassin versant ;

- T : coefficient thermique ; 1.35
- t : température moyenne annuelle (17.25°C) ;
- Z : coefficient d'érosion relative tabule en fonction de la description du b.v ;

(Pour un terrain avec une érosion modérée Z=0.55)

$$\text{A.N : } T_{sp} = 261.93 \text{ et } T = 1.35$$

$$T_{sp} = 1.35 \cdot 162 \cdot 3.14 \cdot \sqrt{0.55^3} = 280,106 \text{ m}^3 / \text{km}^2 / \text{an}$$

C_{rm} : est le coefficient de rétention tenant compte des discontinuités spatio-Temporelles dans le flux des matériaux arrachés aux versants.

$$C_{rm} = \frac{\sqrt{P \cdot Alt_{moy}}}{0.25(L + 10)} \quad C_{rm} = \frac{\sqrt{349.72 \times 1082}}{0.25(80400 + 10)}$$

Alt_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant.

L : la longueur du Thalweg principal.

P : périmètre (km)

$$\text{A.N : } C_{rm} = 0.03 \text{ et } T_s = 261.96 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$$

L'évaluation de l'apport solide global est :

$$T_s = 261.96 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$$

4. Comportement hydrologique :

L'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant s'effectue le plus souvent par le biais de l'étude de la réaction hydrologique du bassin face à une sollicitation (la précipitation). Cette réaction est mesurée par l'observation de la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire du système. La représentation graphique de l'évolution du débit Q en fonction du temps t constitue un hydrogramme de crue. La réaction du bassin versant peut également être représentée par un limnigramme qui n'est autre que la représentation de la hauteur d'eau mesurée en fonction du temps.

La réaction hydrologique d'un bassin versant à une sollicitation particulière est caractérisée par sa vitesse (temps de montée t_m , défini comme le temps qui s'écoule entre l'arrivée de la crue et le maximum de l'hydrogramme) et son intensité (débit de pointe Q_{\max} , volume maximum V_{\max} , etc.). Ces deux caractéristiques sont en fonction du type et de l'intensité de la précipitation qui le sollicite mais aussi d'une variable caractérisant l'état du bassin versant « **le temps de concentration des eaux sur le bassin** ».

5. Le temps de concentration:

Le temps de concentration t_c des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier, Il est composé de trois termes différents :

t_h : Temps d'humectation c'est le temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle.

t_r : Temps de ruissellement ou d'écoulement c'est le temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface ou dans les premiers horizons de sol jusqu'à un système de collecte (cours d'eau naturel, collecteur).

t_a : Temps d'acheminement c'est le temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire.

Le temps de concentration t_c est donc égal au maximum de la somme de ces trois termes, soit :

$$T_c = \max(\sum(T_h + T_r + T_a))$$

Théoriquement on estime que t_c est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques.

➤ **Formule de GIANDOTTI :**

$$T_c = \frac{4 \cdot \sqrt{S} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}}}$$

A : Surface du bassin versant en [Km²] ;

L : longueur du talweg principale en [Km];

H_{moy}, H_{min} : respectivement la hauteur moyenne et minimale du B.V en [m].

A.N :

$$T_c = \frac{4\sqrt{7338.44} + 1.5 \cdot 80.4}{0.8\sqrt{1082 - 600}} = 26.3761 \text{ heures}$$

➤ **Formule de CALIFORNIA :**

$$T_c = \left(\frac{0.87 \cdot L^3}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} \right)^{0.386}$$

A.N :

$$T_c = \left(\frac{0.87 \cdot 80.4^3}{1500 - 600} \right)^{0.386} = 11.0307 \text{ heures}$$

➤ **Formule Algérienne (1992)**

Elle a été déterminée par M^{elles} Saadi cherif et Tamani dans leur projet de fin d'études à l'USTHB, en 1992.

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

$$T_C = 0,0055 \cdot S + 0,1657 \cdot L_t + 0,0078 \cdot D_H + 0,821$$

A.N :

$$T_c = 0.005 \times 7338.44 + 0.1657 \times 80.4 + 0.0078 \times 286 = 52,247 \text{ heures}$$

Avec ;

T_C : temps de concentration (h)

S : surface du bassin (km²)

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

D_H : différence entre l'altitude moyenne et l'altitude minimale du B.V (m).

L'application numérique, nous donne pour le bassin versant du M'zi un temps de concentration **T_C=52,24** heures (tableau n° 49), soit deux jours et 17 heures. Cette valeur du temps est relativement acceptable pour notre bassin versant.

Tableau 49: Temps de concentration

Formule	T _c (heure)
GIANDOTTI	26,37
CALIFORNIA	11,03
ALGERIENNE	52,24

➤ **Formule de KIRPICH**

$$T_c = 0.6615L_T^{0.77} I_g^{-0.385} \dots\dots\dots I_g = \frac{D}{L} = 6.33m/km$$

I_g : indice de pente globale

L_p : longueur du talweg principale en Km

Les résultats obtenus sont portes dans le (tableau N°50)

$$T_c = 0.6615.80,4^{0.77} 6,33^{-0.385} = 9,50heures$$

Pour des raisons de sécurité, on opte à la formule de KIRPICH car elle nous donne une valeur du temps de concentration la plus proche de la moyenne des autres formules c'est-à-dire :26

T_c =9,50 heures

T_c =9,50 heures

Tableau 50: Temps de concentration selon Kirpich

Formule	T _c (heure)
KIRPICH	9,50
CALIFORNIA	11,03
Moyenne	10,26

Il faut noter ici la variabilité des résultats obtenus pour le temps de concentration ; la valeur représentative retenue pour le bassin étudié est celle adapté au régime des oueds algériens. Celle-ci dépasse de beaucoup les valeurs déduites des autres méthodes.

6. Vitesse moyenne de ruissellement [1]:

Cette vitesse est donnée par la formule :

$$V_R = \frac{L}{T_c}$$

L : Longueur de talweg principal en [Km];

T_c : temps de concentration en [heure].

A.N

$$V_R = \frac{80.4}{10,26} = 7,83 \text{ km/h}$$

7. Pluies maximales journalières :

Les pluies maximales journalières de rares fréquences sont des pluies génératrices des crues d'importants débits, contre lesquels il faut protéger les ouvrages.

8. Ajustement des pluies maximales journalières :

L'ajustement des pluies maximales journalières sera effectué à l'aide de deux logiciels "Hydrolab" et hydrognomone.

9. Ajustement comparatif avec "Hydrolab" :

On a effectué l'ajustement de la série des pluies maximales journalières à la loi de Gumbel (doublement exponentielle), Galton (log normale), Gauss (normale) et Pearson III à l'aide de logiciel hydrognomone, avec une comparaison des graphes des droites de régression obtenues par les ajustements. Les caractéristiques des échantillons, les tests d'adéquation des deux lois ainsi que l'homogénéité sont calculés directement à partir du logiciel.

La série est homogène, et la loi de Gumbel donne un ajustement satisfaisant, cela est tiré d'après le test d'adéquation et on a :

$P(x_2) > 5 \%$ donc l'ajustement est satisfaisant.

10. Ajustement à la loi de Gumbel avec "Hydrolab" :

C'est la loi à double exponentielle, elle est la plus utilisée pour les ajustements des pluies maximales journalières (fig. 41).

La répartition de la loi de Gumbel s'écrit :

$$F(x_i) = e^{-e^{-\alpha(x-x_0)}}$$

Tableau 51 : Paramètres statiques

m	Pi (mm)	Pi classé ↗	Rang	FNDexp
1	35	5	1	0,0192
2	20	9	2	0,0577
3	10	10	3	0,0962
4	11	10	4	0,1346
5	39	10	5	0,1731
6	12	10	6	0,2115
7	30	10,5	7	0,2500
8	9	11	8	0,2885
9	13	11,3	9	0,3269
10	15	12	10	0,3654
11	5	12	11	0,4038
12	23	12	12	0,4423
13	10	13	13	0,4808
14	12	13	14	0,5192
15	12	14	15	0,5577
16	15,2	15	16	0,5962
17	11,3	15,2	17	0,6346
18	10,5	15,3	18	0,6731
19	10	16	19	0,7115
20	16	20	20	0,7500
21	15,3	23	21	0,7885
22	14	28	22	0,8269
23	28	28	23	0,8654
24	28	30	24	0,9038
25	13	35	25	0,9423
26	10	39	26	0,9808

Tableau 51: Les paramètres statiques de l'échantillon

Paramètre	Quantité
Moyenne [mm]	16,435
Variance [mm]	75,902
Ecart type	8,712

L'équation de la droite de Gumbel s'écrit donc :

$$Y = -\log [-\log (F(x))] \quad \text{D'ou } P_{\max,j} = 14,54 \cdot y + 38,22$$

Y : Variable réduite de Gumbel;

F(x) : Fréquence au non dépassement.

Les résultats des ajustements des pluies sont présentés dans le Tableau 52.

➤ **Ajustement a la loi de Gumbel.**

La droite de Gumbel est représentée par la (Fig N° 41). Les résultats des ajustements des pluies maximales journalières pour les différentes périodes de retour (1000, 100, 20 et 10 ans) sont présenté dans le Tableau 53.

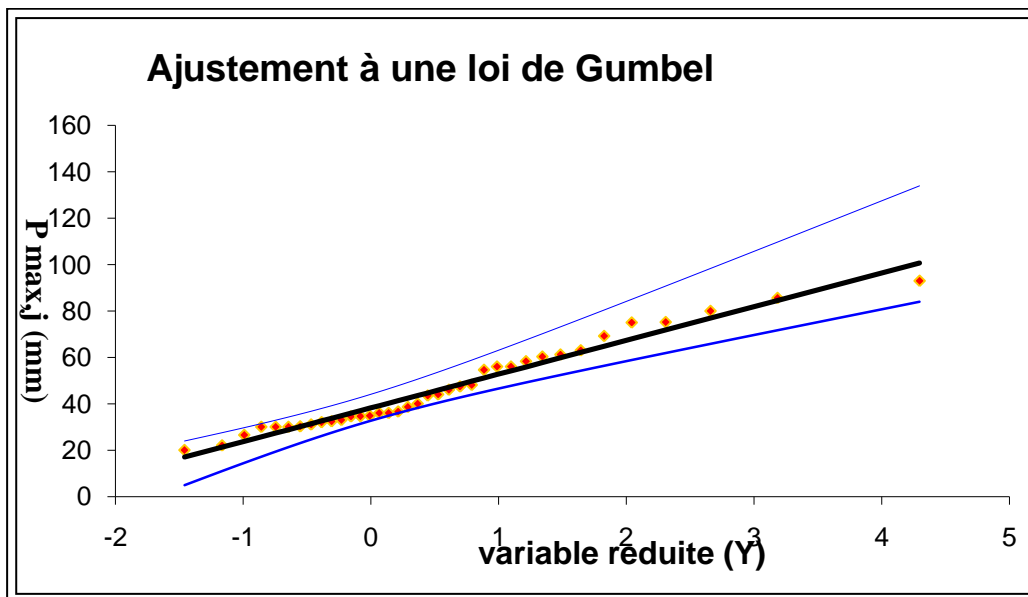


Figure 41: Ajustement à la loi de Gumbel

Tableau 52: les précipitations des différentes fréquences

Période de Retour (an)	1000	100	10
Fréquence	0.999	0.99	0.90
$P_{\max,j}$ (mm)	59,452	43,774	59,452

11. Pluies de courtes durées de différentes fréquences et leurs intensités :

Pour une période donnée (24 h) et une fréquence donnée, on peut estimer les pluies de courtes durées par la formule de Montanami.

$$P_{\max,t,p\%} = P_{\max,j,p\%} \left(\frac{t}{24} \right)^b$$

$P_{\max,t,p\%}$: Pluie de courte durée de même fréquence que $P_{\max,j,p\%}$ [mm].

$P_{\max,j,p\%}$: Pluie maximale journalière pour une fréquence donnée [mm].

t : Temps [heure].

b : Exposant climatique (d'après al station de Laghouat b = 0,27).

Les résultats de calcul de $P_{\max,t,p\%}$ et I_0 sont donnés dans le **Tableau N°54**.

L'intensité de la pluie en mm/h

$$I_t = \frac{P_{ct}}{t}$$

Tableau 53: les précipitations des différentes fréquences

		0,999		0,99		0,9	
		$P_{\max t}$ (mm)	I_0 (mm/h)	$P_{\max t}$ (mm)	I_0 (mm/h)	$P_{\max t}$ (mm)	I_0 (mm/h)
Temps (h)	1	25,206	25,206	18,559	18,559	11,789	11,789
	2	30,394	15,197	22,379	11,189	14,215	7,108
	3	33,910	11,303	24,968	8,323	15,860	5,287
	4	36,649	9,162	26,985	6,746	17,141	4,285
	8	44,192	5,524	32,538	4,067	20,669	2,584
	10	46,936	4,694	34,559	3,456	21,952	2,195
	12	49,305	4,109	36,303	3,025	23,060	1,922
	16	53,287	3,330	39,235	2,452	24,923	1,558
	20	56,596	2,830	41,671	2,084	26,470	1,324
	22	58,072	2,640	42,758	1,944	27,160	1,235
	24	59,452	2,477	43,774	1,824	27,806	1,159

III- ETUDE DES APPORTS

A base de manque de séries hydrométriques au niveau du talweg principal, les apports seront estimés à partir des formules empiriques.

1. Apports liquides

2.1. Apport moyen interannuel

Différentes formules empiriques sont utilisées pour le calcul de l'apport moyen annuel A_0 .

➤ Formule de l'ANRH :

$$\text{On a : } A_{\text{moy}} = 0,915 \cdot P_{\text{moy}}^{2,684} \cdot S^{0,842}$$

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle [m].

S : Superficie du bassin versant [Km²].

AN :

$$A_0 = 0,915 \cdot 0,162^{2,684} \cdot 7338,44^{0,842} = 12,510^6 \text{ m}^3$$

➤ Formule de MEDINGUER :

On a :

$$L_e = 1,024 (P_{\text{moy}} - 0,26)^2$$

L_e : Lamme d'eau écoulée [mm].

P : Pluie moyenne annuelle [m].

AN :

$$L_e = 1,024 \cdot (0,162 - 0,26)^2 = 0,01 \text{ mm}$$

On a encore :

$$A_0 = L_e \cdot S = 0,01 \cdot 10^{-3} \cdot 7338,44 \cdot 10^6 = 73,35 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

➤ Formule de SAMIE :

$$L_e = P_{\text{moy}}^2 (293 - 2,2\sqrt{S})$$

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle en [m] ;

S : Surface du bassin versant en [km²] ;

L_e : Lamme d'eau écoulée en [mm].

A.N :

$$L_e = 0,162^2 (293 - 2,2\sqrt{7338,44}) = 2,72 \text{ mm}$$

$$A_0 = L_e \cdot S = 2,72 \cdot 10^{-3} \cdot 7338,44 \cdot 10^6 = 19,96 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

➤ **Formule de Mallet – Gauthier :**

$$L_e = 0,6 \cdot P_{\text{moy}} (1 - 10^{-0,36 \cdot P_{\text{moy}}^2})$$

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle en [m] ;

L_e : Lamme d'eau écoulée en [m].

A.N :

$$L_e = 0,6 \cdot 0,162 (1 - 10^{-0,360,162^2}) = 0,002 \text{ m}$$

$$A_0 = L_e \cdot S = 0,002 \cdot 7338,44 \cdot 10^6 = 14,67 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

➤ **Formule de Deri II :**

$$A_0 = 0,513 \cdot P_{\text{moy}}^{2,683} \cdot D_d^{0,5} \cdot S^{0,842}$$

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle [m].

S : Superficie du bassin versant [Km²].

D_d : Densité de drainage [km/km²].

A.N :

$$A_0 = 0,513 \cdot 0,162^{2,683} \cdot 1,02^{0,5} \cdot 7338,44^{0,842} = 7,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Tableau 54: Les résultats de calcul sont récapitulés dans le Tableau N° 55

Formule	A_0 (M m ³)
ANRH	12,50
MEDINGUER	73,35
SAMIE	19,96
Mallet – Gauthier	14,67
Deri II	7,1

Si l'on se rabat sur une valeur moyenne entre les 4 méthodes envisagées "Medinguer, Samie, Malet-gauthier et Deri II " , on aurait :

$$A_{\text{moy}} = \frac{12,5 + 73,35 + 19,96 + 14,67 + 7,1}{5} = 25,52 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

$$A_0 = 25,52 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Ce résultat nous semble très sous-estimé, puisqu'il ne représente qu'une partie infime des apports d'eau par les précipitations.

IV- ETUDE DES CRUES

L'étude des crues a pour objectif l'estimation des débits de pointe fréquentiels et la définition de la forme de l'hydrogramme.

1. Formules empiriques

➤ **Formule de SOKOLOVSKY**

$$\text{On a : } Q_{\text{maxp}\%} = \frac{0.28(P_{tc} - H_0)\alpha FS}{T_c}$$

F : Coefficient de forme de la crue : $F = 12 / (4+3.\gamma)$

H_0 : C'est la perte d'eau initiale. Au nord de l'Algérie $H_0=14$ mm

Pour $\gamma = 2.$

Pour un bassin boisé avec un sol peu perméable $2 \leq \gamma \leq 2.5$

Pour un bassin boisé $3 \leq \gamma \leq 4.$

On prend : $\gamma = 2.$ D'où : **F = 1.2**

S : Superficie du bassin (Km^2).

α : Coefficient de ruissellement de la crue pour une période donnée.

$$\alpha_p = \frac{\sqrt{X_p} - \sqrt{H_0}}{\sqrt{X_p} + \sqrt{H_0}} \text{ Avec :}$$

X_p : précipitation de fréquence donnée qui correspond au temps de concentration.

H_0 : perte d'eau initiale

Les résultats de calcul sont consignés dans le Tableau N° 58.

- La formule de Sokolovski est d'usage très répandue chez les hydrologues du Nord de l'Afrique, celle-ci tient compte de plusieurs paramètres caractérisant le bassin versant (la pluie fréquentielle qui correspond au temps de concentration, perte d'eau initiale, le coefficient de ruissellement, la surface du bassin versant, la forme de la crue et du temps de montée de la crue).

Tableau 55: Débits maximums des crues de différentes périodes de retour

Fréquence	0.1%	1 %	10%
Période de retour (an)	1000	100	10
P_{ct} (mm)	59,452	43,774	27,806
α %	0,35	0,27	0,16
$Q_{\text{maxp}\%}$ (m^3/s)	3700,74	1869,98	513,61

➤ **Formule de TURRAZA:**

On a:

$$Q_{\max p\%} = \frac{C \cdot I_{tc}}{3.6} \cdot A$$

A : Superficie du bassin versant (Km²).

C : Coefficient de ruissellement en fonction de la probabilité donnée.

I_{tc} : Intensité des pluies pour une fréquence donnée (mm/h).

Tableau 56: Intensité des pluies par fréquence

Fréquence (%)	0.1	1	10
C	0.8	0.7	0.6
I _{tc}	2,477	1,824	1,159
Q _{max} (m ³ /s)	4039,04	1464	1417,54

2. Formules empiriques pour la détermination de la crue

➤ **Formule de MALLET - GAUTHIER :**

On a:

$$Q_{\max p\%} = \frac{2 \cdot K \cdot \log(1 + A \cdot P_{\text{moy}}) \cdot S \cdot \sqrt{1 + 4 \log T - \log S}}{\sqrt{L}}$$

Q_{max,p%} : Débit maximum pour une fréquence donnée (m³/s).

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle [m].

S : Superficie du bassin versant [Km²].

L : Longueur du talweg principal [Km].

K : coefficient dépendant des caractéristiques du bassin varie entre 1 et 3 [K = 2].

A : Paramètre du bassin varie entre 20 et 30 [A = 25].

T : période de retour [an].

$$Q_{\max, p\%} = \frac{2 \cdot 2 \cdot \log(1 + 25 \cdot 0,162) \cdot 7338,44 \cdot \sqrt{1 + 4 \log T - \log 7338,44}}{\sqrt{80,4}} = 85,04 \cdot \sqrt{\log T - 0,1680}$$

Tableau 57: récapitulatif des résultats de la formule Mallet- Gauthier

Période de retour (an)	1000	100	10
Q _{max} (m ³ /s)	6957,90	5217,79	2462,58

Tableau 58: récapitulatif des résultats de débit de crue

Formule	$Q_{0,1\%}(m^3/s)$	$Q_{1\%}(m^3/s)$	$Q_{10\%}(m^3/s)$
Mallet - Gauthier	6957,90	5217,79	2462,58
Sokolovsky	3700,74	1869,98	513,61
Terraza	4039,04	1464	1417,54
Moyenne	4899,22	2835,10	1464,58

L'analyse des résultats obtenus par les quatre formules montre qu'il n'y pas de grandes différences constatées, donc on prend le débit de crue moyen

3. Hydrogramme de crues :

L'hydrogramme de crue sera établi selon la méthode de Sokolovsky. Cette méthode assimile l'hydrogramme de crue à deux équations paraboliques l'une pour la montée de la crue et l'autre pour la décrue.

- Pour la montée de la crue

$$Q_m = Q_{max} \left(\frac{t}{t_m} \right)^x$$

- Pour la décrue

$$Q_d = Q_{max} \left[\frac{(t_d - t)}{t_d} \right]^y$$

Où :

t_m : Temps de montée de la crue [$t_m=t_c=3$].

t_d : temps de la décrue [$t_d=\delta.t_m$].

x,y : puissances des courbes [$x=2 ; y=3$].

δ : Coefficient qui dépend des caractéristiques du bassin versant.

Tableau 59: Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue δ .

Condition	δ
petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants dénudés et faiblement perméables.	2 à 2,5
petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants brisés ou perméables, moyens cours d'eau avec terrasses de lit majeur normales.	3 à 4
Grands et moyens cours d'eau avec des terrasses de débordements étendues.	4 à 7

Pour notre bassin nous prenons en considération : $\delta=2,5$.

A.N :

$$t_d = \delta * t_m = 2.5 * 10.06 = 25.15 \text{ heures.}$$

Pour la montée :

$$Q_m = Q_{\max} \left(\frac{t}{10.06} \right)^2$$

Pour la décrue :

$$Q_d = Q_{\max, p\%} \cdot \left(\frac{(25.15 - t)}{25.15} \right)^3$$

Les résultats obtenus pour les différentes fréquences sont représentés dans le Tableau suivant.

Tableau 60: Résultats de calcul pour le tracé de l'Hydrogramme de crue

Q(m3/s)0,1 %	Q(m3/s) 1%	Q(m3/s)10 %	Q(m3/s)0,1 %	Q(m3/s) 1%	Q(m3/s)10 %	Q(m3/s)0,1 %	Q(m3/s) 1%	Q(m3/s)10 %
12,10	7,00	3,62	3820,90	2357,48	1217,85	426,91	281,79	281,79
48,41	28,01	14,47	3578,64	2211,09	1142,23	372,02	247,05	247,05
108,92	63,03	32,56	3346,83	2070,90	1069,80	322,04	215,28	215,28
193,64	112,06	57,89	3125,26	1936,76	1000,51	276,75	186,36	186,36
302,56	175,09	90,45	2913,70	1808,54	934,27	235,93	160,15	160,15
435,69	252,12	130,24	2711,90	1686,11	871,02	199,32	136,53	136,53
593,02	343,17	177,28	2519,64	1569,33	810,70	166,72	115,35	115,35
774,55	448,22	231,55	2336,69	1458,07	753,22	137,88	96,48	96,48
980,29	567,28	293,05	2162,81	1352,20	698,53	112,57	79,79	79,79
1210,24	700,35	361,79	1997,79	1251,59	646,55	90,57	65,14	65,14
1464,39	847,42	437,77	1841,38	1156,09	597,22	71,64	52,41	52,41
1742,74	1008,50	520,98	1693,35	1065,58	550,46	55,55	41,46	41,46
2045,30	1183,58	611,43	1553,48	979,92	506,21	42,07	32,14	32,14
2372,07	1372,68	709,11	1421,53	898,97	464,40	30,97	24,34	24,34
2723,04	1575,78	814,03	1297,27	822,62	424,95	22,01	17,92	17,92
3098,21	1792,88	926,18	1180,47	750,71	387,81	14,98	12,74	12,74
3497,59	2024,00	1045,57	1070,90	683,12	352,89	9,63	8,67	8,67
3921,17	2269,12	1172,20	968,34	619,72	320,14	5,73	5,57	5,57
4368,96	2528,25	1306,06	872,53	560,36	289,48	3,06	3,32	3,32
4840,95	2801,38	1447,16	783,27	504,92	260,84	1,38	1,77	1,77
5337,15	3088,52	1595,50	700,31	453,27	453,27	0,47	0,80	0,80
4899,22	3389,67	1751,07	623,43	405,26	405,26	0,08	0,27	0,27
4612,79	2835,10	1464,58	552,38	360,77	360,77	0,00	0,05	0,05
4337,75	2669,35	1378,95	486,96	319,66	319,66			
4073,86	2510,19	1296,73						

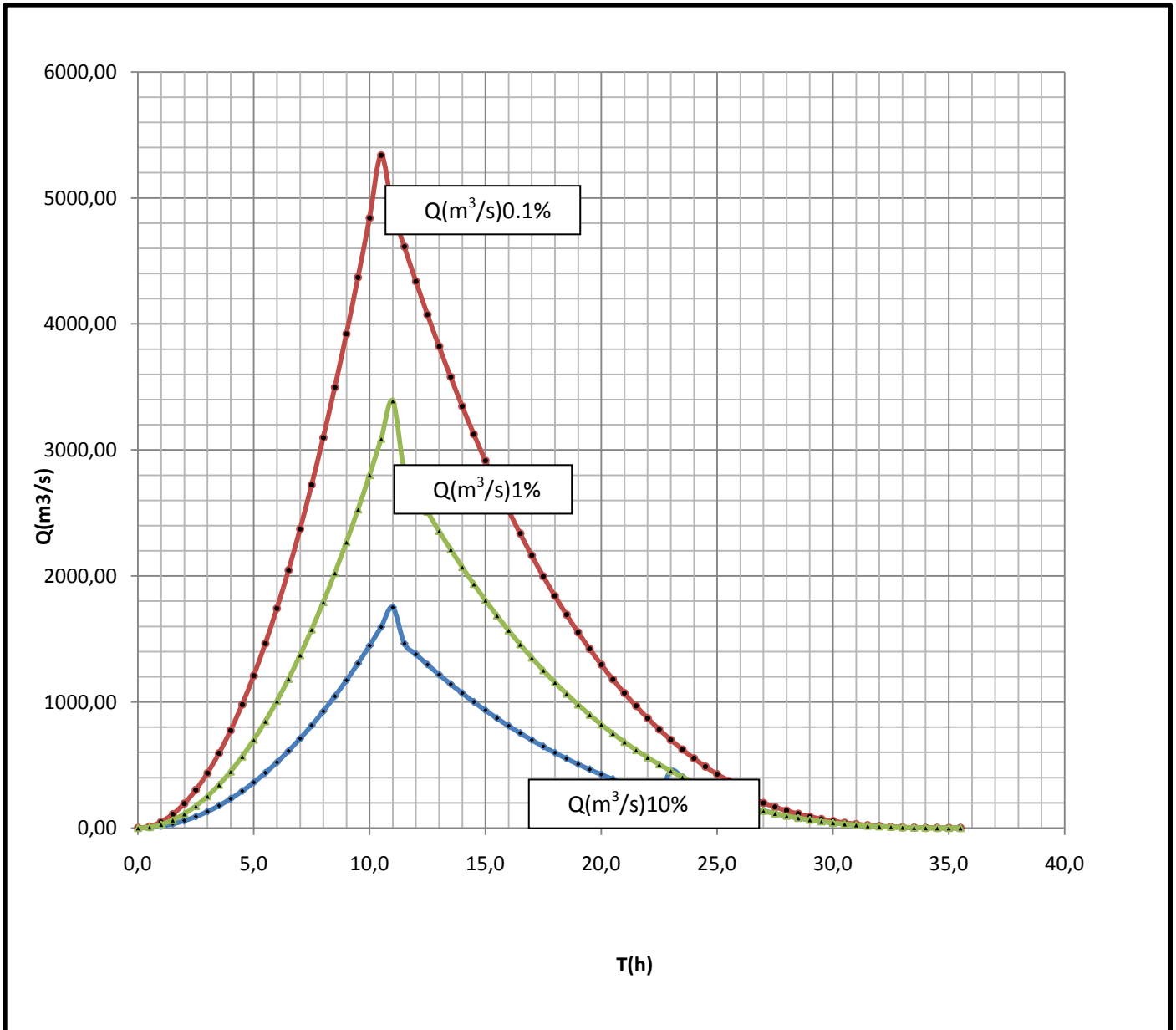


Figure 42: Hydrogramme des crues

CHAPITRE V

HYDROGÉOLOGIE

I. CONSÉQUENCES DE LA LITHOLOGIE ET DE LA FRACTURATION SUR LA GENESE DES EAUX SOUTERRAINES

L'épaisseur des strates et la nature lithologique du matériau composant les aquifères interviennent directement dans la dynamique des écoulements des eaux souterraines. Les sables, les grés à double perméabilité (*Continental Intercalaire*) et les calcaires fissurés (formations Jurassiques) constitueront les principaux réservoirs des Monts du Djebel Amour.

Suivant leur état de consolidation et leur granulométrie (grés sableux, friable, quartzites), l'épaisseur du banc ou sa structure interne, on peut passer d'un banc à l'autre d'un simple débit en cubes à un débit pénétratif donnant à la roche un aspect haché. Par exemple, dans les grés à stratifications obliques de la région de Aïn Mansour, plusieurs systèmes de diaclases sont réfractés suivant des feuillets sédimentaires (photo 06).



Photo 06 : Grés de la région de Aïn Mansour

Dans ce type de roches, la fracturation se traduit par des fractures assez souvent ouvertes auquel il faudrait ajouter la part de la désintégration thermique des roches. Dans les grés du *Continental Intercalaire*, les fractures sont le plus souvent répétitives et donnent un débit en

blocs pseudo cubiques dont le plus bel exemple se situe sur les hauteurs du Djebel Milok (Photo 07).

Dans la barre gréseuse entourant l'anticlinal du Djebel Milok et faisant partie des grès à dragées inférieures, la fracturation d'ordre décimétrique à hectométrique se manifeste par des directions liées aux niveaux lithologiques. C'est ainsi que deux niveaux où la fracturation est caractérisée par des diaclases N 160°E 60°NW, encadrent un niveau où les fractures sont orientées N120°E.



Photo 07 : Fracturation d'ordre décimétrique et hectométrique en contrebas du Djebel Milok

Il y a lieu de noter à travers l'impact conjugué de la lithologie et de la fracturation, une condition incontournable dans l'identification des différents niveaux aquifères. On peut distinguer :

- Les formations à perméabilité double d'interstices et de fissures où on peut citer en particulier les grès Barrémien et Albien.
- Les formations à perméabilité d'interstices constituées par les niveaux Mio-Pliocène.

De point de vue structural :

- Les anticlinaux constituent des frontières entre les nappes du Barrémo-Albo-Aptien.
- Les synclinaux forment des cuvettes assez larges où se trouvent les aquifères les plus importants comme c'est le cas de celui du synclinal de Dakhla.
- Le réseau de failles et de fissures jouent le rôle de drains naturels où se manifeste un écoulement préférentiel des eaux souterraines.

II. APPORT DE LA GÉOPHYSIQUE:

1. prospection géophysique de la vallée de l'oued M'Zi

Dans ce chapitre on s'intéressera particulièrement à l'étude de la géométrie et de la nature des différentes formations et structures de la région de Laghouat en se basant sur la réinterprétation des résultats de l'étude géophysique réalisée par la société Strojexport-Prague en 1974-1977.

Par ailleurs l'entreprise ENAGEO (1986-1987) et conjointement, en s'appuyant sur les données géologiques et hydrogéologiques acquises à partir de la réalisation de nouveaux forages et des campagnes piézométriques récemment réalisées. L'étude géophysique réalisée par E.NA.GEO (1986), couplée aux données géologiques et hydrogéologiques acquises à partir de la réalisation de nouveaux forages et la campagne piézométrique (2011) vont nous servir de base pour un étalonnage plus précis des sondages électriques.

2. Travaux réalisés

L'étude géophysique réalisées par l'ENAGEO comporte 123 sondages électriques répartis sur des profils d'orientation SE-NW distants entre eux de 1500 mètres réalisés perpendiculairement aux structures plissées atlasiques. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un dispositif Schlumberger avec une ligne d'émission $AB= 200$ m et $AB= 400$ m en ce qui concerne le secteur nous avons pris en considération les quatorze profils.

La société Strojexport-Prague a effectué trois cents sondages électriques avec dispositif Schlumberger avec $AB = 1000$ mètres. Les distances entre les sondages électriques sont de 500 m en général, sauf pour les profils 13 à 18 où elles ne sont que de 300 m. En ce qui concerne le secteur étudié nous n'avons pris en considération que des profils représentant quelques sondages électriques (fig. 43).

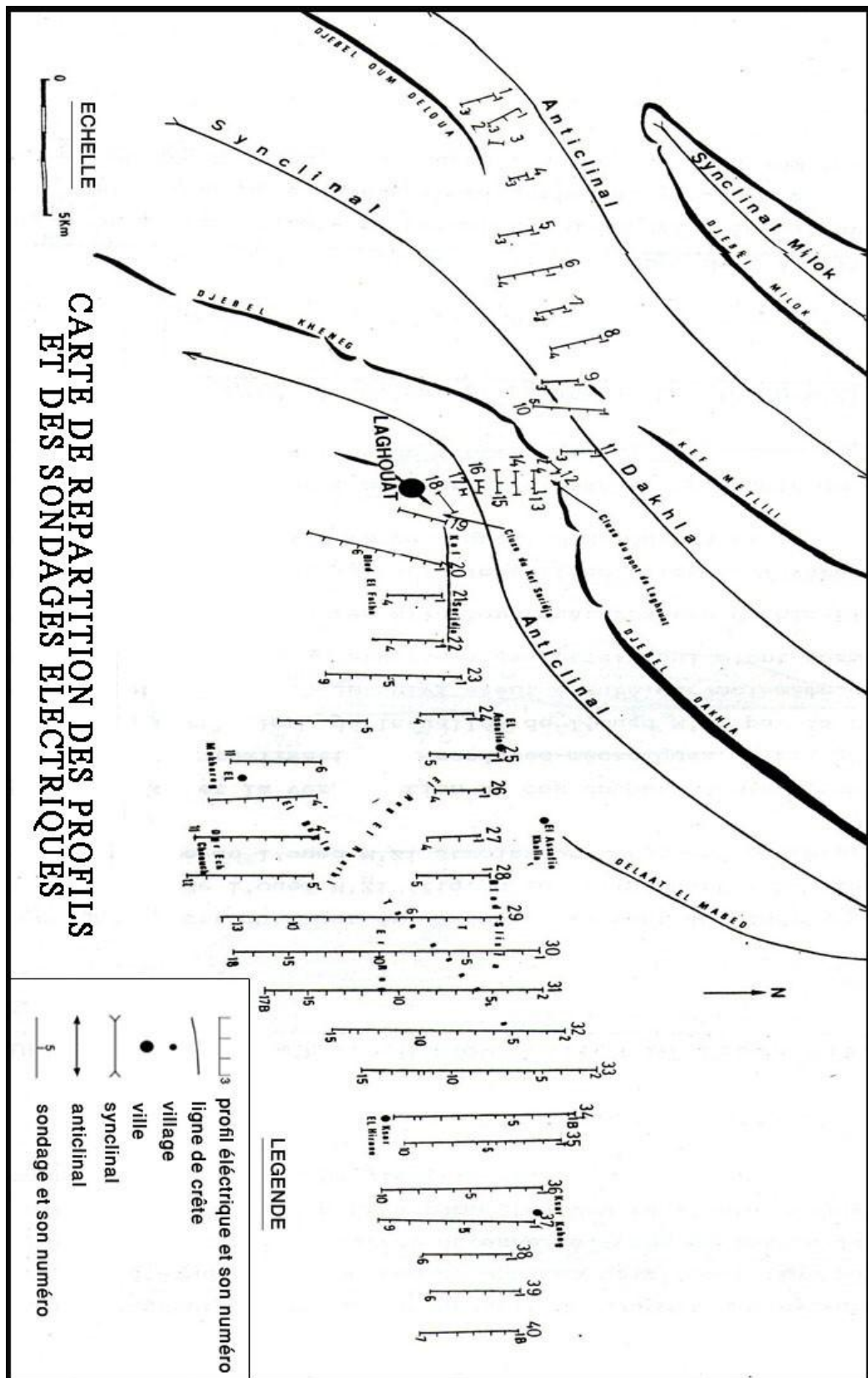


Figure 43: Carte de répartition des profils et des sondages électriques (Strojexport, 1977)

3. Échelle des résistivités adoptées

L'échelle des résistivités adoptée par l'E.NA.GEO en ce qui concerne les différentes formations géologiques est représentée au tableau N°62.

Tableau 61: Echelle de résistivité des terrains

RÉSISTIVITÉS (OHM.M)	LITHOLOGIE	AGE
15-80	ARGILES ET ARGILES GRÉSEUSES	VALANGINIEN- BARRÉMIEN
100-600	GRÉS	VALANGINIEN- BARRÉMIEN
95-300	CALCAIRES ET GRÉS	ALBO-APTIEN
20-50	ARGILE	CÉNOMANIEN
100-135	CALCAIRES	TURONIEN

4. Principaux résultats

Les travaux de terrain et les principaux résultats des sondages électriques ont permis l'établissement :

- Des coupes géo électriques donnant l'épaisseur, la résistivité, les variations latérales des différentes formations et permettant ainsi de préciser les différentes structures (fig. 44).

- Des cartes de résistivités apparentes en ligne d'émission AB = (200 -1000 m) et ce pour suivre l'évolution latérale des différents facies ainsi que leur variation avec la profondeur.

- De la carte du mur du premier niveau résistant susceptible d'être aquifère et de celle de son épaisseur pour la détermination de sa structure. De la carte des résistivités transversales pour avoir une idée sur les zones à fortes transmissivités.

Dans la région du Milok, il est à noter l'existence d'une structure plissée dont la partie centrale correspond à un synclinal dissymétrique présentant un flanc plus redressé au SE et où affleurent essentiellement des formations calcaires suivi de l'anticlinal érodé dont le cœur est occupé par le Crétacé inférieur, dont la géométrie et la nature lithologique sont assez variables d'un endroit à un autre. Il a été mis en évidence l'existence d'une structure plissée constituée par les formations de l'Albien -Cénomaniens, Valanginien-Barrémien, représentée par deux niveaux résistants séparés par un horizon conducteur d'une résistivité comprise entre 24 et 85 ohms.m. Cette structure ainsi définie montre :

- Une diminution de l'épaisseur du niveau conducteur représenté par des argiles et des argiles gréseuses du SW vers le NE.

- Une diminution de la résistivité du second niveau résistant constitué par des grès du centre de l'anticlinal vers les bordures NW et SE.

- Les sondages montrent un rétrécissement du synclinal de la Dakhla et ce au niveau de sa bordure NE affectée d'un accident tectonique mettant en contact les formations du Valanginien-Barrémien et celles du Turonien.

- Il est à noter que le toit du second niveau résistant est moins profond. Le niveau argileux intercalaire est moins épais. L'accroissement de la résistivité et de l'épaisseur du niveau argileux supérieur ainsi qu'un approfondissement du toit du second horizon résistant.

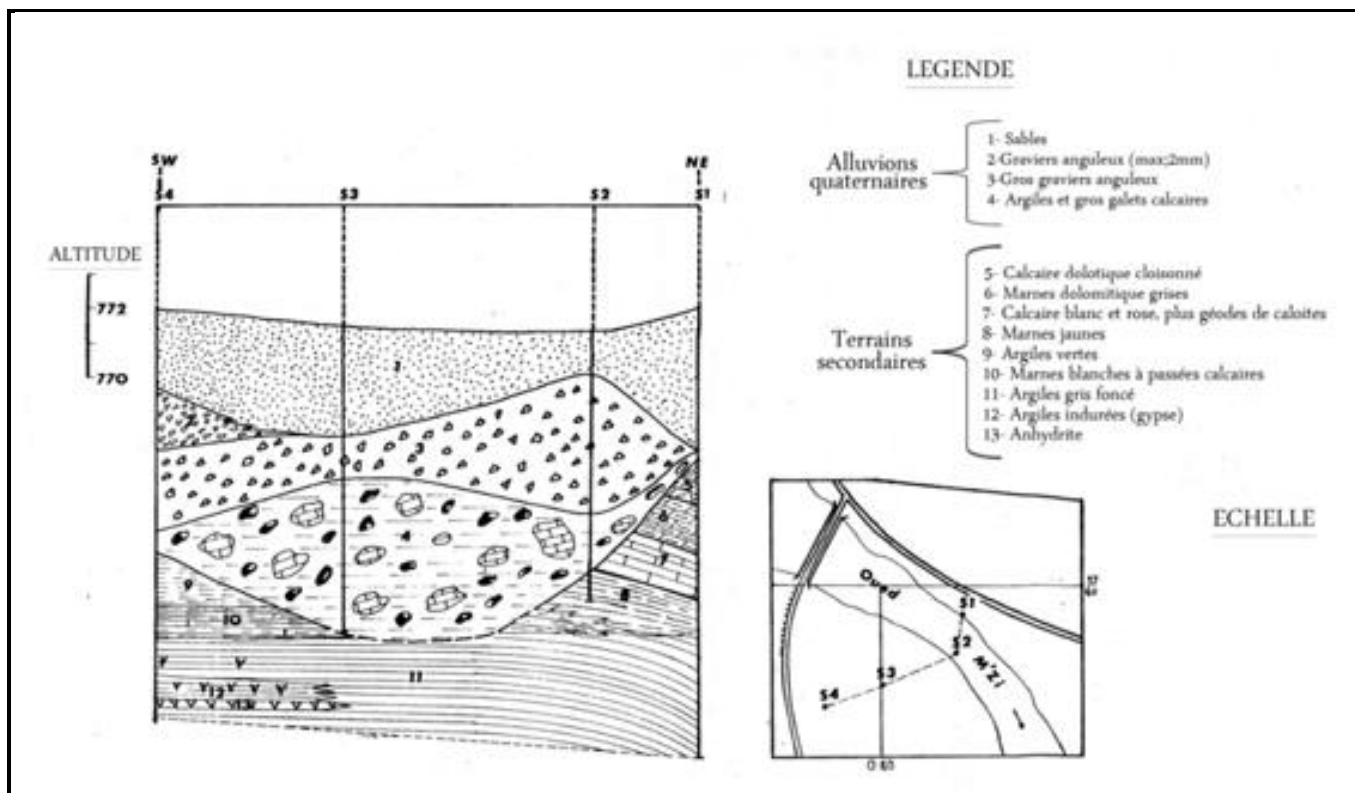


Figure 44: Coupe géologique :pont de Laghouat(Strojexport, 1977)

5. Interprétation des coupes géoélectriques

Les profils de 1 à 10 couvrent le synclinal de la Dakhla ainsi que les anticlinaux qui le borde de part et d'autre. Au niveau du synclinal de la Dakhla tous les profils mettent en évidence deux formations résistantes séparées par une formation conductrice. Les deux premiers niveaux appartiennent au Tertiaire continental dont l'épaisseur dépassent les 400 m. Au-dessous le niveau résistant correspond au Sénonien – Turonien.

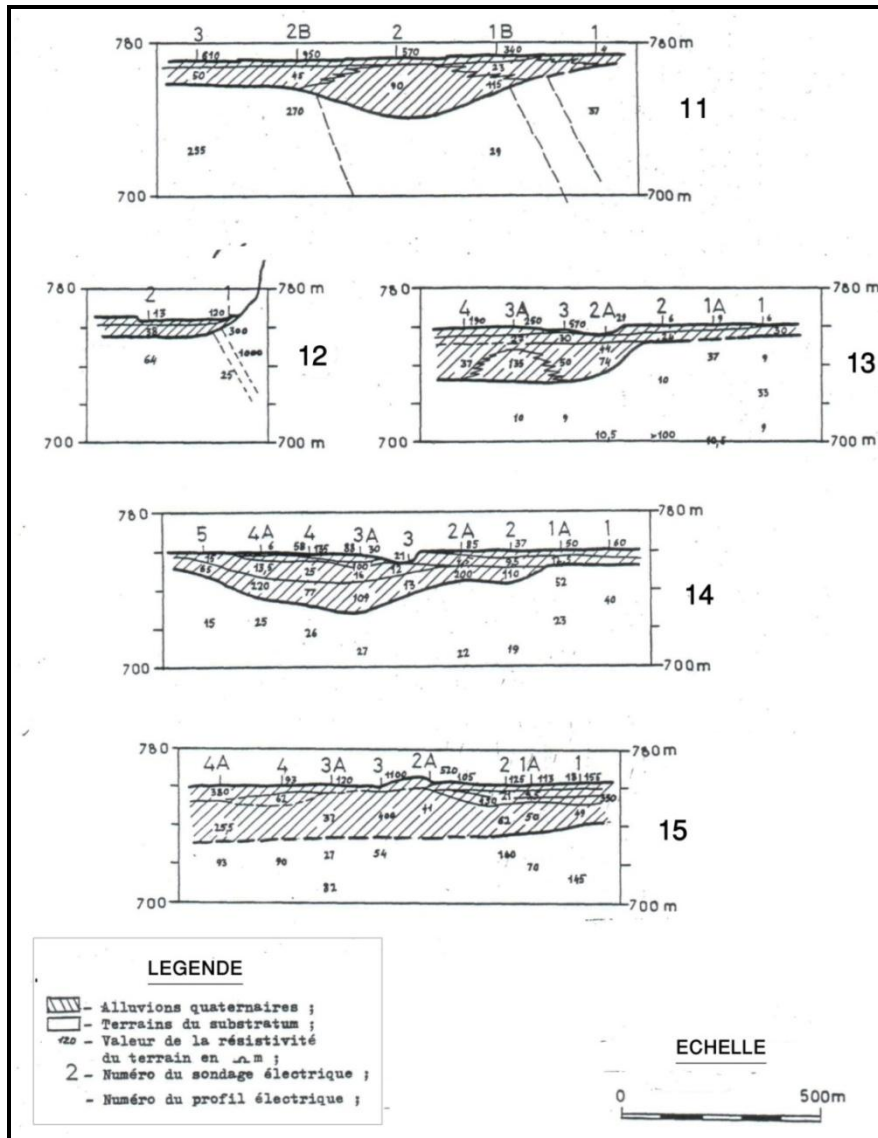


Figure 45: Coupe géologique de la vallée de l'oued M'zi (Strojexport, 1977)

De 11 à 15, les profils couvrent une grande partie du djebel Daloua et montrent la même succession que précédemment. Des alluvions au niveau du pont de Laghouat–Kef Seridja et rocher des chiens (fig. 45).

-La partie supérieure : des sables, de gros graviers parfois de taille moyenne.

-La base : des argiles, galets, et des blocs de calcaire provenant certainement d'éboullis du Turonien avoisinant.

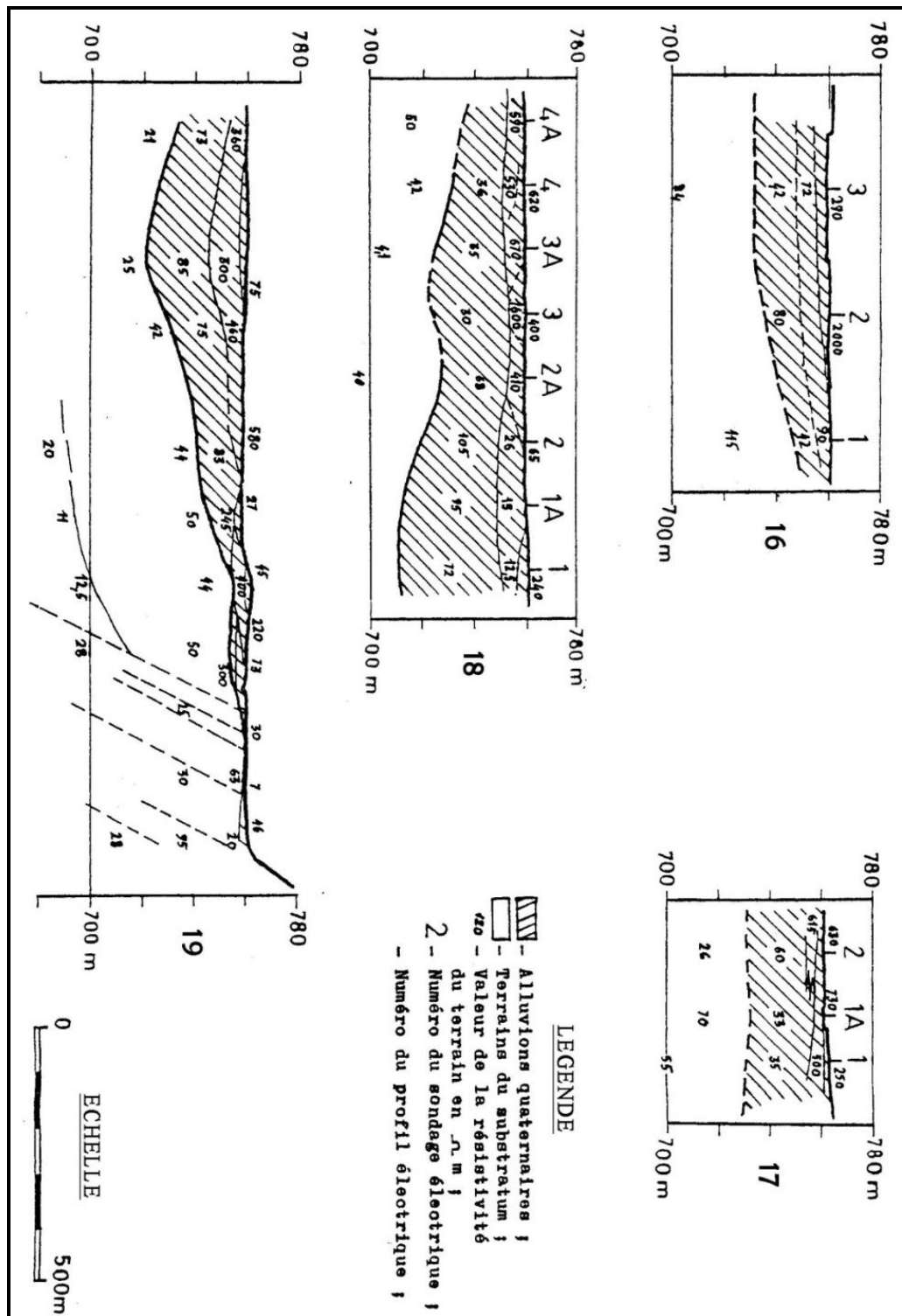


Figure 46: Coupes Geo électriques de la vallée de l'oued M'zi (Strojexport, 1977)

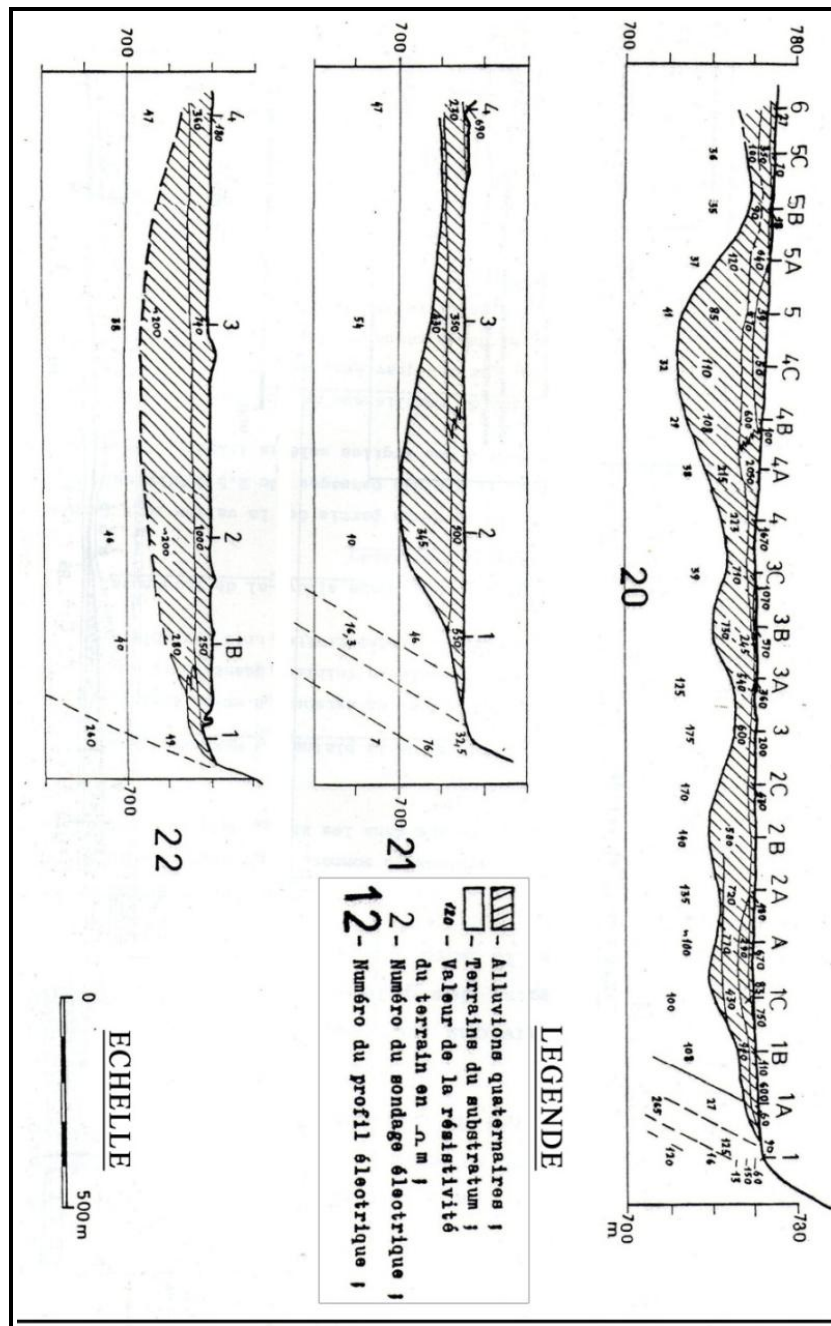


Figure 47: Coupes géologiques de la vallée de l’oued M’zi (Strojexport, 1977)

Les figures 46(coupes 16, 17, 18, 19) et fig. 47 (20, 21, 22) manifestent un remplissage formé de gravier plus moins sableux (remplissage au niveau de la vallée de l’oued Mzi). L’aquifère intéresse un ensemble de formations constituées exclusivement d’alluvions argilo-sableuses, de galets emballés dans du sable, qui s’étendent au niveau de la dépression de la plaine Ksar El Hirane-Kabeg.

III. LES PRINCIPAUX AQUIFÈRES :

L'étude géologique a permis de mettre en évidence plusieurs horizons aquifères d'importance variables. Quelques sources émergent à la faveur des formations Calcaire du Turonien-Cénomanien, comme celles qui apparaissent au niveau de l'anticlinal érodé de Hamda. Dans ce volet de l'étude, on va s'intéresser essentiellement à la nappe du Barrémien-Valanginien de la région de Hamda, le Mio-plio-quaternaire de la plaine de ksar El Hirane et le champ captant du Turonien au niveau du synclinal de la Dakhla (fig. 48).

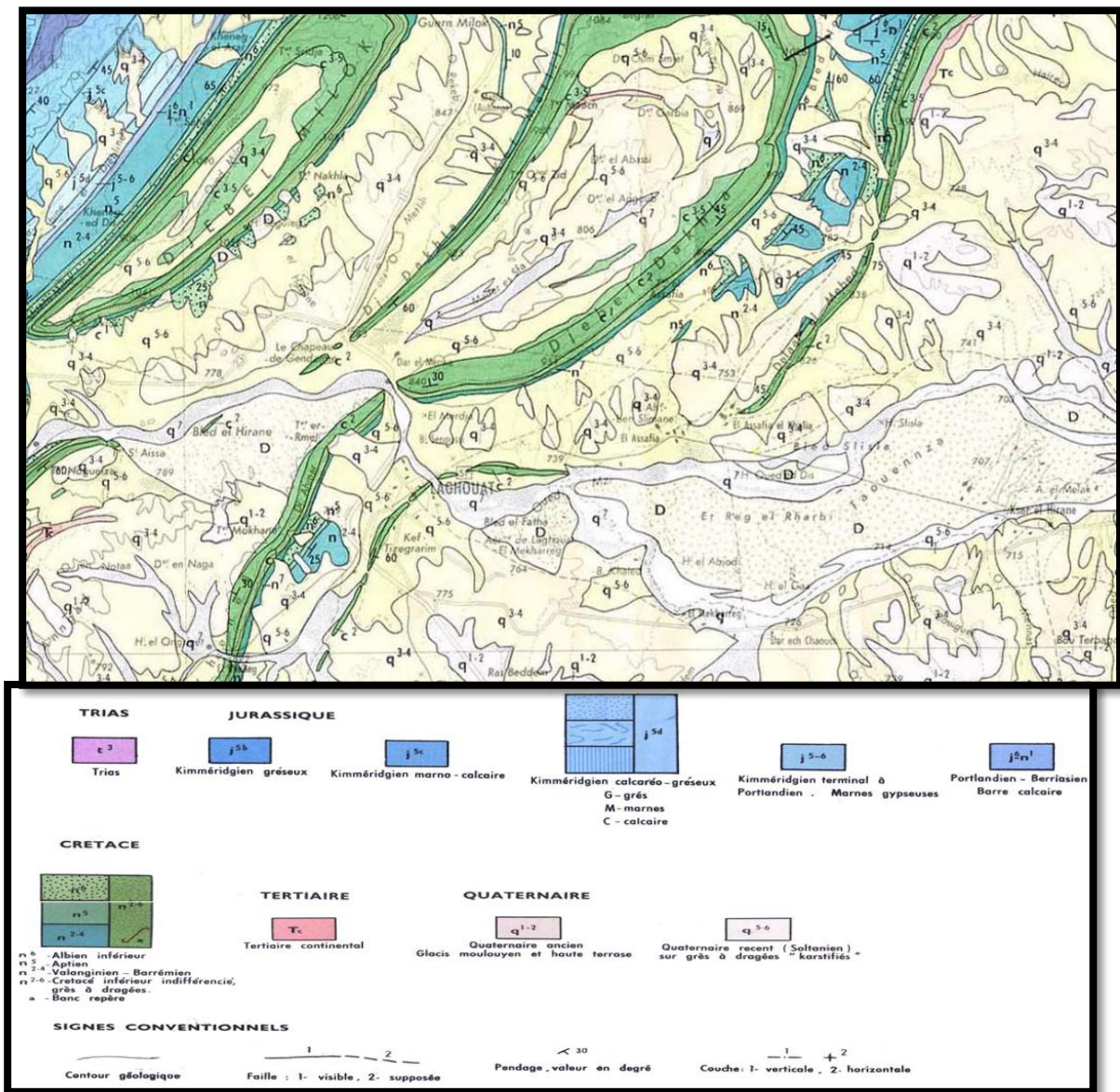


Figure 48: Extrait de la Carte géologique de Laghouat 1/200.000.(région de Milok)

L'étude géologique a mis en évidence, l'existence de calcaires dolomitiques fissurés au niveau du Djebel Milok, et le synclinal de la Dakhla. La nappe est contenue dans le réseau de fissures affectant ces formations. Ces fissures présentent une direction préférentielle N 130° E, postérieure aux plissements atlasiques.

L'émergence de la source du Milok au contact des calcaires dolomitiques et les marnes Cénomaniennes permettent de présumer de l'existence d'une nappe de type karstique.

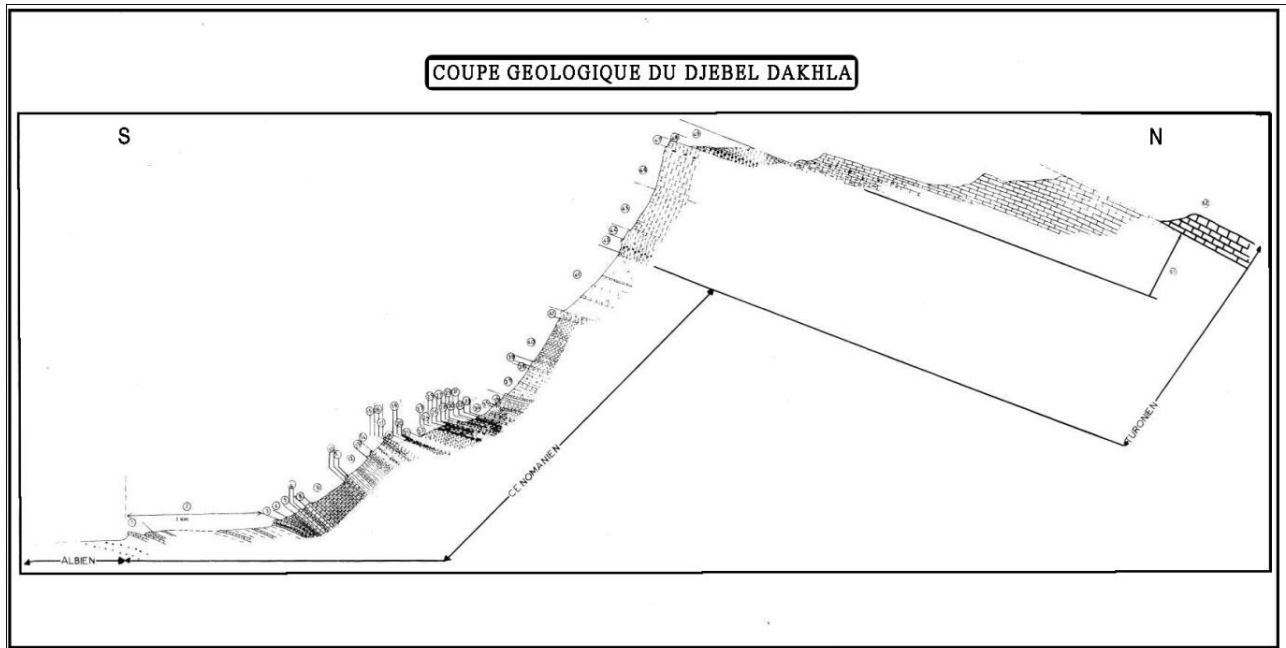


Figure 49: Coupe géologique du Djebel Dakhla

COUPE GEOLOGIQUE DU DJEBEL DAKHLA (fig. 49) de bas en haut, on a recoupé:

- 1) Bancs calcaires et niveaux importants de silex
- 2) Alternance monotone de marnes et de marno-calcaires
- 3) Marnes gypseuses
- 4) Calcaires marneux
- 5) Marnes verdâtres (1,5 m)
- 6) Gros banc calcaire
- 7) Intervalle marno-calcaire, à faune mal conservée (15 m)
- 8) (2 m) gros bancs calcaires
- 9) (20 m) calcaires marneux et marno-calcaires
- 10) Marnes gypseuses
- 11) Banc calcaire de 1 m, altéré en nids de guêpes, à traces de Lamellibranches
- 12) 15 m de marno-calcaires à Brachiopodes
- 13) (4 m) Bancs calcaires à traces de Lamellibranches et Ammonites, en voie de pyritisation
- 14) (6 m) Marnes argileuses verdâtres, légèrement gypseuses. On note dans la partie centrale une intercalation peu importante de marno-calcaires en bancs fracturés, en plaquettes, de 3 à 10 cm
- 15) 2 m de calcaires marneux
- 16) 1 m de marnes
- 17) Banc calcaire de 1 m, très fracturé, à patine rouille et à cassure crème
- 18) (2 m) marnes verdâtres

- 19) Bancs calcaires marneux, jaunes verdâtres, de 20 cm
- 20) Calcaire marneux rognoneux
- 21) Marnes verdâtres
- 22) (5 m) Bancs calcaires marneux et gypseux de 30 à 40 cm (les espaces entre les bancs sont occupés par du gypse)
- 23) Marnes finement litées en plaquettes et gypse cristallisé
- 24) Bancs marno-calcaires de 50 cm, verdâtres
- 25) Marnes verdâtres
- 26) (1,5m) marno-calcaires en bancs de 10 à 20 cm
- 27) (1f5 m) marnes verdâtres avec cristaux de gypse
- 28) Banc massif de calcaire marneux, très fracturé, à patine rouille, à cassure blanchâtre, et à éléments fins
- 29) Banc de 1 m de calcaire marneux fin
- 30) Marnes en petits bancs discontinus et recristallisations de gypse dans les espaces interbancs et dans les fissures. Au sommet apparition d'un niveau à gypse
- 31) Banc calcaire marneux de 80 cm, blanchâtre à la cassure
- 32) Marnes et calcaires marneux en bancs discontinus
- 33) Banc calcaire marneux
- 34) (5 m) marnes blanchâtres, très gypseuses et niveaux de gypse en petits cristaux à la base
- 35) Banc marno-calcaire de 70 cm
- 36) Marnes et gypse cristallisé en "rosettes"
- 37) (20 à 15 m) marnes gypseuses et bancs marno-calcaires
- 38) Banc marno-calcaire de 90 cm
- 39) Banc de gypse de 2 m
- 40) 25 m de marno-calcaires en bancs de 10 à 20 cm, très fracturés, disloqués et rares intercalations de marnes dans la partie supérieure
- 41) (30 m) bancs dolomitiques et calcaires
- 42) (15 m) de marnes gypseuses verdâtres et rares passées marno-calcaires. La partie supérieure est représentée par des marnes finement litées
- 43) Calcaires rouille, à cassure blanchâtre, très fracturés, très friables. La partie supérieure est légèrement plus dolomitique.
- 44) (5 m) calcaires sublithographiques, durs et blancs
- 45) Niveau dolomitique, très fracturé à texture grenue
- 46) (20 m) gros bancs calcaires et dolomitiques de 50 cm à 1 m, bien cristallisé
- 47) (3 m) calcaires en gros bancs, altérés en nids de guêpes, à rognons de silice
- 48) (3 m) calcaires à nodules, calcaires noirs, blanchâtres à la cassure
- 49) (7 m) calcaires dolomitiques finement cristallisés, en bancs de 5 à 10 cm
- 50) (5 m) à la base, calcaires blanchâtres finement cristallisés, blanchâtres à la cassure. Les bancs sont très mal individualisés, et parfois caverneux. Ces niveaux sont fossilifères (moules externes de Mollusques). Au-dessus, 5 m de calcaires à silice sur lesquels viennent des bancs plus massifs et moins fracturés.
- 51) Niveau à calcaires plus ou moins dolomitiques en gros bancs
- 52) Zone de recouvrement Mio-Pliocène (gréseux avec éléments bréchiques).

2. Aquifère du complexe gréseux

Il s'agit d'un aquifère multicouche formé par une alternance de grés et de marnes du Barrémien- Valanginien (fig. 50).

Il constitue la nappe la plus importante de la région de Hamda, et une partie de la ressource en eau pour l'alimentation en eau potable de la ville de Laghouat ainsi que l'irrigation des différents périmètres agricoles aux alentours de Hamda.

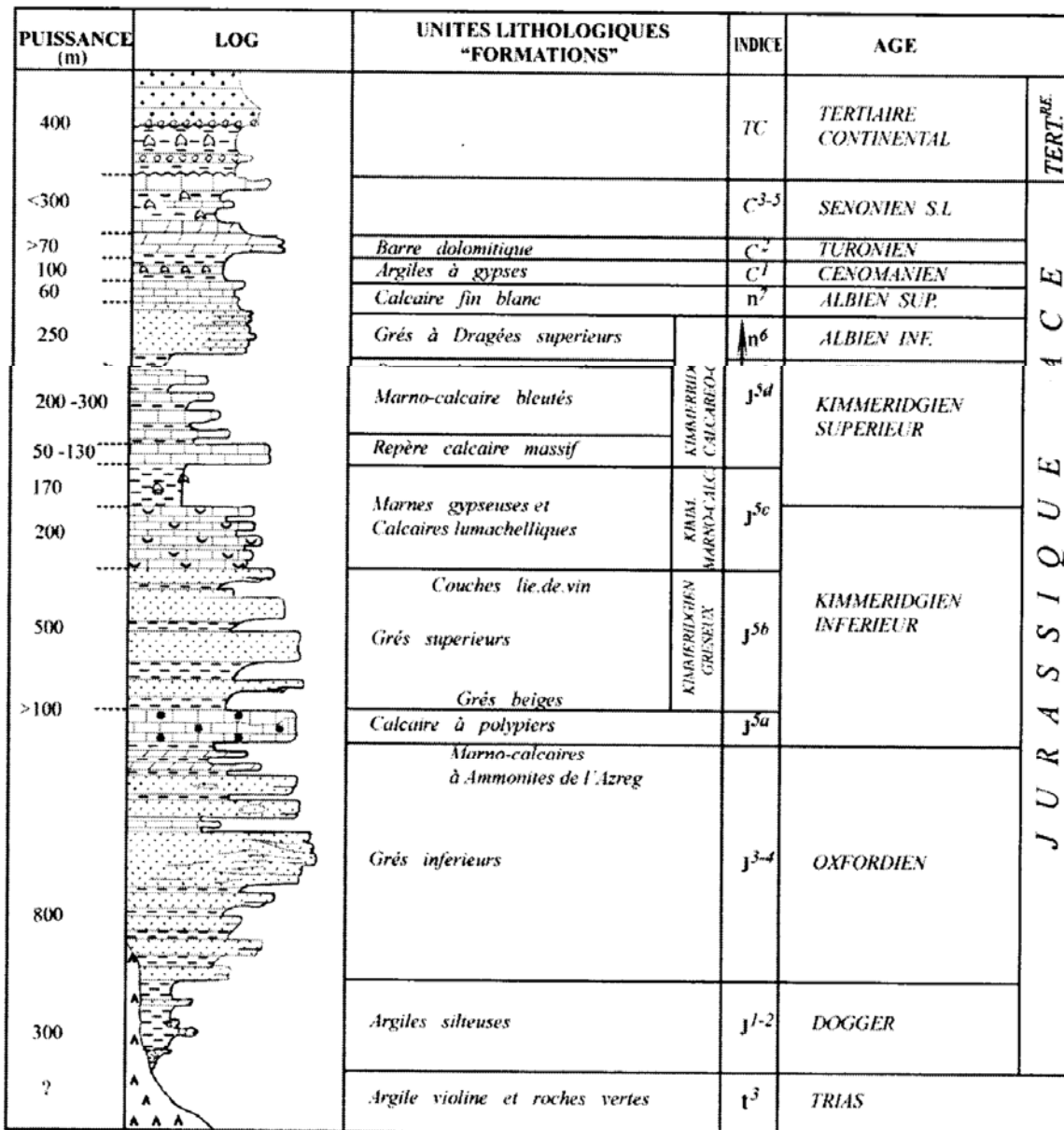


Figure 50: Complexe gréseux de la formation barrémienne aquifère

Il est à noter que cette formation gréseuse présente une épaisseur très importante et une perméabilité mixte (d'interstices, de fractures et de chenaux). Les fractures qui affectent ces grés ont généralement une direction N60°E, N130°E.

La figure 49 illustre d'une façon très significative l'importance de ces grés très fissurés au Nord du secteur d'étude.

Dans la zone intéressée, la nappe est très sollicitée en exploitation d'eau souterraine pour différents usages (TABLEAU N° 63).

Tableau 62: Destination et usage des eaux souterraines des grés du Barrémien

NOMBRE DE POINTS D'EAU	DESTINATION ET USAGE
05 forages	Alimentation en eau potable de la ville de Laghouat
30 forages	Irrigation du périmètre agricole de Hamda
90 puits	Points agriculteurs et paysans
20 puits	Usage domestique
01 source	Alimentation les paysans en eau potable
01 forage	Eau minérale Milok (mise en bouteille)

3. Aquifère du Portlandien:

Comparativement aux deux aquifères précédents, celui du Portlandien est peu important vu qu'il est constitué de calcaire et de niveaux marneux (photo 08). On note l'existence de puits à faible débit, débitant environ 0.5 l/s.



Photo 08 : Affleurement des calcaires à niveaux marneux du Portlandien

4. Aquifère du Kimméridgien

C'est un aquifère profond au niveau du secteur d'étude. Il est représenté par un ensemble gréseux avec des passées argileuses. Ces aquifères du Jurassique sont peu connus. Il s'agit le plus souvent de systèmes captifs captés par des forages au niveau des charnières des anticlinaux

Les caractéristiques hydrogéologiques des différentes formations aquifères peuvent être résumées par le log hydrogéologique synthétique présenté au TABLEAU N° 64.

Tableau 63: Log hydrogéologique synthétique

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

IV. ÉTUDE DE L'AQUIFÈRE DU BARRÉMIEN-VALANGINIEN

1. Structure hydrogéologique

Parmi la série de bassins synclinaux les plus importants dans l'Atlas saharien central, on peut citer le synclinal d'Aflou où la nappe est implantée dans une cuvette de structure allongée sur plus de 80 km suivant une direction SSW – NNE pour une largeur de 10 km (fig. 51).

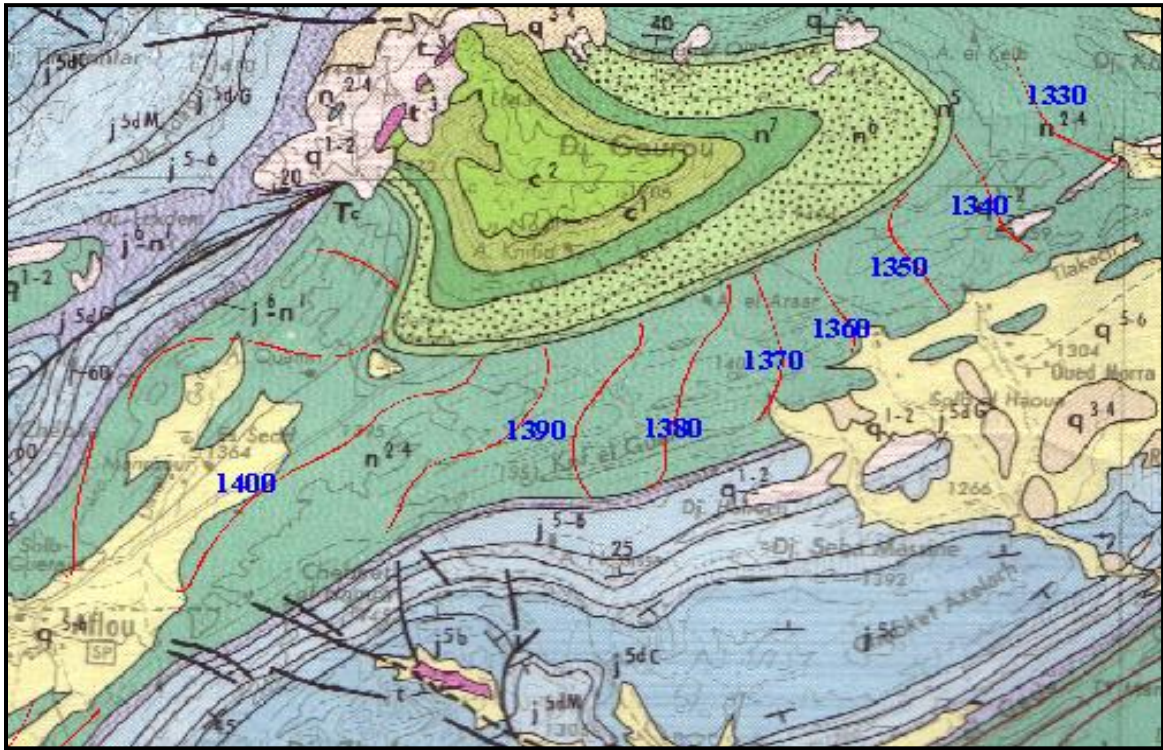


Figure 51: Allure générale de la nappe du synclinal d'Aflou (1/200.000)

Le réservoir est constitué par une épaisse série de grès fins à moyens, parfois grossiers et à dragées de quartz et morceaux de bois silicifié. Les grès s'envoient sous la Quaternaire. La granulométrie variée et la présence des intercalations de marnes rompent la monotonie de la série et ont permis la mise en place d'un aquifère multicouche. Celui-ci est limité au Nord par le Djebel Sidi Boulefaa et au Sud par le Djebel Mzara.

2. Caractéristiques hydrodynamiques

L'étude des coupes de forages réalisés dans la région montre bien qu'il s'agit d'un système multicouche formé par une alternance de grès moyens à grossiers et de marnes, où l'écoulement préférentiel se situe dans les grès à la faveur du réseau de fissures très développé en profondeur (particulièrement les réseaux N60° et N140°).

Les coupes de forages permettent de distinguer plusieurs types hydrodynamiques des nappes. Les niveaux gréseux supérieurs montrent des nappes de type libre ou semi-libre, alors que les niveaux inférieurs manifestent des nappes de type semi captives ou le plus souvent captives. La coupe de forage de Hamda (fig. 52) constitue le type hydrodynamique d'aquifère à nappe semi captives.

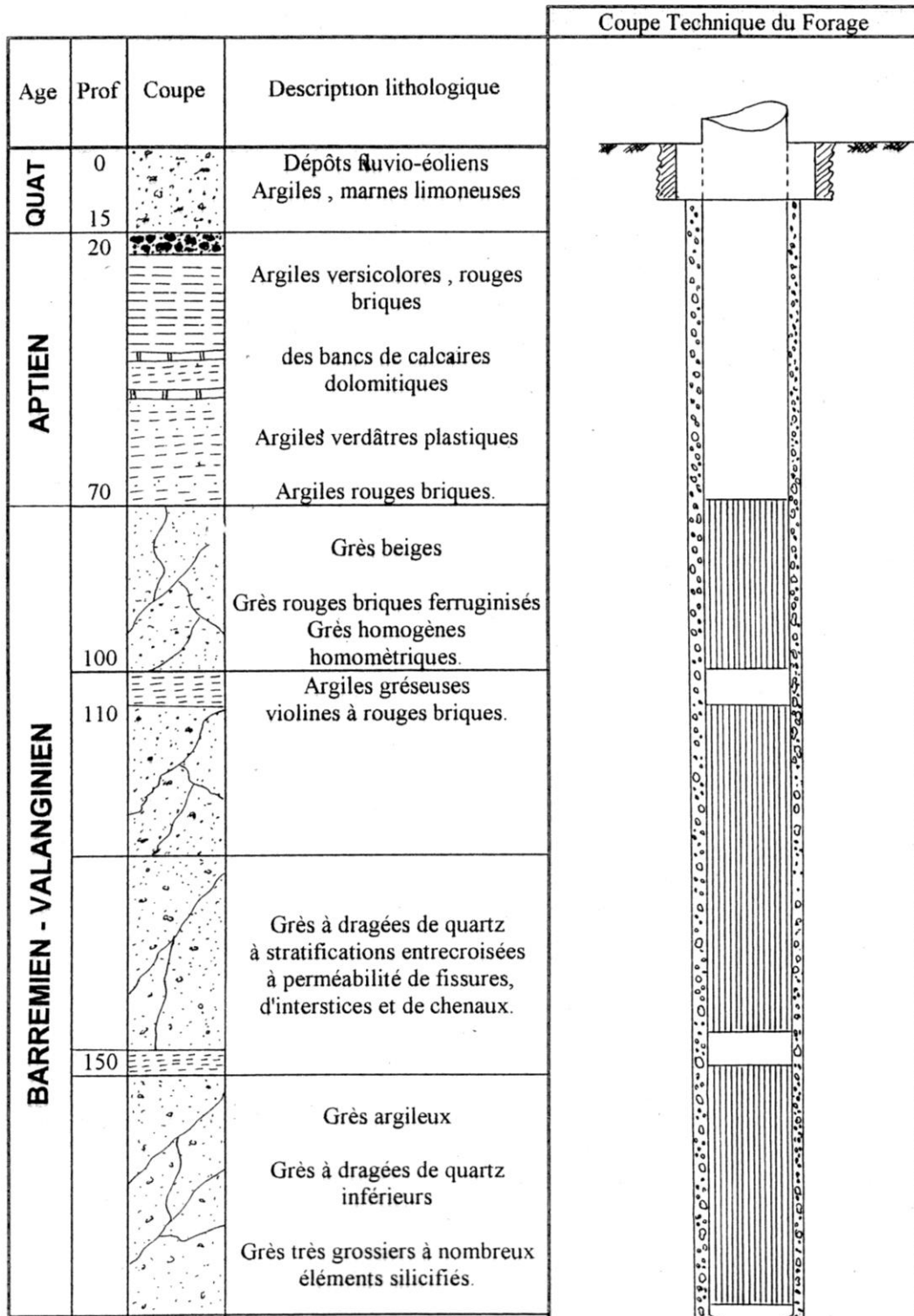


Figure 52: Coupe lithologique et technique du forage : FH1 Hamda

3. Piézométrie

En 1966, la première carte piézométrique a été établie par la S.C.E.T.Coop, les points d'eau étaient mal répartis avec beaucoup de lacunes, il fallait attendre le mois d'octobre de l'année 1978, la D.E.M.R.H (ex-A.N.R.H) a établi un inventaire des points d'eaux de la vallée de l'Oued M'zi. Hannachi (1980) dans son étude « relations entre aquifères profonds et superficiels » a établi une carte piézométrique détaillée de la vallée de Oued M'zi.

Dans notre étude, l'inventaire de points d'eaux a été réalisé par Mr. Chaïfa Tahar ingénieur à la D.R.E de Laghouat, sur la base de ce recensement le but est d'établir un document de base pour toute étude de la cartographie de l'écoulement souterrain. Il est à noter que la région couvre une superficie avoisinant sept kilomètres de large sur une centaine de longueur. Les forages de par leur importance servent généralement à l'alimentation en eau potable et l'alimentation industrielle et irrigation des périmètres agricoles les plus importants de la région. En ce qui concerne la vallée de M'zi, les forages captent la nappe Mio-Pliocène (fig. 53).

Les forages profonds se concentrent dans le synclinal de la Dakhla leur utilisation se résume exclusivement à l'alimentation en eau potable de la ville de Laghouat.

3.1. Nappe alluviale de la vallée de M'zi

Les eaux de cette nappe circulent principalement dans les alluvions du Mio-Pliocène. En se basant sur le recensement des points d'eaux, la considération de ce résultat de mesure piézométrique et tout en se basant sur l'étude géophysique, l'extension des alluvions, de part leurs profondeurs présentent des variations importantes, à cet effet, nous remarquons que l'aquifère alluvial s'étale de la flexure Sud Atlasique à Ksar El Hirane en passant par Mékhareg et se resserre au Ksar Kabeg.

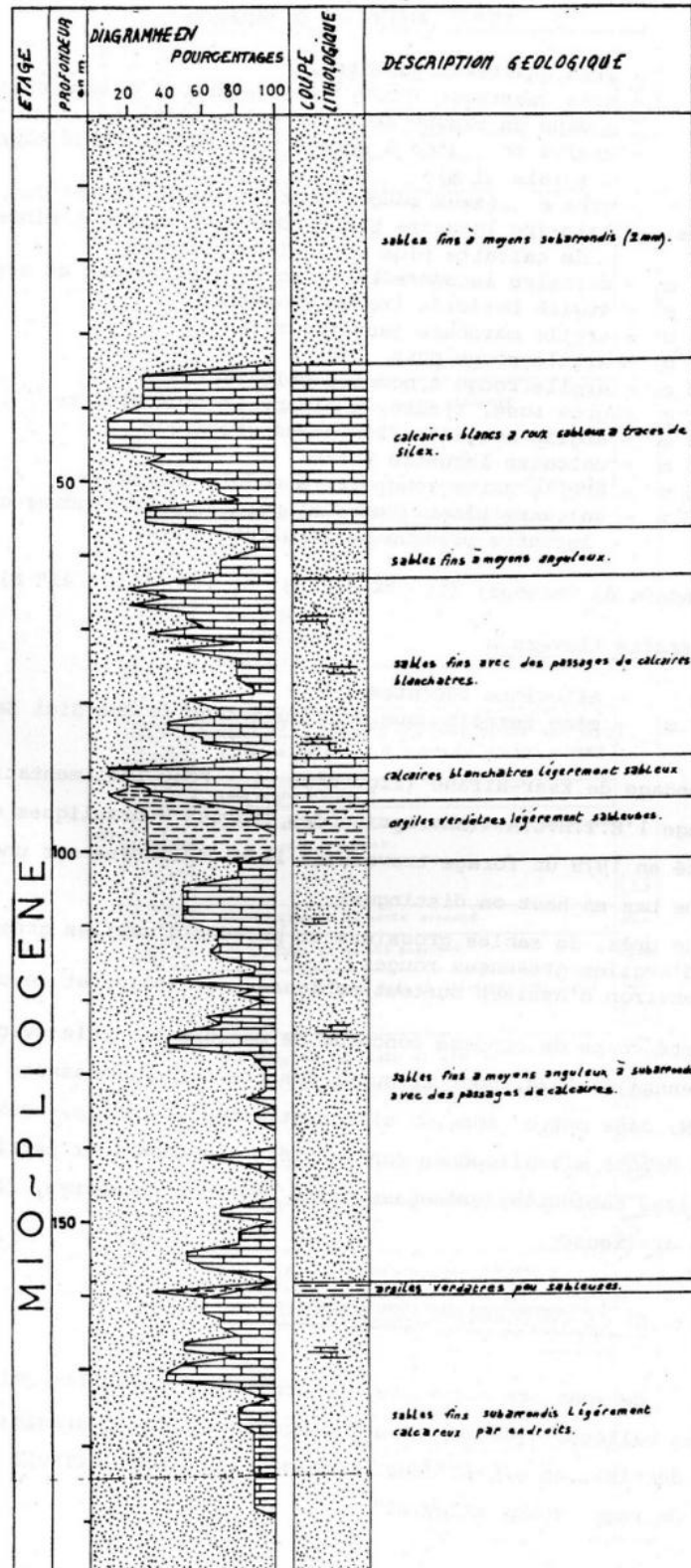


Figure 53: Forage de l'abattoir de Laghouat

3.2. Formation géologique en relation hydrogéologique avec les alluvions

À partir des cartes piézométriques, nous pourrions arriver à schématiser l'écoulement souterrain que ce soit au niveau de la vallée de M'zi ou bien au niveau de Hamda. Pour comprendre tout cela il fallait étudier la relation alluvions-différentes formations et leurs structures. À cet effet, nous avons pu distinguer:

- Entre El Assafia et Borj Snouci cachés sous les recouvrements de faibles épaisseurs des grés attribués à l'Albien.
- Au niveau d'El Kabeg le mio-pliocène forme le substratum des alluvions quaternaire.
- Les couches du Turonien et Cénomaniens, à dominante marneuse dont le pendage est à la verticale au niveau la flexure Sud Atlasique assure une étanchéité.

3.3. Interprétation des cartes piézométriques

Sur la base des données rereuillies lors des campagnes piézométriques, nous avons procédé à la réalisation d'une cartographie de l'écoulement souterrain au niveau des deux régions considérées : Ksar El Hirane et Hamda (fig. n°54, 55)

A cet effet, et afin de comprendre la configuration de l'écoulement souterrain de la région de la plaine de M'zi, cette étude piézométrique a engendré un ensemble de 150 points d'eau inventoriés au niveau de cette vallée.

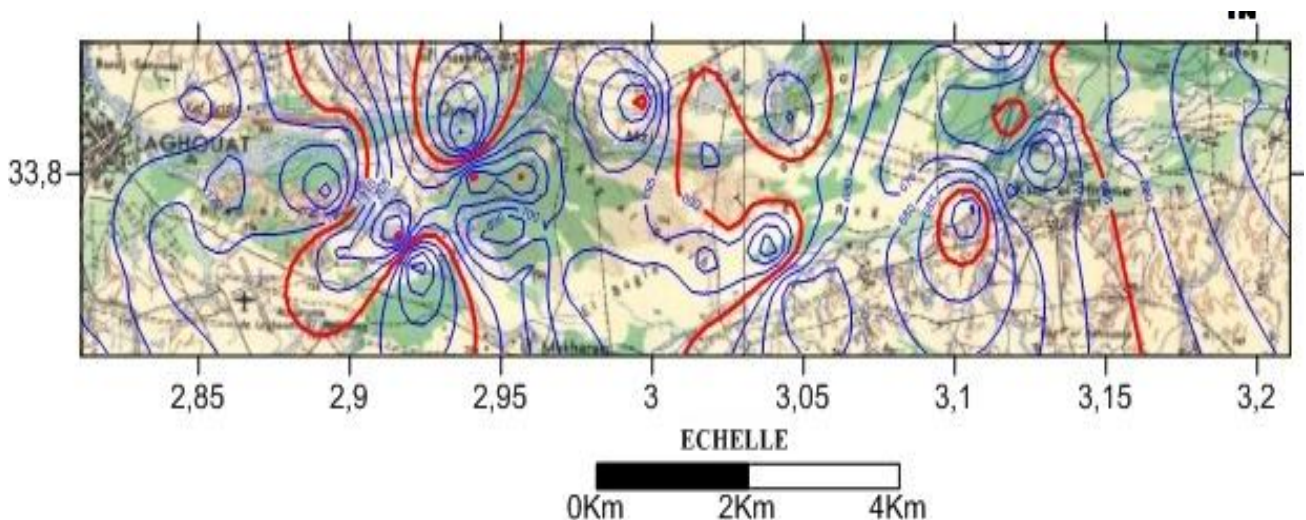


Figure 54: Carte piézométrique de la plaine Ksar El Hirane

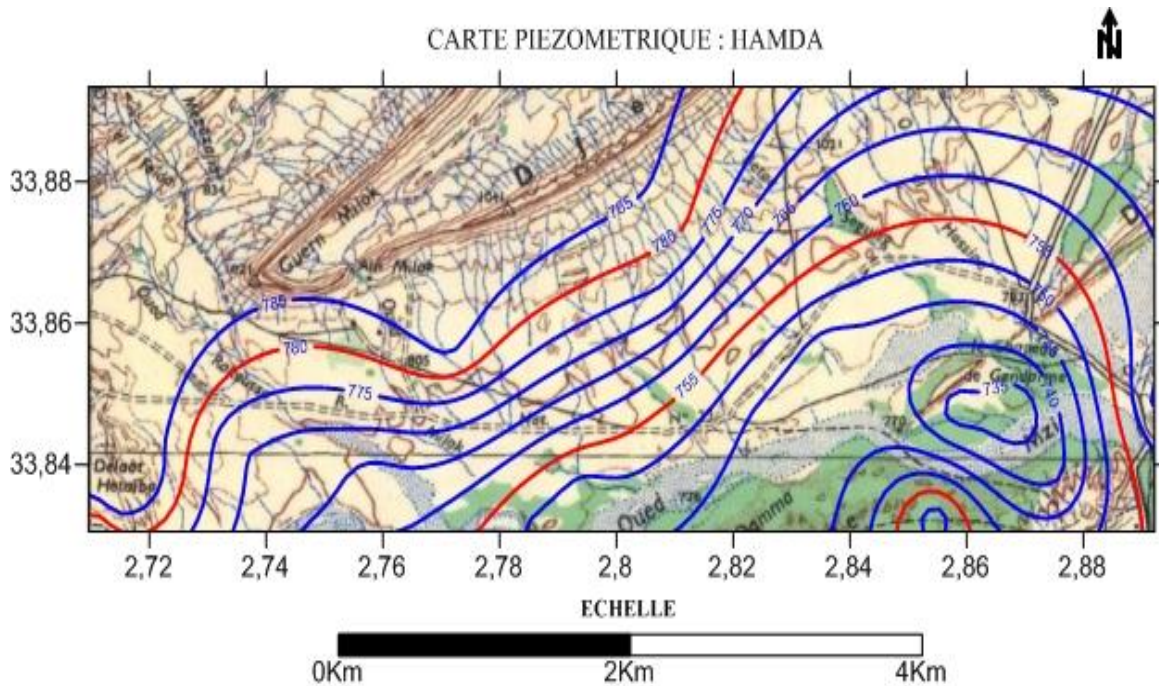


Figure 55: Carte piézométrique : Hamda

Plusieurs zones d'écoulement des eaux sont observées en fonction des conditions géologiques et hydrogéologiques, matérialisées par l'allure des courbes hydro isohypses.

-Au niveau du pont de Laghouat:

On observe des écoulements superficiels sur une longueur de 500 m environ, c'est un écoulement permanent et qui correspond à une émergence des eaux, due certainement à une barrière calcaire du Turonien, qui forme un barrage souterrain comme cela a été démontré par l'étude géophysique.

-Au niveau de l'aérodrome, Mékhareg, l'Oued alimente les alluvions.

-Au niveau de la flexure Sud Atlasique, l'écoulement se fait du NW, SE.

-Au niveau du rocher des chiens, c'est une zone très fracturée certainement en lien étroit avec la flexure Sud Atlasique, les eaux traversent les calcaires Turonien et alimente la zone sud vers El Fatha.

3.4. Le gradient hydraulique

Le gradient hydraulique est fort au niveau des zones d'alimentation et deviennent plus faible au niveau de la vallée. Il varie de 0.28 au niveau du pont à 0.03 au niveau de Ksar El Hirane et Kabeg.

Au niveau de la nappe du Barrémien dans la région de Hamda, l'écoulement se fait du Nord vers le Sud, c'est-à-dire des grés vers l'Oued M'zi et cela au niveau de Milok.

Au niveau du chapeau de gendarme : zone très fracturée, l'écoulement des eaux se fait de l'Oued M'zi vers les grés, le gradient hydraulique varie de 0.19 à 0.39.

La morphologie de la nappe montre que l'écoulement majeur des eaux souterraines se fait généralement suivant une direction NE –SW, avec des variations du niveau piézométrique.

Sur la fig. n°54, on peut remarquer en général, que la nappe alimente l'oued M'zi sur l'une de ses rives. Ce débit souterrain affluant est fourni par la nappe des grés du Barrémien. Quelques anomalies piézométriques se manifestent dans les secteurs à pompages excessifs (chapeau du gendarme).

4. Détermination des paramètres hydrodynamiques du forage Hamda FH1

Après la géométrie et la structure de l'aquifère, il nous faut à présent analyser la distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques de l'écoulement dans l'ensemble du secteur d'étude de Hamda.

4.1. Méthode de la courbe standard de C.W.THEIS

Nous avons opté pour la méthode de THEIS car les formules de DUPUITS ne tiennent pas compte de la compressibilité du terrain, de l'eau et du temps de pompage. De plus, à débit constant même avec un temps long, le rayon d'action tend seulement vers une limite ou un régime de pseudo-équilibre.

Il faut donc, au moins dans le cas d'une nappe captive, trouver une autre formulation qui tienne compte des critères précédents (fig. 56).

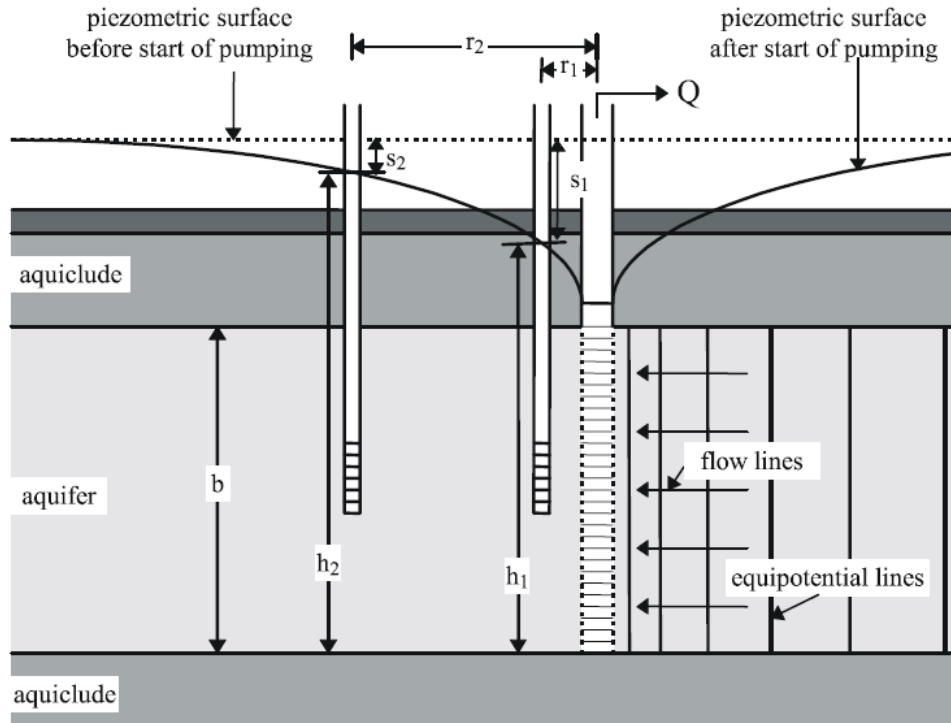


Figure 56: Représentation théorique du forage FH1 Hamda en cours de pompage

En comparant ce type d'écoulement à la propagation de la chaleur. On peut construire différentes courbes standard relatives aux différentes valeurs de « u » ou « $1/u$ » et donc relatives aux différentes valeurs du couple (T, S).

Cette méthode de la courbe standard de C.V THEIS consiste à :

-Construire la courbe expérimentale $\log(\Delta) = f(\log t)$ de l'essai de pompage considéré, sur un papier bi-logarithmique de même module que celui de la courbe standard choisie.

-Superposer par transparence les deux courbes (standard et expérimentale) tout en veillant au parallélisme des axes des ordonnées et des abscisses.

-Choisir un point « A » par exemple, sur le tronçon où l'on obtient une bonne superposition des deux courbes. Ce point choisi aura successivement les coordonnées suivantes :

-dans le repère de la courbe standard W_A et $(1/u)_A$ ou $(u)_A$.

-dans le repère de la courbe expérimentale Δ_A et t_A .

Pour calculer la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement, il suffit de remplacer les coordonnées du point « A » dans les équations ci-dessous.

Theis(1935) a développé une solution analytique, où les rabattements en tous points de la nappe sont donnés par la fonction :

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

Pour la définition précisée de u donnée ci-dessus, la fonction $W(u)$ peut être représentée par une série infinie de Taylor sous la forme suivante:

$$W(u) = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots$$

Grâce à cette fonction, l'équation devient:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) = \frac{0.08 Q}{T} F(u) \quad \text{Avec : } u = \frac{4Tt}{r^2 S}$$

Le calcul de T et S consiste à reporter « s » en fonction de « t » en coordonnées bi-logarithmiques et à superposer la courbe obtenue sur la courbe théorique en maintenant les axes de coordonnées parallèles.

La coïncidence des deux graphiques permet de faire correspondre à un point quelconque d'un graphique un point de l'autre et l'identification des coordonnées de ce couple de point (s, t) et (F(u'), u') permet de calculer T et S par les formules :

$$T = \frac{0.08}{s F(u')} S = \frac{4Tt}{r^2 u'}$$

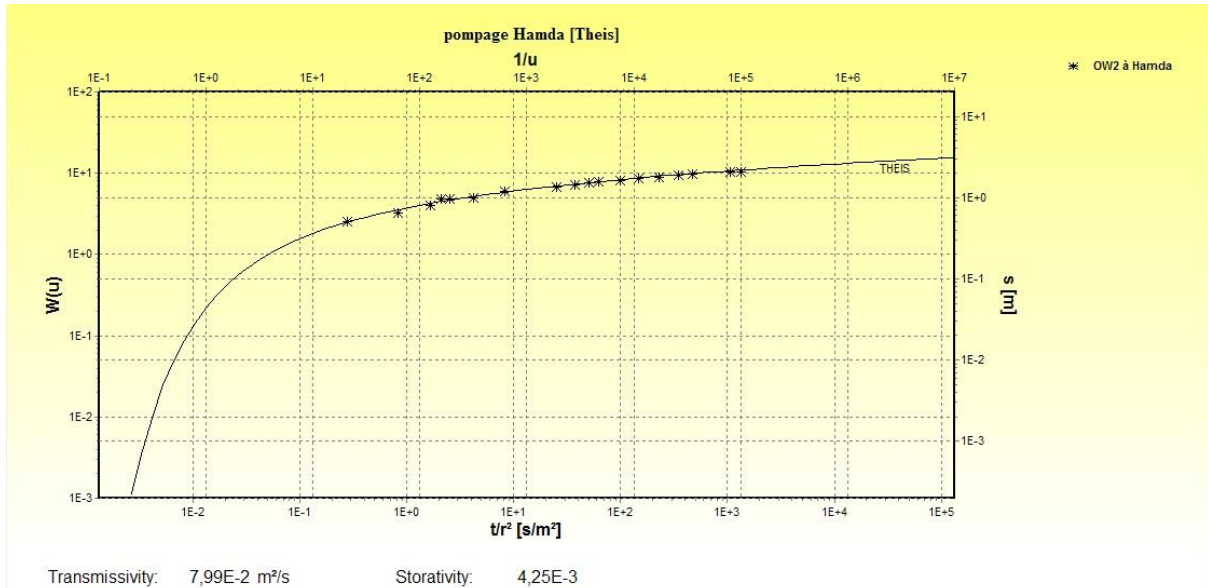


Figure 57: Courbe de superposition Theis

D'après la courbe interprétative du couple de données (rabattements-temps) de pompage d'essai du forage (fig. 57), les résultats obtenus sont les suivants :

- Transmissivité : $7.99 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- Coefficient d'emménagement : $4.25 \cdot 10^{-3}$
- Perméabilité : $4.32 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

Ces valeurs reflètent un aquifère de bonne perméabilité et de transmissivité appréciable. Il s'agit d'une nappe semi-captive.

4.2. Méthode de JACOB

Cette méthode découle de l'équation de THEIS, mais les conditions d'application sont plus restrictives. Lorsque le temps est suffisamment grand et par simplification le développement en série convergente de l'équation de THEIS se réduit à la formule de JACOB.

Si l'on porte les rabattements en fonction du logarithme du temps, théoriquement, on devrait trouver une droite moyenne (matérialisée par l'alignement des points portés sur le graphe) de la forme :

$$Y = AX + B$$

➤ La méthode semi-logarithmique de Cooper-Jacob :

Dès qu'en un point donnée ; t devient suffisamment grand, l'équation de THEIS admet une approximation logarithmique :

$$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log 2.25Tt = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2S}$$

Cette équation représentant le rabattement à une distance « r » du puits de pompage valable à :

- 0.25% près dès que $1/u \geq 100$

- 2% près dès que $1/u \geq 20$

5% près dès que $1/u \geq 10$

- 10% près dès que $1/u \geq 6.7$

On estime que l'approximation à 5% près est suffisante. Ceci revient à supposer :

$$1 \geq 10r^2s/4T.$$

Le calcul de T et S consiste à porter les valeurs du rabattement observé en fonction du logarithme du temps de pompage, à tracer la droite qui passe au mieux par ces points et à relever sur le graphique (voir fig. :)

i = pente de la droite $s = f(\log t)$ numériquement égale à l'augmentation de s par cycle logarithmique

Et : t_0 = temps correspondant à l'intersection de la droite avec l'axe $s=0$

Alors
$$T = \frac{0.183Q}{i.T}$$

Et
$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2}S = 2.25Tt_0/r^2$$

La droite représentative (fig. 58) de cet essai de pompage, montre que l’ajustement de l’ensemble des points est satisfaisant traduisant une progression linéaire de « s » en fonction de « t ». Ce schéma supposerait un aquifère illimité et recelant une réserve en eau importante.

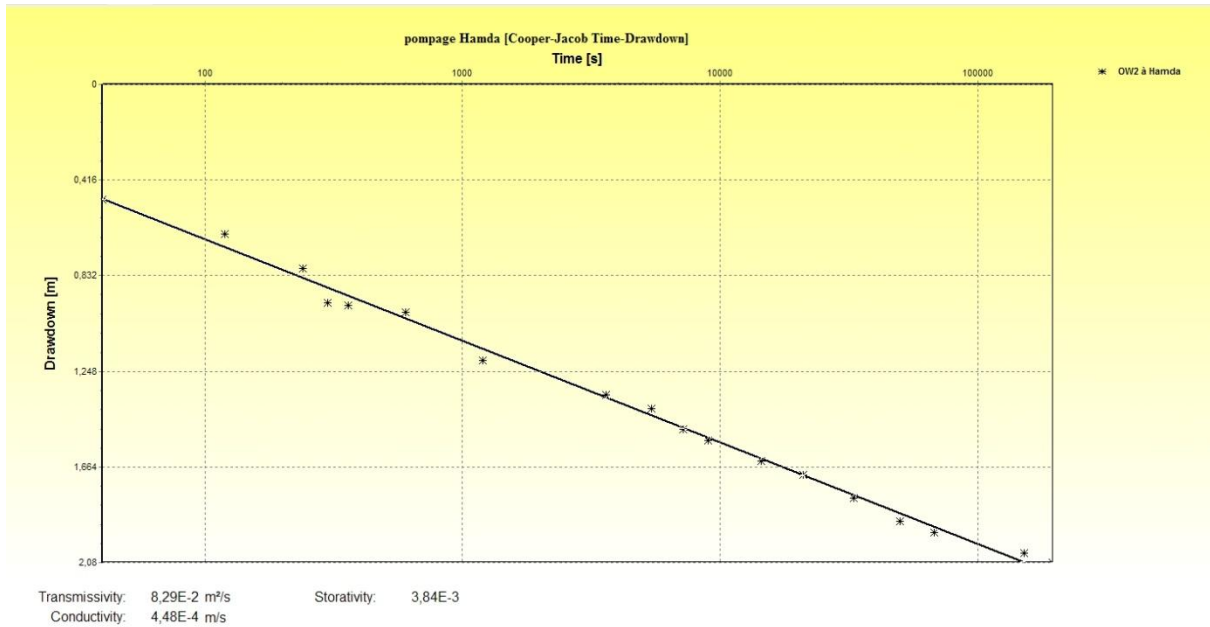


Figure 58: Méthode de Jacob

Les résultats des différents paramètres déduits du graphique se résument comme suit :

- Transmissivité : $8.29 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- Coefficient d’emménagement : $3.84 \cdot 10^{-3}$
- Perméabilité : $4.48 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

Tableau 64: paramètres hydrodynamiques (Forage Hamda FH1)

	Transmissivités (m^2/s)	Coef. d'emménagement	Perméabilité (m/s)
Theis	$7.99 \cdot 10^{-2}$	$4.25 \cdot 10^{-3}$	$4.32 \cdot 10^{-4}$
Jacob	$8.29 \cdot 10^{-2}$	$3.84 \cdot 10^{-3}$	$4.48 \cdot 10^{-4}$

Ce tableau montre que les résultats obtenus par les deux méthodes sont du même ordre de grandeur.

Forage F1 Hamda

Methode de Theis :

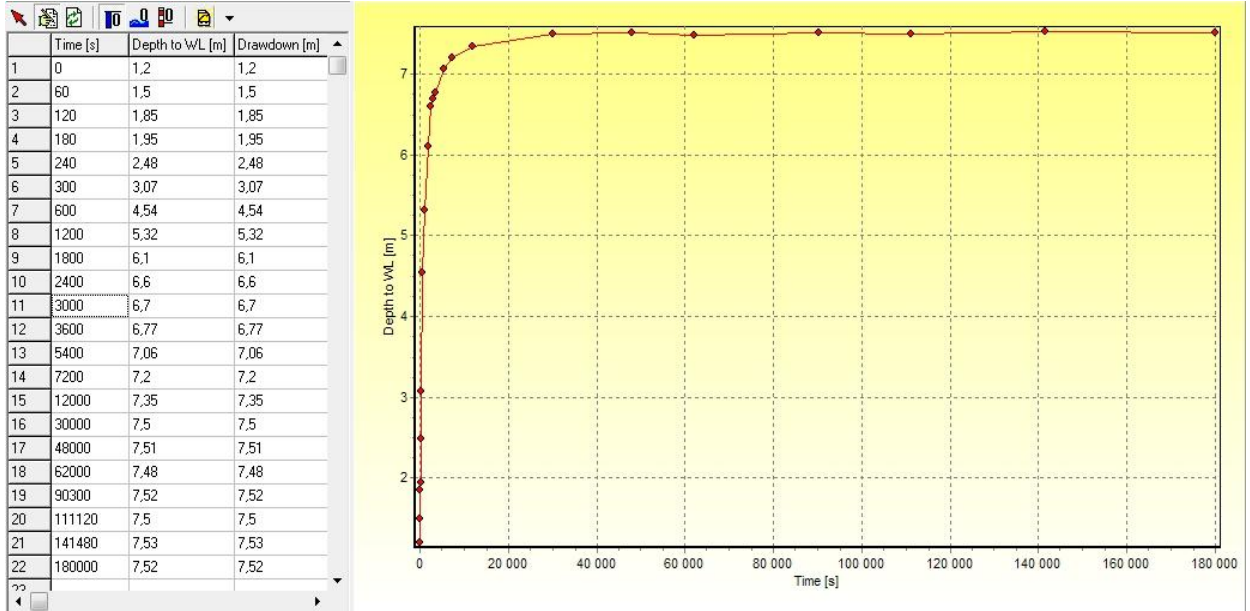


Figure 59: Forage hamda F1, remontée

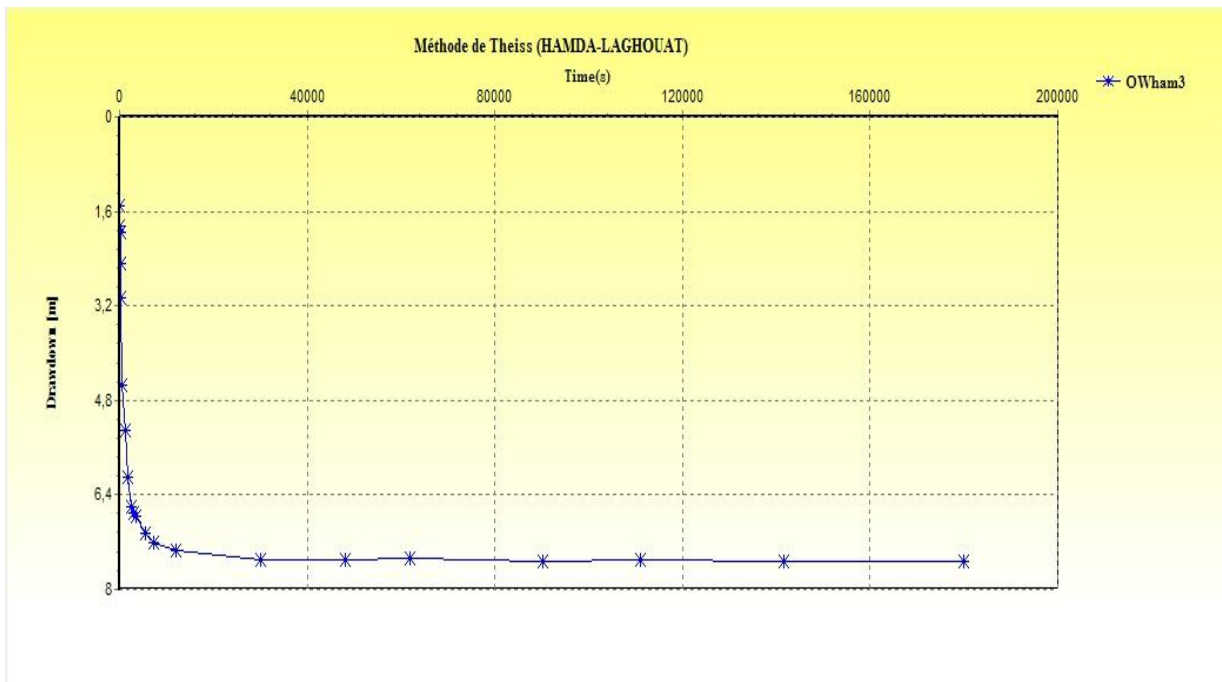


Figure 60: Courbe de descente

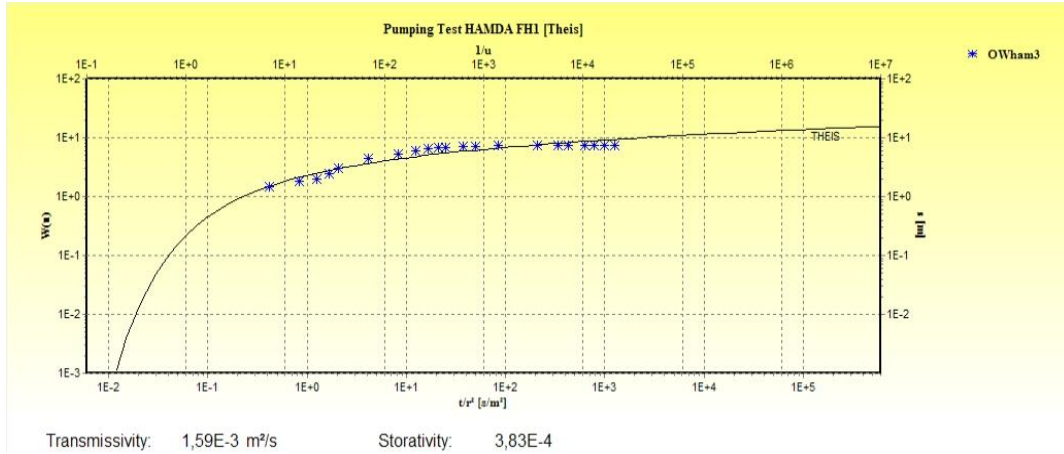


Figure 61: Forage hamda : superposition avec la courbe théorique

Méthode de JACOB :

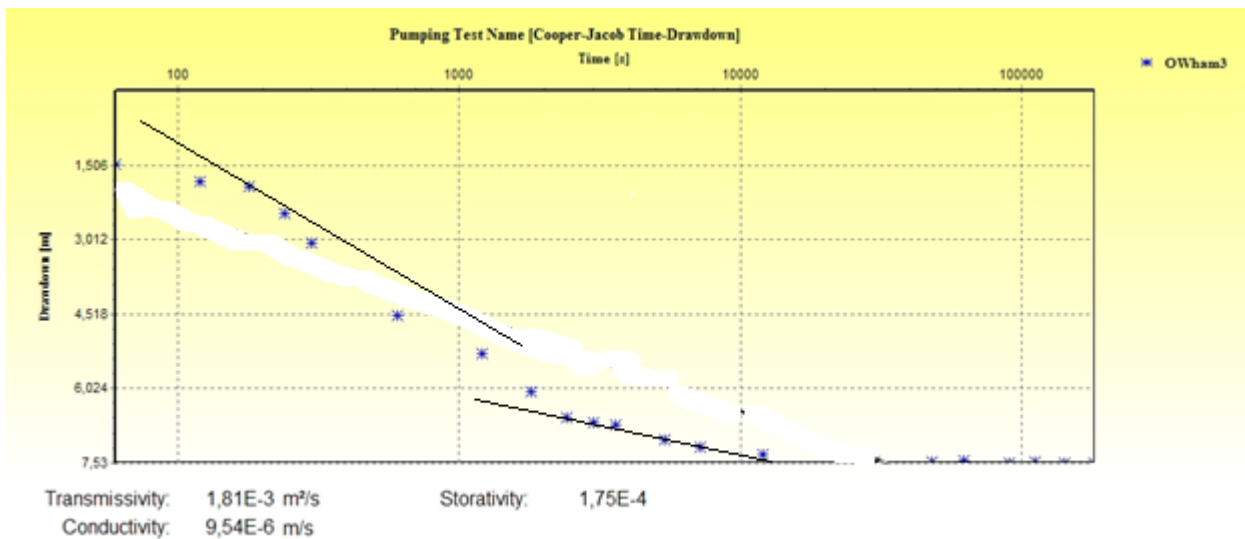


Figure 62: Methode de jacob

Le schéma interprétatif de l'évolution des rabattements en fonction du temps (fig. 62) traduit un dédoublement de la droite d'ajustement et qui se termine par un palier de stabilisation. Cela supposerait le schéma hydrodynamique d'un type d'aquifère semi-captif avec drainance ou à limite d'alimentation. Le calcul des paramètres doit se faire sur la partie intermédiaire du graphique.

Tableau 65: paramètres hydrodynamiques Forage Hamda F1

	Transmissivités (m ³ /s)	Coef. d'emmagasinement	Perméabilité (m/s)
Theis	1.8 10 ⁻³	1.75 10 ⁻⁴	9.54 10 ⁻⁶
Jacob	3.83 10 ⁻⁴	3.83 10 ⁻⁴	8.36 10 ⁻⁶

A titre de comparaison, nous allons prendre un exemple d'interprétation de pompages d'essai réalisés dans les grès du barrémien au niveau du synclinal Aflou.

a/ - Forage Aïn Arrar

Le forage a traversé une profondeur de 150 m captant les grès du Barrémien. L'interprétation de la courbe d'essai de la remontée par la méthode de Jacob a donné les valeurs suivantes :

- La transmissivité : 0.8 10⁻³ m²/s.
- La perméabilité : 0.5 10⁻⁶ m/s.

b/ - Forage AF II

Un essai par paliers enchaînés a été exécuté sur ce forage (TABLEAU N° 67).

Tableau 66: Résultats des essais par paliers

Niveau statique : 22.18 m	Palier 1	Palier 2	Palier 3
Durée de pompage en heures	09	09	01
Débit en l/s	10	20	27
Rabattements en mètres	12.32	24.10	30.98
Niveau dynamique en mètres	34.50	46.28	53.16

Cet essai a permis d'évaluer les caractéristiques du complexe aquifère-ouvrage de captage :

- Pertes de charge qui sont réparties comme suit TABLEAU N° 68:

Tableau 67: Pertes de charges

Paliers	Pertes de charge en mètres	
	Linéaire BQ	Quadratique CQ ²
01	11	01
02	22	04
03	27	6.2

On peut constater que les pertes de charge liées au forage sont plus faibles que celles inhérentes à l'aquifère ; le captage a été donc bien réalisé. Le débit critique estimé à **18 l/s** à partir de la courbe caractéristique du forage. L'interprétation de la courbe d'essai de la remontée par la méthode de C. E. Jacob (fig. 63), a permis de calculer une transmissivité moyenne de $0.5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. La perméabilité déduite est de $0.6. 10^{-5} \text{ m/s}$.

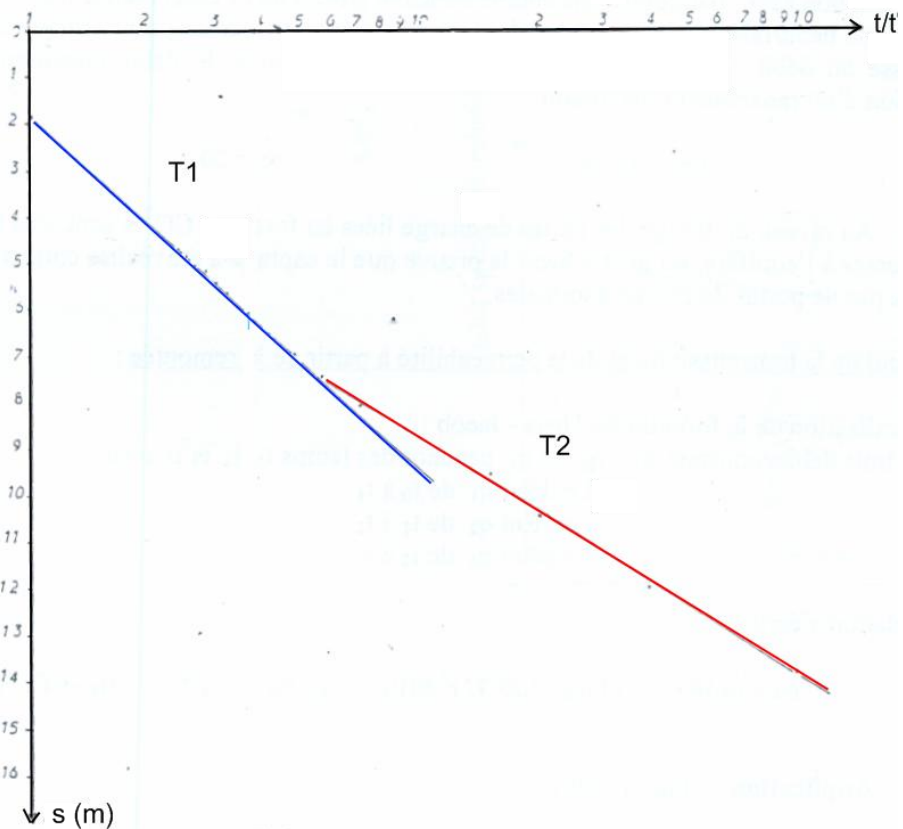


Figure 63: Courbe de remontée du forage AF2

On peut noter des variations des valeurs de la perméabilité et celles de la transmissivité, probablement liées à la nature lithologique de l'aquifère et en particulier la granulométrie variée des formations gréseuses.

Quant au coefficient d'emmagasinement, calculé dans d'autres secteurs limitrophes, il a été estimé à 10^{-4} pour les grès du Barrémien, ce qui confirme le type hydrodynamique de nappe semi-captive ou parfois même captive.

Remarque

Cependant, il faut remarquer qu'au niveau de la région étudiée, les résultats des paramètres hydrodynamiques obtenus matérialisent un aquifère de type semi-captif avec effet de drainance ou à limite d'alimentation (milieu vulnérable). Cela supposerait des restrictions rigoureuses au niveau des différents sites d'aménagements urbain, agricole et industriels, de même qu'un contrôle continu des eaux superficielles véhiculant les eaux usées. Ces démarches limiteront les risques de propagation de pollution de tout genre des nappes centrées sur le bassin du M'Zi.

CHAPITRE VI

HYDROCHIMIE

I- INTRODUCTION

La connaissance des propriétés physiques et chimiques des eaux d'un aquifère, permet d'apporter un complément important et utile dans son étude hydrogéologique. L'hydrochimie permet, entre autre, de déceler le comportement hydrodynamique de la nappe, l'infiltration des eaux, toute alimentation latérale ou verticale, ainsi que certaines perturbations (pollution) d'origine anthropique principalement et susceptible, en atteignant la nappe, de modifier sa qualité chimique.

Ce volet de l'étude a été synthétisé par l'établissement d'une cartographie hydrochimique qui nous a permis de mettre en évidence l'évolution spatiale de la chimie des eaux des nappes.

C'est dans ce contexte qu'on a procédé à une campagne de prélèvements d'échantillons d'eau de la nappe phréatique de la vallée du M'zi en date du 1/03/au 30/06/2011, portée sur 140 puits.

Les dosages chimiques ont été effectués au niveau du laboratoire de l'ADE de Laghouat.

II- PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES :**1. Paramètres physiques :****1.1. Le potentiel d'Hydrogène (pH) :**

Par définition le pH est le logarithme décimal de l'inverse de la concentration H^+ ;

$$pH = - \text{Log} [H^+].$$

Il exprime ainsi, la concentration en ion H^+ d'une eau, c'est-à-dire l'alcalinité ou l'acidité de la solution.

L'échelle du pH varie de 0 à 14 en fonction de la force ionique, on a :

- Eau basique si $[H^+] < [OH^-] \Rightarrow pH > 7$;
- Eau acide si $[H^+] > [OH^-] \Rightarrow pH < 7$;
- Eau neutre si $[H^+] = [OH^-] \Rightarrow pH = 7$.

2. Nappe du barrémien (anticlinal de Hamda)

Tableau 68: le pH

Echantillon	pH	Echantillon	pH
Hamda FH-1	7,9	Hamda F-6	7,4
Hamda P-2	7,4	Hamda F-8	7,3
Hamda F-2	7,1	Hamda P-1	7,2
Hamda F-3	6,9	Hamda P-11	6,8
Hamda F-4	7,6	Hamda P-3	7,2
Hamda F-5	7	Hamda P-4	7,1

Dans notre secteur d'étude, le pH mesuré varie entre 6,8 et 7,9 ces valeurs traduisent le caractère alcalin des eaux de la nappe du Barrémien.

Pour une eau potable les normes exigent un pH compris entre 7 et 8,5.

3. Nappe alluviale de la plaine de Ksar el Hirane

Tableau 69: le pH

Echantillon	pH	Echantillon	pH	Echantillon	pH	Echantillon	pH
Lagh KH-22	7,6	Lagh KH-10	7,4	Lagh KH-14	7,4	Lagh KH-26	8
Lagh KH-43	7,6	Lagh KH-11	7,5	Lagh KH Ksar El Hirane	7,4	Lagh KH-30	8,4
Lagh KH-21	7,3	Lagh KH-12	7,4	Lagh KH-02	7,1	Lagh KH-31	7,6
Lagh KH-45	7,5	Lagh KH-13	7,4	Lagh KH-03	7,4	Lagh KH-34	7,5
Lagh KH-27	7,6	Lagh KH-15	7,5	Lagh KH-04	7,2	Lagh KH-35	7,4
Lagh KH-42	7,6	Lagh KH-16	7,5	Lagh KH-05	7,4	Lagh KH-36	7,7
Lagh KH-44	7,7	Lagh KH-18	7,3	Lagh KH-07	7,5	Lagh KH-37	7,5
Lagh KH-28	7,3	Lagh KH-19	7,9	Lagh KH-08	7,5	Lagh KH-38	7,4
Lagh KH-17	7,8	Lagh KH-20	7,5	Lagh KH-09	7,5		
Lagh KH-32	7	Lagh KH-23	7,8	Lagh KH-01	7,4		
Lagh KH-33	7,9	Lagh KH-24	7,9	Lagh KH-40	7,7		
Lagh KH-39	7,3	Lagh KH-25	8	Lagh KH-41	7,3		

En ce qui concerne les eaux de la nappe alluviale, elles manifestent un pH légèrement beaucoup plus élevé compris entre 7 et 8,4.

4. La conductivité électrique :

Ce caractère est directement lié à la quantité des ions présents et leur mobilité. Elle caractérise la propriété à laisser passer le courant électrique ; elle est fonction de la concentration des ions dans la solution et la température. Elle correspond à la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1cm²

de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm, exprimés en $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C . Sa mesure donne une estimation fidèle sur la teneur en sels dissous dans l'eau.

Les valeurs obtenues de la conductivité des eaux de la nappe du Barrémien du Milok, varient entre 25 pour le puits FH1 et 450 pour le puits P11.

On peut penser que les zones où les teneurs sont inférieures à $1000\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondent à des secteurs de circulation relativement rapide, et constituent un front d'alimentation, surtout en amont de la plaine de Hamda. Les valeurs de la conductivité obtenues augmentent suivant les grands axes d'écoulement.

Tableau 70: conductivité

Echantillon	Conductivité	Echantillon	Conductivité
Hamda FH-1	25	Hamda F-6	236
Hamda P-2	99	Hamda F-8	77
Hamda F-2	245	Hamda P-1	250
Hamda F-3	390	Hamda P-11	450
Hamda F-4	94	Hamda P-3	214
Hamda F-5	196	Hamda P-4	85

5. La minéralisation :

La minéralisation d'une eau représente la totalité des substances et les matières en suspension quelles soit organiques ou minérales. Elle est exprimée en mg/l ou g/l .

Nous avons reporté aux tableaux 72 et 73, la minéralisation totale des eaux souterraines.

Pour la nappe barrémienne, certains problèmes d'eau accusent une teneur en ions dissous faible, dans les secteurs formant une aire d'alimentation au Nord.

Les eaux de la nappe alluviale montrent dans l'ensemble une concentration en éléments chimiques beaucoup plus élevée liée au caractère alluviale de la nappe.

6. Nappe barrémien Hamda

Tableau 71: TDS

Echantillon	TDS (calculé)	Echantillon	TDS (calculé)
Hamda FH-1	229,7	Hamda F-6	1246
Hamda P-2	649	Hamda F-8	314
Hamda F-2	1700,8	Hamda P-1	1622,8
Hamda F-3	2417	Hamda P-11	3008
Hamda F-4	608	Hamda P-3	1302
Hamda F-5	1280	Hamda P-4	492,5

7. Nappe alluviale Ksar el Hirane

Tableau 72: TDS

Echantillon	TDS (calculé)	Echantillon	TDS (calculé)	Echantillon	TDS (calculé)
Lagh KH-22	1023,8	Lagh KH-03	1310	Lagh KH-23	1087,7
Lagh KH-43	2163	Lagh KH-04	1239	Lagh KH-24	1007,2
Lagh KH-21	1910	Lag KH-05	1678	Lagh KH-25	1571
Lagh KH-45	2585	Lag KH-07	1678	Lagh KH-26	1389
Lagh KH-27	1854	Lagh KH-08	1625,5	Lagh KH-30	1031,8
Lagh KH-42	1106,6	Lagh KH-09	3995	Lagh KH-31	2401
Lagh KH-44	1381	Lagh KH-01	936	Lagh KH-34	1314
Lagh KH-28	1768	Lagh KH-10	2885	Lagh KH-35	950,8
Lagh KH-17	1287	Lagh KH-11	4825,9	Lagh KH-36	1200
Lagh KH-29	1387	Lagh KH-12	983	Lagh KH-37	1237
Lagh KH-32	921,4	Lagh KH-13	1128	Lagh KH-38	1827
Lagh KH-33	849	Lagh KH-15	1259	Lagh KH-40	1551
Lagh KH-39	940	Lagh KH-16	1089	Lagh KH-41	1226
Lagh KH14	1155	Lagh KH-18	2159		
Lagh KH-	813	Lagh KH-19	1050,8		
Lagh KH-02	1306	Lagh KH-20	1291		

8. Paramètres chimiques majeurs :

Les éléments majeurs correspondent aux anions et cations qui constituent de façon prépondérante la minéralisation des eaux (tableau n° 74,75,76). Ils sont classiquement représentés par Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} .

Tableau 73: Eléments chimiques majeurs (meq/l)-nappe barrémienne

Echantillon	Na^+	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Hamda FH-1	0,609	0,102	3,149	0,905	1,015	1,895	2,016
Hamda P-2	0,435	0,077	2,196	1,892	0,254	0,999	3,557
Hamda F-2	2,175	0,281	5,489	3,702	1,551	4,164	2,918
Hamda F-3	10,004	0,281	13,373	5,594	7,052	16,907	2,705
Hamda F-4	12,092	0,153	20,459	6,335	22,283	15,199	2,065
Hamda F-5	1,148	0,128	5,339	2,468	1,523	3,998	3,098
Hamda F-6	4,872	0,179	10,928	5,265	4,795	11,264	2,491
Hamda F-8	6,046	0,102	7,585	4,443	4,71	15,199	2,934
Hamda P-1	1,914	0,153	2,196	0,987	0,987	3,602	2,557
Hamda P-11	9,134	0,205	12,475	5,475	7,334	15,334	2,852
Hamda P-3	12,875	0,486	27,844	21,802	22,142	17,906	3,688
Hamda P-4	4,698	0,358	10,529	9,214	5,134	10,619	2,705

Tableau 74: Eléments chimiques majeurs (meq/l)-nappe alluviale

Echantillon	Na^+	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Lagh KH-22	2,827	0,205	5,489	8,309	3,103	11,972	2,705
Lagh KH-43	8,264	0,358	15,469	16,454	9,59	19,78	2,606
Lagh KH-21	7,308	0,153	12,475	14,809	8,321	14,575	5,098
Lagh KH-45	14,137	0,486	16,467	30,522	15,796	15,616	3,77
Lagh KH-27	18,356	0,384	9,481	10,695	6,487	11,452	5,196
Lagh KH-42	5,22	0,205	2,246	4,566	4,795	5,518	2,787
Lagh KH-44	3,958	0,205	4,341	5,019	4,231	7,079	2,557
Lagh KH-28	3,915	0,639	6,836	7,816	8,321	6,288	4,753
Lagh KH-17	4,567	0,205	3,443	4,155	6,628	4,685	4,098
Lagh KH-29	4,002	0,256	8,982	10,037	4,231	13,534	3
Lagh KH-32	2,61	0,179	6,088	6,088	3,441	9,494	3,18
Lagh KH-33	2,175	0,128	5,988	5,759	5,792	9,37	0,902
Lagh KH-39	6,09	0,179	4,79	5,512	3,385	10,619	3,442
Lagh KH14	2,697	0,179	10,778	4,936	3,385	11,452	2,295
Lagh KH-	5,568	0,179	4,79	4,278	2,398	9,265	3,508
Lagh KH-02	4,132	0,179	8,782	7,898	4,654	12,659	2,606
Lagh KH-03	2,958	179	6,387	12,916	8,462	9,994	2,787
Lagh KH-04	2,479	0,205	10,978	6,911	2,962	13,43	1,967
Lag KH-05	3,045	0,256	12,475	14,151	5,923	17,698	1,901
Lag KH-07	5,35	0,307	9,98	10,86	5,5	17,969	2,508
Lagh KH-08	4,567	0,23	10,778	10,202	5,359	19,53	2,93
Lagh KH-09	29,361	0,588	18,363	29,7	30,322	24,985	4,803

Tableau 75: Eléments chimiques majeurs (meq/l)-nappe alluviale (suite)

Echantillon	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ⁻⁴	HCO ⁻³
Lagh KH-01	1,957	0,153	6,786	5,348	2,539	9,578	2,196
Lagh KH-10	10,874	0,384	15,669	24,681	9,167	31,232	2,967
Lagh KH-11	26,968	0,793	21,457	41,547	18,334	45,807	6,393
Lagh KH-12	3,48	0,23	6,786	5,101	3,244	8,911	2,508
Lagh KH-13	2,827	0,205	6,886	9,79	6,205	8,599	2,705
Lagh KH-15	4,176	0,384	7,384	8,309	5,077	8,443	5,114
Lagh KH-16	2,479	0,205	6,487	9,872	2,821	10,723	2,606
Lagh KH-18	4,176	0,486	22,655	28,137	7,334	15,616	3,901
Lagh KH-19	3,262	0,358	6,387	7,404	3,667	11,098	2,705
Lagh KH-20	3,697	0,205	6,487	9,708	4,513	13,013	2,705
Lagh KH-23	2,523	0,179	8,184	7,158	2,115	13,117	2,36
Lagh KH-24	6,655	0,179	4,89	6,582	3,526	11,098	3,508
Lagh KH-25	5,35	0,179	8,184	10,86	5,923	15,928	2,787
Lagh KH-26	4,132	0,307	7,984	10,037	4,4	14,346	2,541
Lagh KH-30	4,698	0,537	5,24	7,98	2,651	11,66	1,885
Lagh KH-31	7,482	0,179	16,966	29,124	14,724	15,616	4,196
Lagh KH-34	4,263	0,205	7,236	8,885	4,767	13,076	2,59
Lagh KH-35	3,48	0,179	5,888	5,594	4,372	9,89	2,426
Lagh KH-36	2,697	0,205	6,786	8,638	4,231	12,076	2,623
Lagh KH-37	2,349	0,23	8,882	9,132	3,385	13,221	2,131
Lagh KH-38	4,002	0,256	11,976	15,549	12,129	15,616	1,901
Lagh KH-40	4,785	0,281	8,882	12,341	6,064	15,199	2,573
Lagh KH-41	2,436	0,205	6,687	6,417	3,103	17,49	2,098

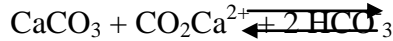
9. Cartes hydrochimiques

La représentation cartographique de l'évolution spatiale de la chimie des eaux, a été synthétisée pour chaque paramètre par l'établissement des graphiques suivants :

- Carte d'isoteneur
- Carte vectorielle
- Profil d'évolution
- Carte en relief
- Carte en trois dimensions (3D)

9.1. Calcium (Ca⁺⁺)

C'est un élément très fréquent dans les roches sédimentaires, son origine provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées en la présence du gaz carbonique. Le Ca⁺⁺ peut provenir également des formations salifères (anhydrite, gypse), qui sont facilement solubles dans l'eau.



Dans les eaux de la nappe du M'Zi, la teneur en Calcium varie entre 64 mg à 460 mg. On peut penser que l'origine du Ca⁺⁺ dans les eaux de la nappe phréatique provient essentiellement de la dissolution des éléments calcaires composant les alluvions.

La carte d'isoteneurs en Ca⁺⁺ (fig.64,65,66), montre une augmentation de la concentration d'Ouest en Est et du Nord vers le Sud. On peut distinguer une forte zonalité au niveau de la ville de Laghouat et à El-Assafia, expliquée par la présence des bancs turoniens.

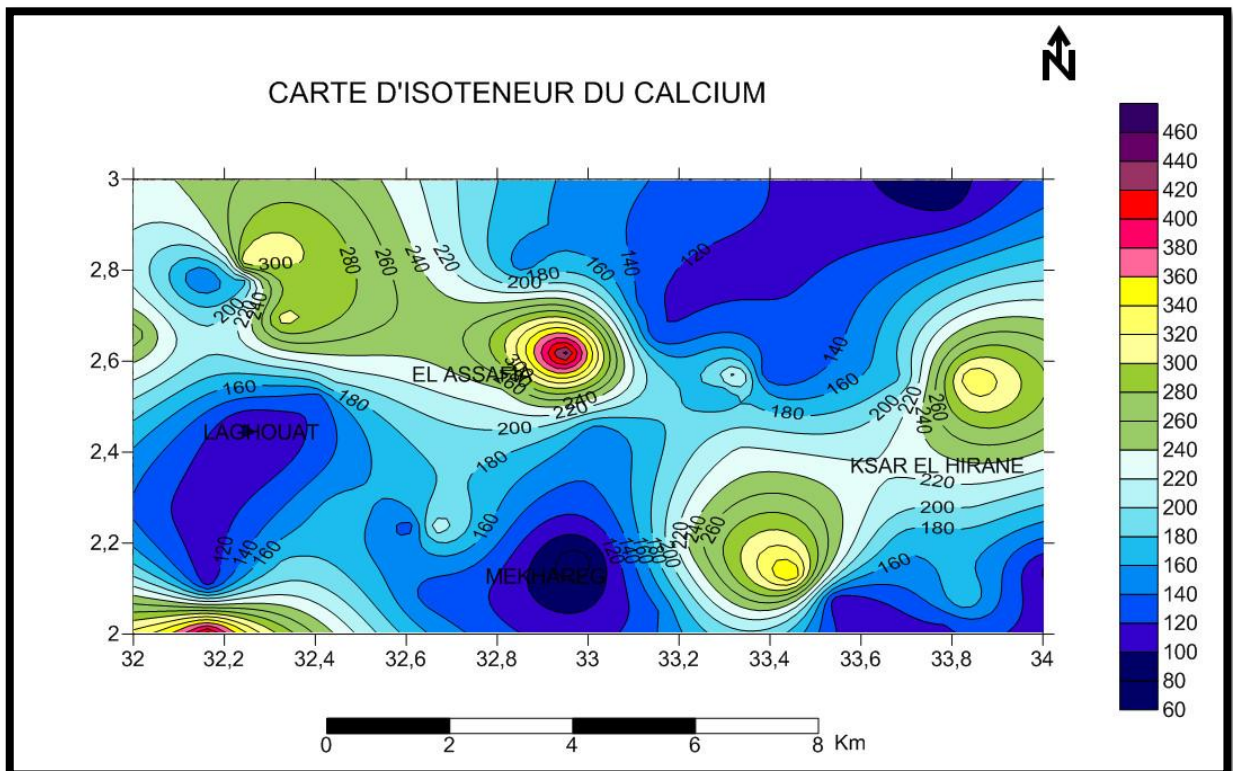


Figure 64: Carte d'isoteneurs du Calcium en mg/l

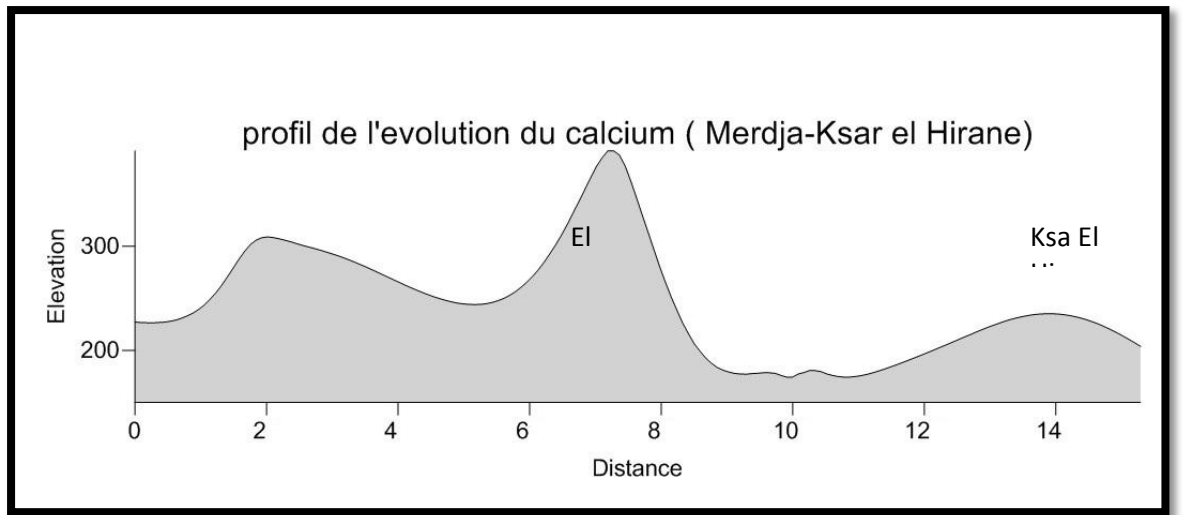


Figure 65: Profil de l'évolution du Calcium (Merdja-ksar El Hirane) en mg/l

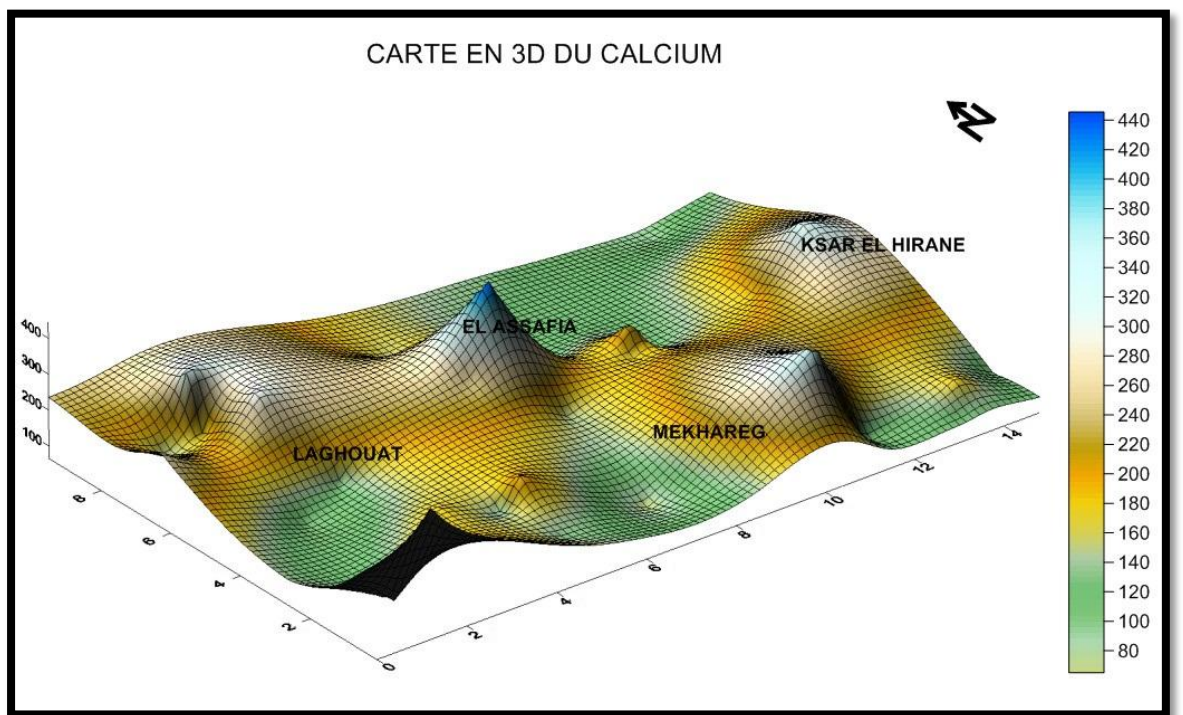


Figure 66: Carte en 3D du Calcium en mg/l

9.2. Le Magnésium (Mg^{++})

Le Magnésium est un élément chimique qui accompagne souvent le calcium, il provient de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitiques, ainsi que des minéraux ferromagnésiens. Ainsi on peut observer sur la figure n° 67,68,69, le même schéma d'évolution que celui du calcium.

Les valeurs minimales observées dans les eaux de la nappe du M'Zi sont localisées au niveau du Mekhareg et de forte teneur au niveau de El-Assafia et Ksar El Hirane.

L'origine du Magnésium que renferment les eaux de la nappe est probablement liée à la dissolution des calcaires composant les alluvions.

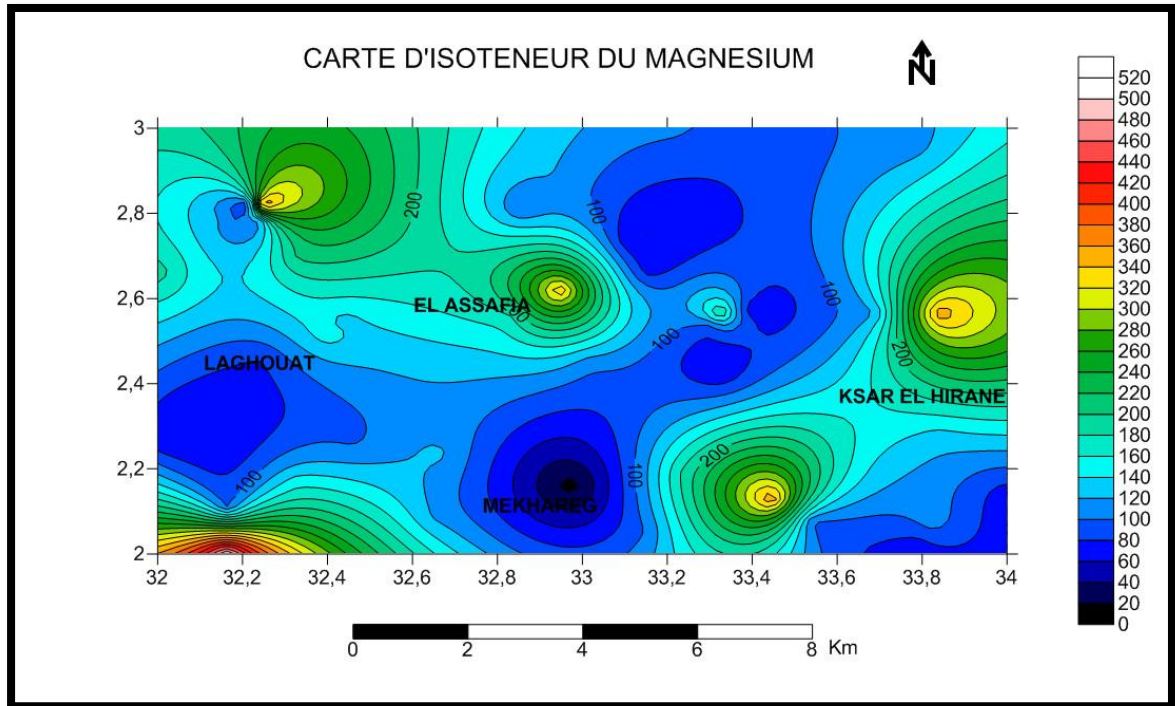


Figure 67: Carte d'isoteneurs du magnésium en mg/l

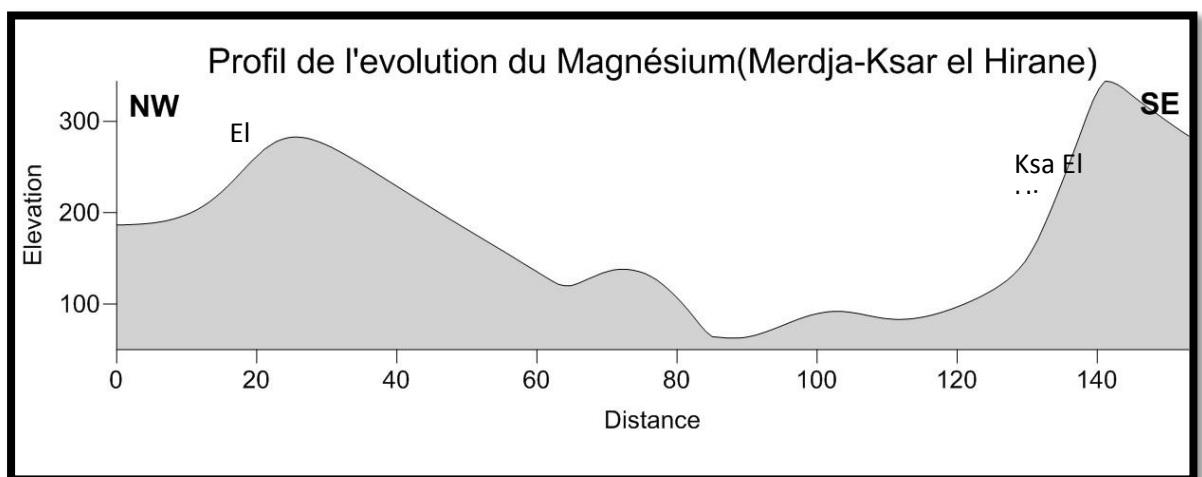


Figure 68: Profil de l'évolution du Magnésium (Merdja-ksar El Hirane) en mg/l

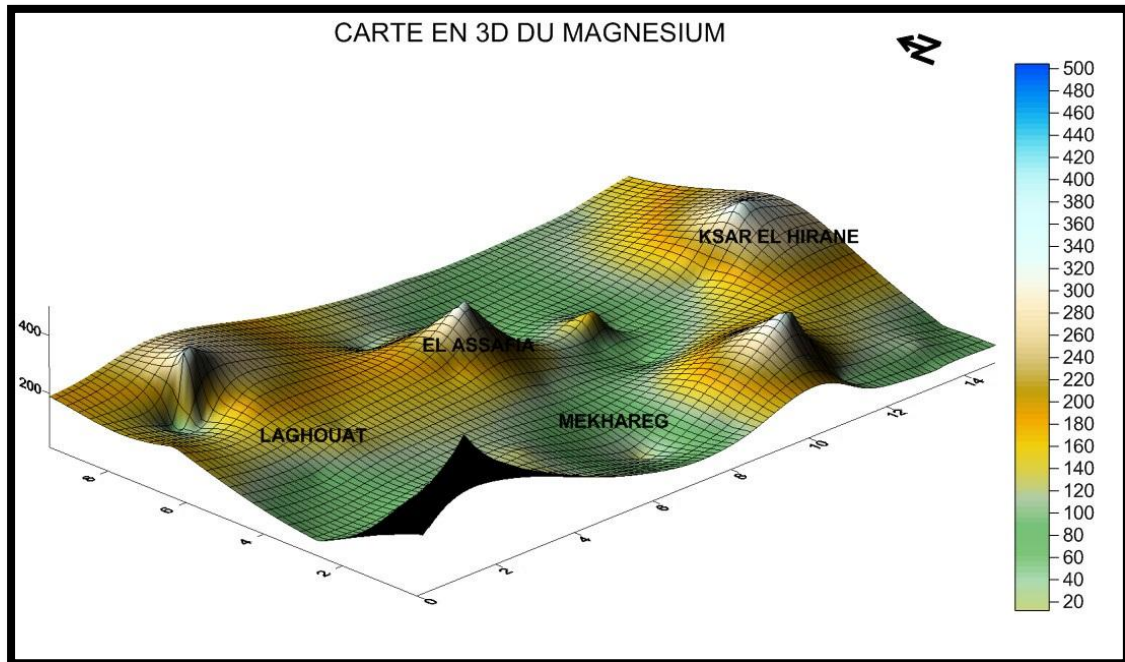


Figure 69: Carte en 3D du Magnésium en mg/l

9.3. Sodium (Na^+) et Potassium (K^+)

Il provient probablement des lessivages des sables argileux tapissant le fond de la vallée les fortes concentrations sont observées au niveau d'El Merdja et Ksar El Hirane (fig. 70,71,72).

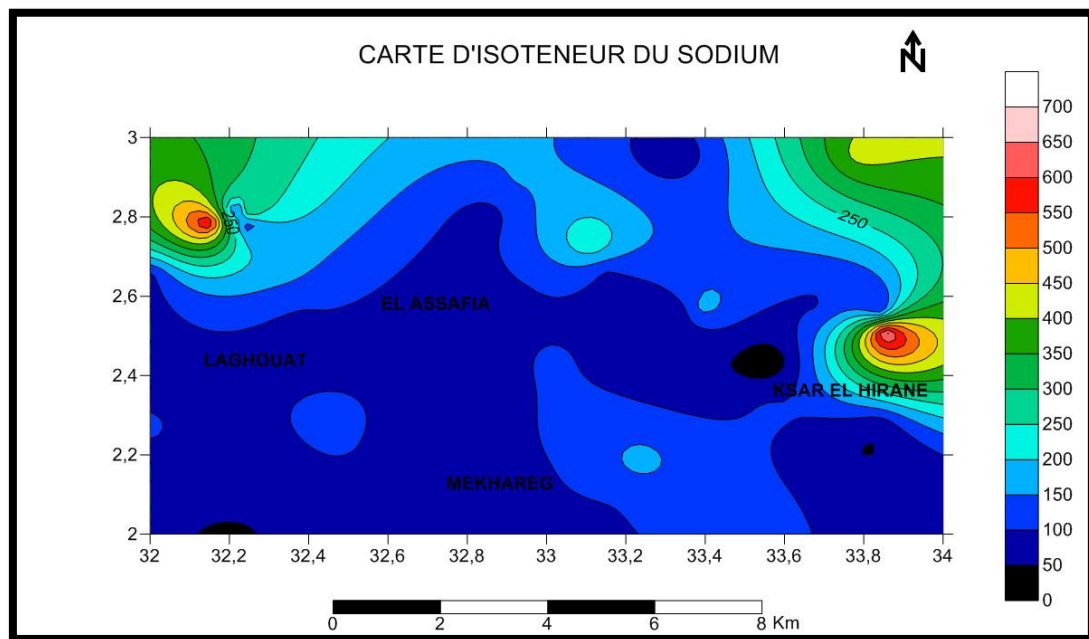


Figure 70: Carte d'isoteneurs du Sodium en mg/l

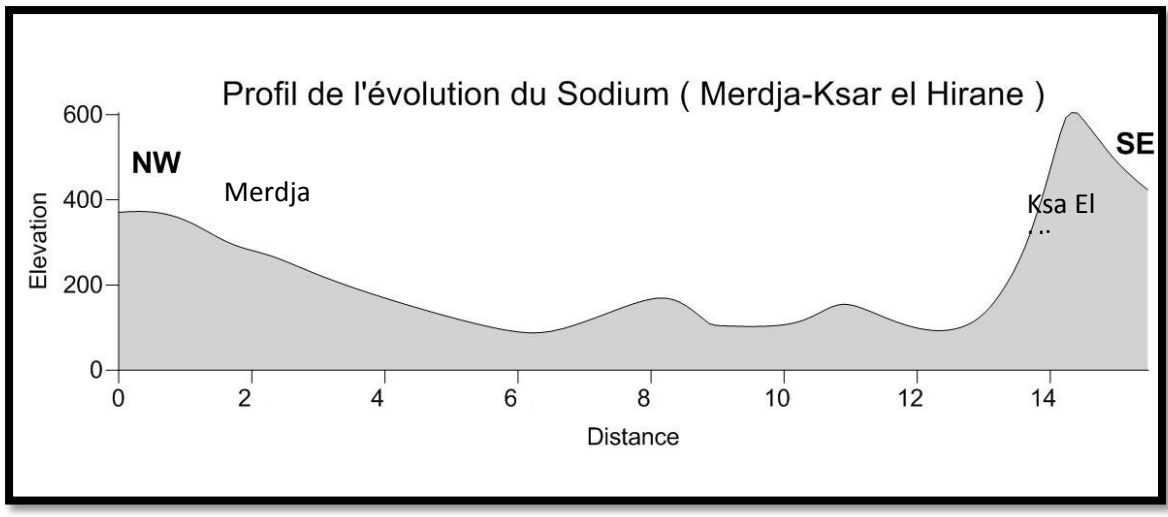


Figure 71: Profil de l'évolution du Sodium (Merdja-ksar El Hirane) en mg/l

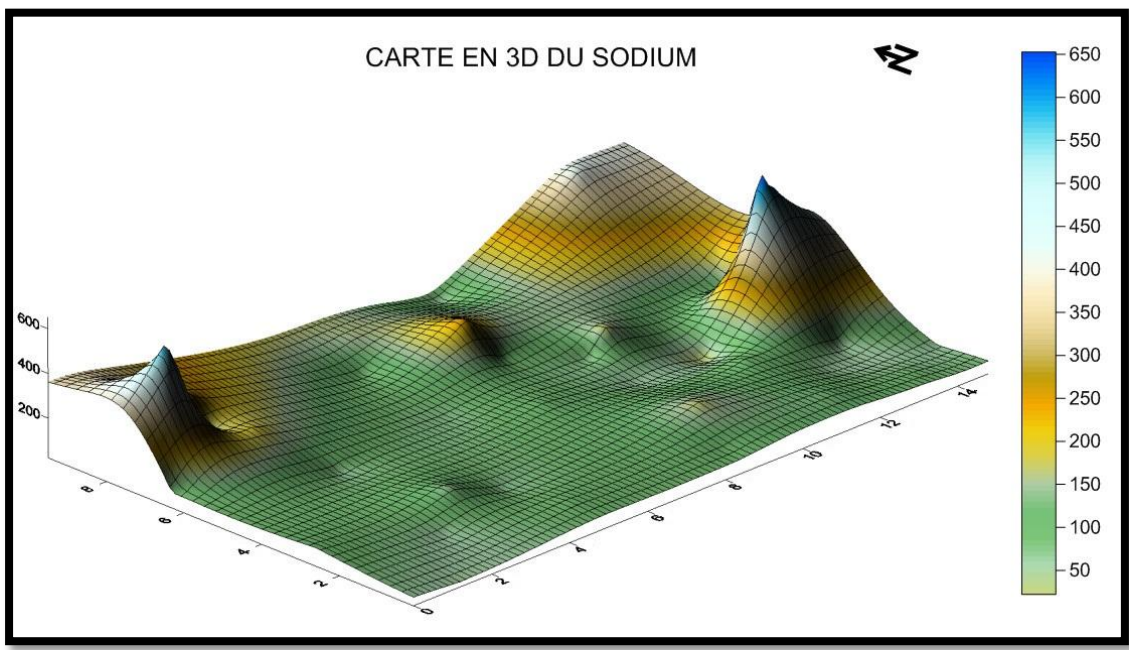


Figure 72: Carte en 3D du Soduimen mg/l

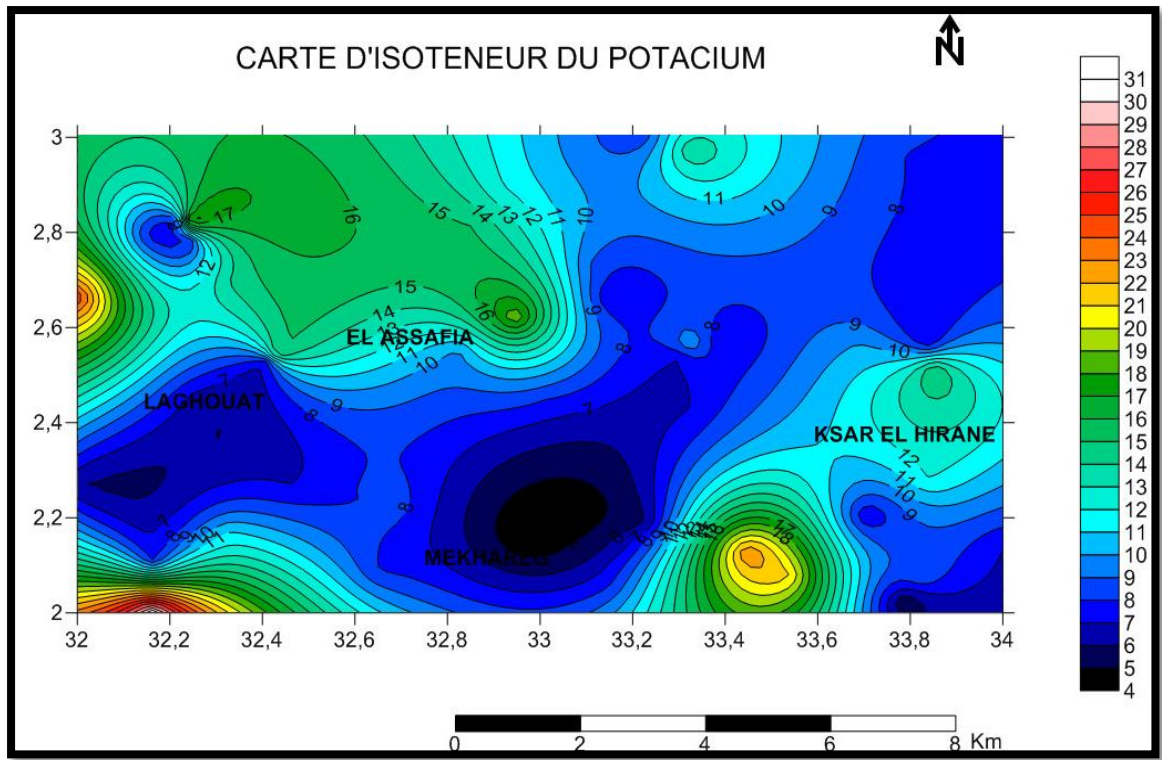


Figure 73: Carte d'isoteneurs du Potassiumen mg/l

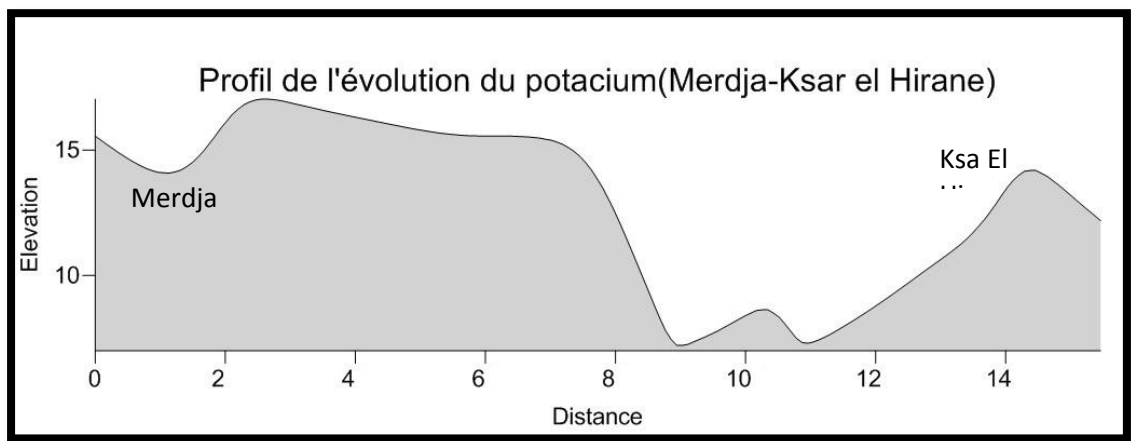


Figure 74: Profil de l'évolution du Potassium (Merdja-ksar El Hirane)

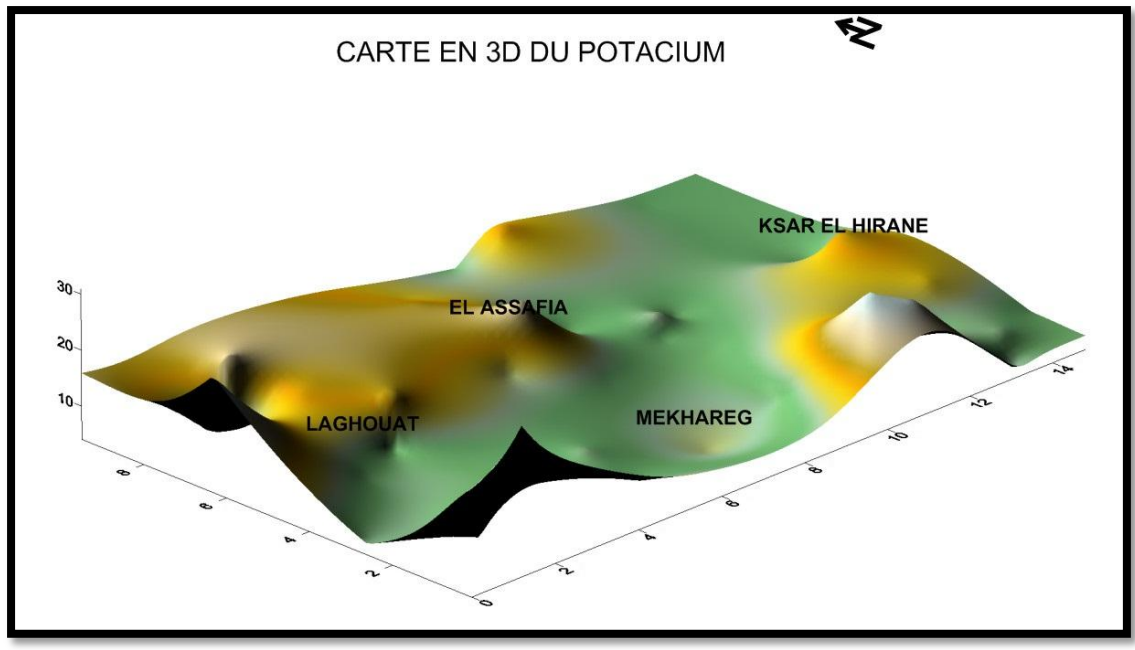


Figure 75: Carte en 3D du Potassium en mg/l

D'après la cartographie de ces deux éléments (Na et K), on peut remarquer, encore une fois, la même évolution spatiale (fig. 73, 74 et 75) avec cependant une concentration anormalement élevée du couple (Sodium - Potassium) à Ksar El Hirane liée probablement au remplissage alluvionnaire.

9.4. Bicarbonates (HCO_3^-) :

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche et l'eau et le gaz carbonique selon l'équation :



Il provient de la dissolution des roches carbonatées et gypsifères, l'origine principale est fonction de :

- Concentration du CO_2 dissous
- Température de l'eau
- pH de l'eau

Les teneurs varient de 60 à 380 mg/l

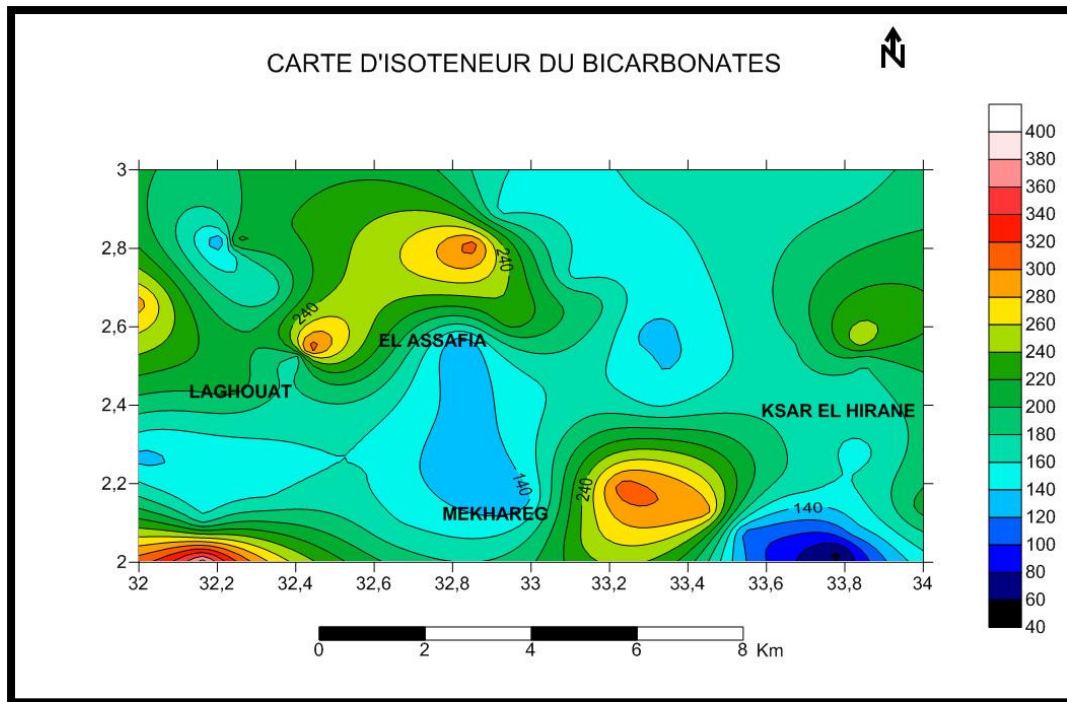


Figure 76: Carte d'isoteneur du Bicarbonates en mg/l

Pour cet élément, on constate un schéma de distribution spatiale identique avec quelques teneurs importantes au Nord d'El Assafia et à l'Est de Mekhareg.

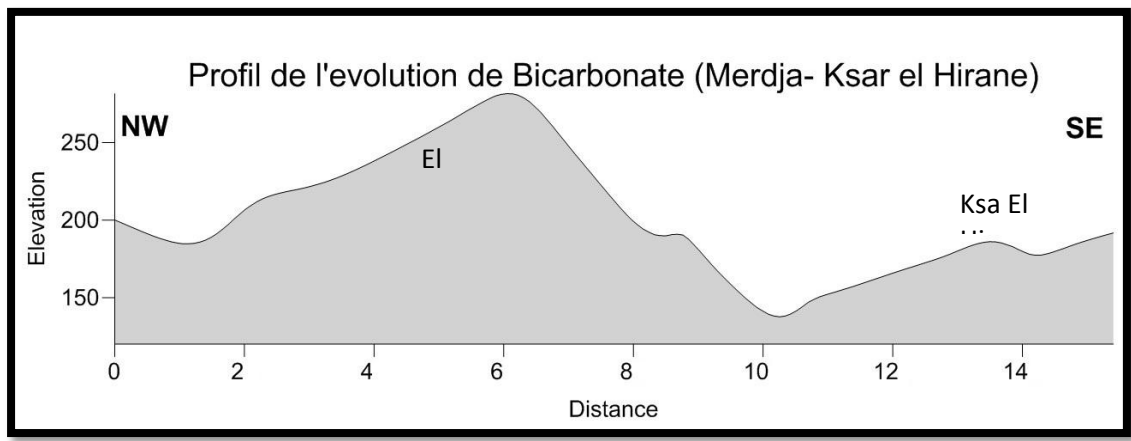


Figure 77: Profil de l'évolution du Bicarbonates (Merdja-ksar El Hirane) en mg/l

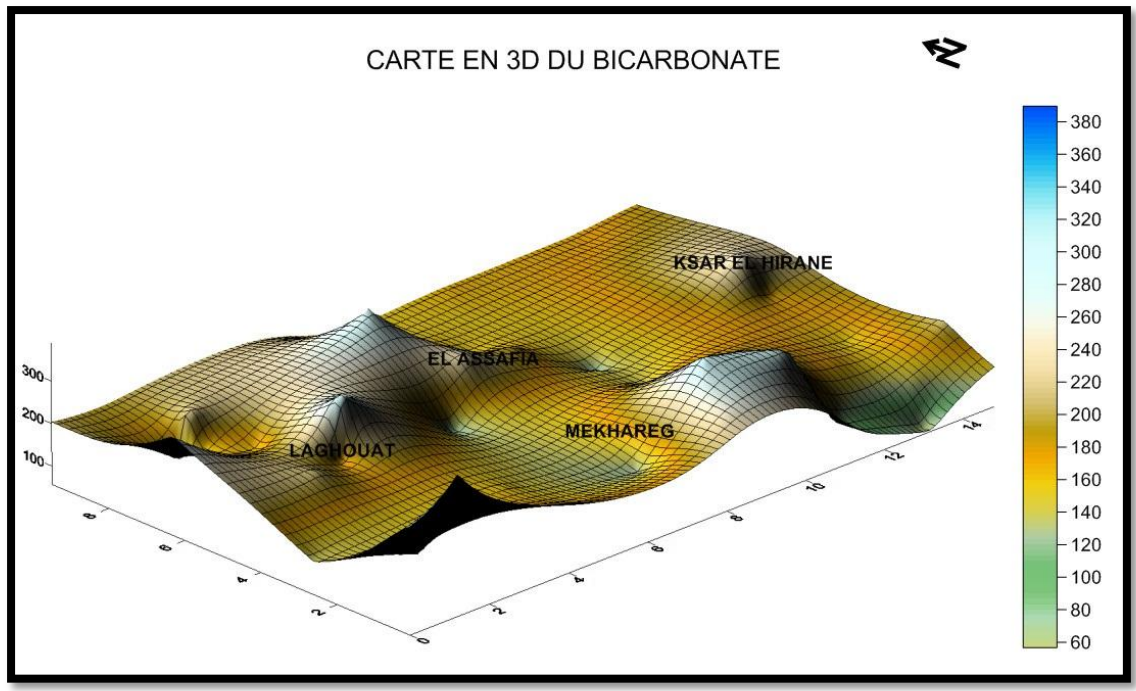
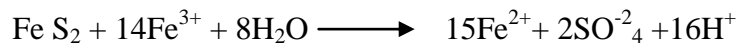
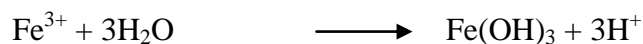
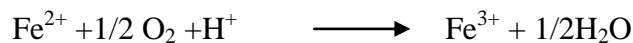
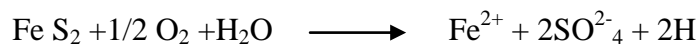


Figure 78: Carte en 3D du Bicarbonates en mg/l

9.5. Sulfates (SO_4^{2-}) :

Les sulfates sont présents à des profondeurs variables dans les eaux naturelles, ils peuvent provenir de la dissolution du gypse qui peut être associé à des formations plus récentes comme le Mio-Plio-Quaternaire ou de la dissolution des minéraux sulfurés par exemple la pyrite.

(D'après W. Stoum et J.J.Morgan, 1970 in BAKALOWICZ 1979)



Dans le cas de la vallée du M'Zi, les sulfates proviennent certainement des argiles du Mio-Pliocène.

En prenant en considération les cartes représentant la distribution spatiale des sulfates, on peut noter deux anomalies :

- L'une se localisant au niveau du secteur de Mkharneg, avec une diminution progressive de l'ion SO_4 .
- L'autre à Ksar El Hirane, enregistrant une augmentation de la teneur en sulfates et qui peut être rattachée à une zone à vocation agricole.

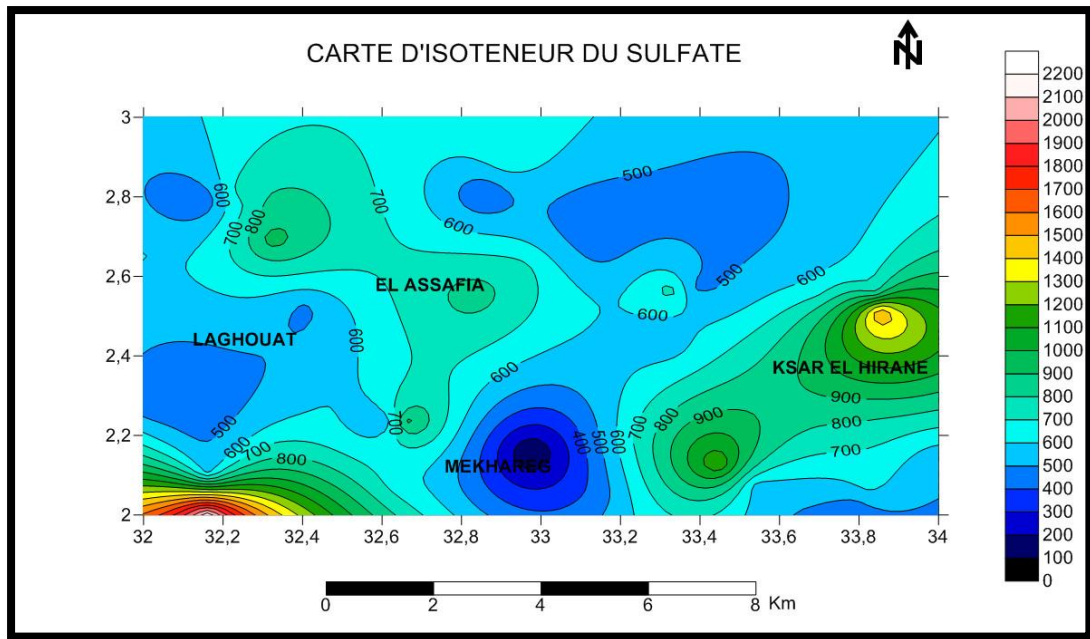


Figure 79: Carte d'isoteneur du Sulfate en mg/l

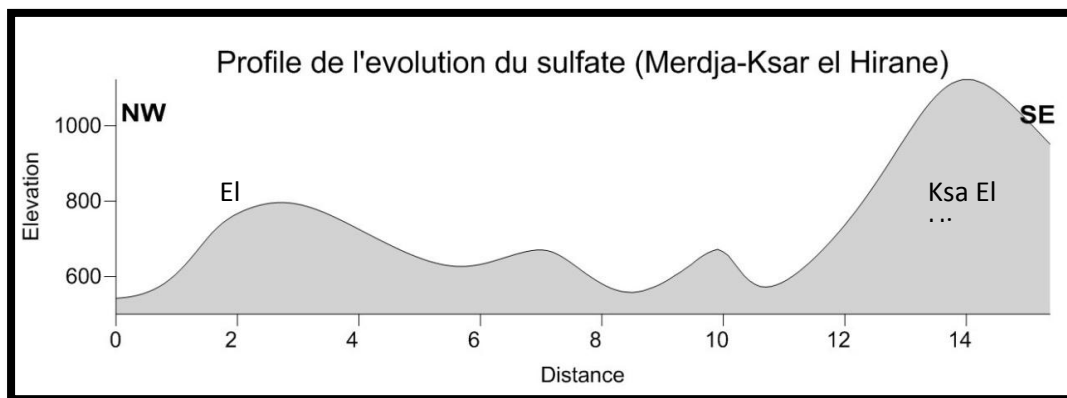


Figure 80: Profil de l'évolution du Sulfate (Merdja-ksar El Hirane) en mg/l

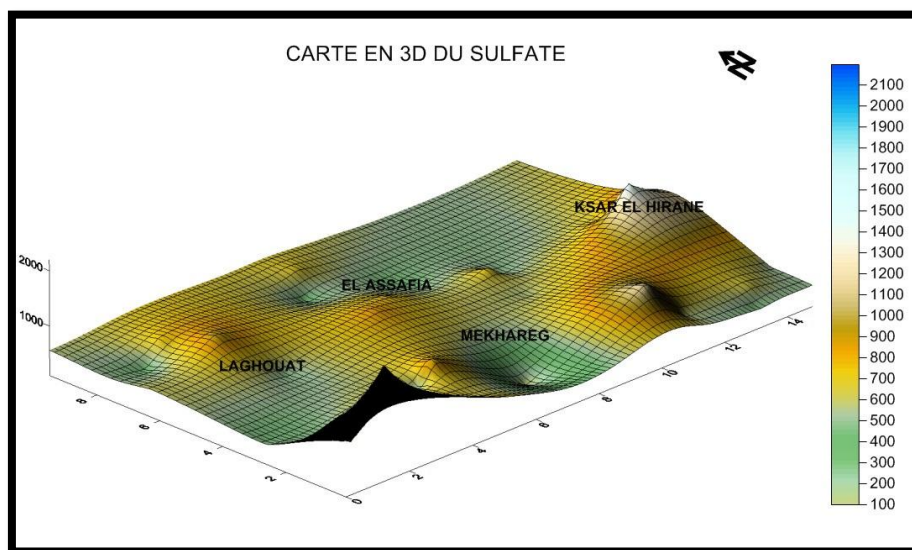
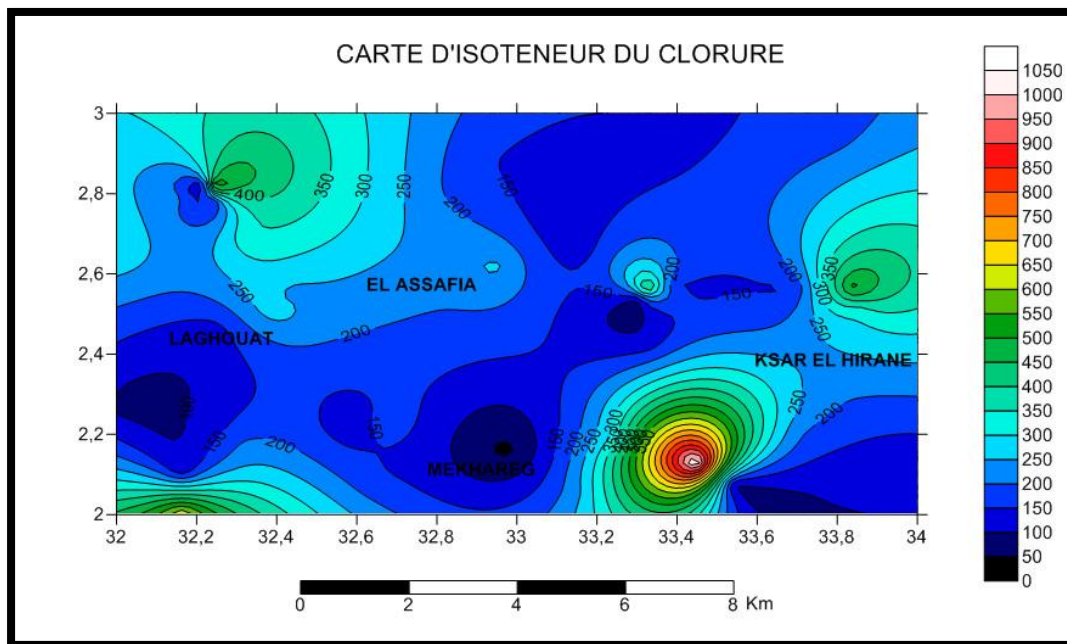


Figure 81: Carte en 3D du Sulfate en mg/l

9.6. Chlorure (Cl⁻)

Les ions du Chlore sont très solubles et très stables, difficile à éliminer. D'après SCHOELLER 1959 la prédominance des chlorures peut être considérée comme marqueur des eaux stockées près de la surface. Les chlorures varient entre 50 mg/l et 950 mg/l.

D'après les figures (, 82 et 83,84), on peut remarquer un schéma d'évolution spatiale des chlorures en relation étroite avec celui des sulfates. La zone autour de Ksar El Hirane enregistre des teneurs élevées en chlorures. Cette situation est d'une part rattachée à la présence d'alluvions plio-quaternaires, et d'autre part à l'usage d'engrais pour les terres agricoles.



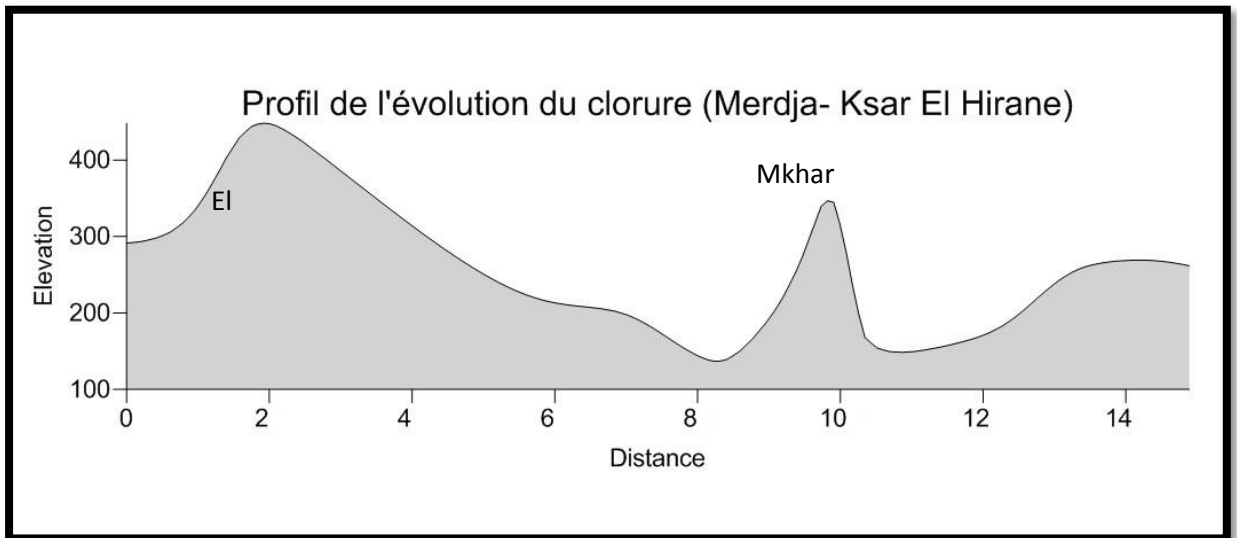


Figure 83: Profil de l'évolution du Chlorure (Merdja-ksar El Hirane) en mg/l

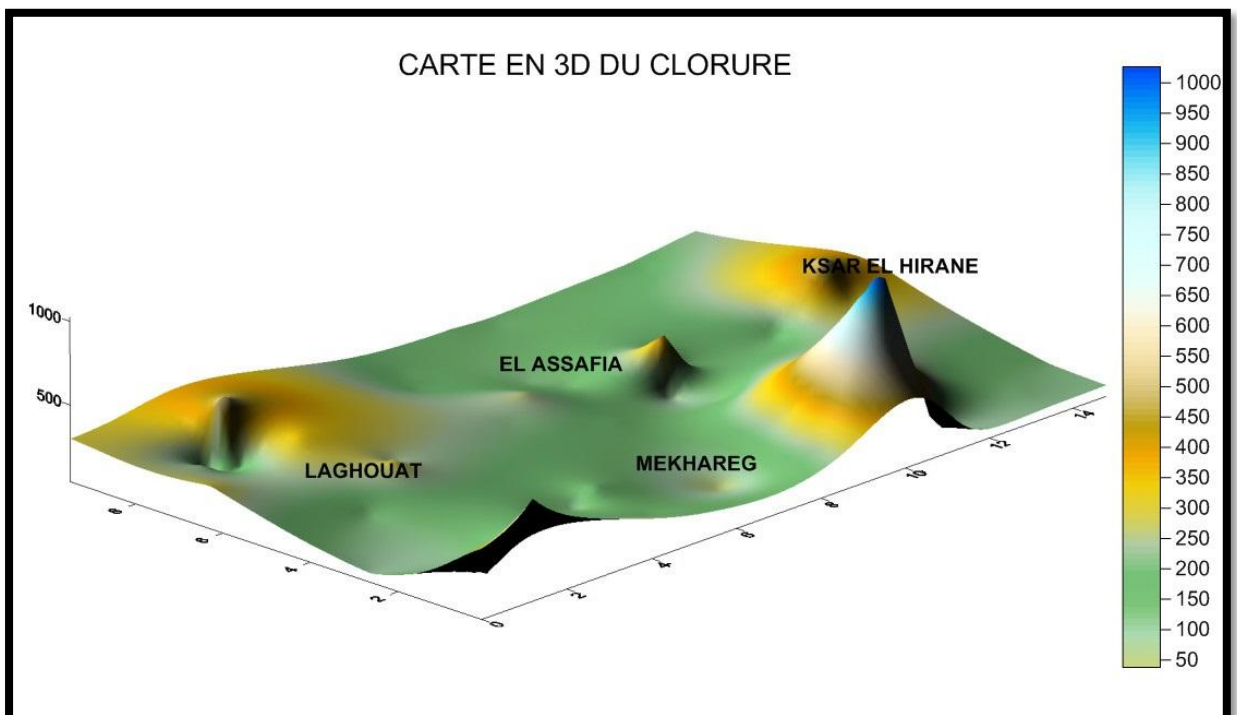


Figure 84: Carte en 3D du Chlorure en mg/l

10. Classification et faciès chimiques des eaux :

10.1. Faciès chimiques :

En prenant en ligne de compte, pour chaque point d'eau l'anion et le cation dominant, on a pu établir les formules caractéristiques des eaux souterraines de la région étudiée.

En ce qui concerne la nappe du Barrémien (Hamda), les eaux sont de faciès chimique essentiellement calcique et sulfaté, montrant ainsi l'influence des argiles à gypse du Cénomaniens. Exceptionnellement, les eaux sont marquées par un faciès bicarbonaté calcique de bonne qualité chimique, en relation intime avec les grès barrémiens au niveau de leur front d'alimentation.

Pour la nappe alluviale, le faciès chimique dominant est de type magnésien et sulfaté, lié à l'environnement géologique formé par des alluvions et les calcaires dolomitiques. Mais on peut noter là aussi, la présence des eaux de faciès sulfaté calcique en liaison avec les argiles gypseuses.

Tableau 76: Formules caractéristiques

d	Formules caractéristiques	Faciès chimique	Echantillon	Formules caractéristiques	Faciès chimique
Hamda FH-1	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rHCO_3^->rSO_4^{--}>rCl^-$	Eau bicarbonatée calcique	Hamda F-6	$rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})>rMg^{++}$ $rSO_4^{--}>rCl^->rHCO_3^-$	Eau calcique sulfatée
Hamda P-2	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rHCO_3^->rCl^-$	Eau calcique sulfatée	Hamda F-8	$rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})>rMg^{++}$ $rSO_4^{--}>rHCO_3^->rCl^-$	Eau calcique sulfatée
Hamda F-2	$rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})>rMg^{++}$ $rSO_4^{--}>rCl^->rHCO_3^-$	Eau calcique sulfatée	Hamda P-1	$rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})>rMg^{++}$ $rSO_4^{--}>rCl^->rHCO_3^-$	Eau calcique sulfatée
Hamda F-3	$rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})>rMg^{++}$ $rCl^->rSO_4^{--}>rHCO_3^-$	Eau calcique chlorurée	Hamda P-11	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rCl^->rSO_4^{--}>rHCO_3^-$	Eau calcique chlorurée
Hamda F-4	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rHCO_3^->rCl^-$	Eau calcique sulfatée	Hamda P-3	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^->rHCO_3^-$	Eau calcique sulfatée
Hamda F-5	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^->rHCO_3^-$	Eau calcique sulfatée	Hamda P-4	$rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})>rCa^{++}$ $rSO_4^{--}>rHCO_3^->rCl^-$	Eau magnésienne sulfatée

Tableau 77 : Formules caractéristiques

Echantillon	Formules caractéristiques	Facies chimique	Echantillon	Formules caractéristiques	Facies chimique	Echantillon	Formules caractéristiques	Facies chimique
Lagh KH-22	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-29	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-05	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée
Lagh KH-43	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-32	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-07	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée
Lagh KH-21	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-33	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Sulfatée calcique	Lagh KH-08	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Sulfatée calcique
Lagh KH-45	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rCl^{-}>rSO_4^{--}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne chlorurée	Lagh KH-39	$r(Na^{++}K^{+})>rMg^{++}>rCa^{++}$ $rSO_4^{--}>rHCO_3^{-}>rCl^{-}$	Sulfatée calcique	Lagh KH-09	$r(Na^{++}K^{+})>rMg^{++}>rCa^{++}$ $rCl^{-}>rSO_4^{--}>rHCO_3^{-}$	Chlorurée sodique
Lagh KH-27	$r(Na^{++}K^{+})>rMg^{++}>rCa^{++}$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau sulfatée sodique	Lagh KH-14	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Sulfatée calcique	Lagh KH-01	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Sulfatée calcique
Lagh KH-42	$rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})>rCa^{++}$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH	$r(Na^{++}K^{+})>rCa^{++}>rMg^{++}$ $rSO_4^{--}>rHCO_3^{-}>rCl^{-}$	Sulfatée calcique	Lagh KH-10	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée
Lagh KH-44	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-02	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Sulfatée calcique	Lagh KH-11	$rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})>rCa^{++}$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée
Lagh KH-28	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-03	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-12	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Sulfatée calcique
Lagh KH-17	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-04	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Sulfatée calcique	Lagh KH-13	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$ $rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	Eau magnésienne sulfatée

Tableau 78 : Formules caractéristiques

Echantillon	Formules caractéristiques	Facies chimique	Echantillon	Formules caractéristiques	Facies chimique	Echantillon	Formules caractéristiques	Facies chimique
Lagh KH-15	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-25	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-37	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée
	$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$			$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$			$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	
Lagh KH-16	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-26	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-38	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée
	$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$			$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$			$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	
Lagh KH-18	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-30	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-40	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée
	$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$			$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$			$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	
Lagh KH-19	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-31	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-41	$rCa^{++}>rMg^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Sulfatée calcique
	$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$			$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$			$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$	
Lagh KH-20	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-34	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée			
	$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$			$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$				
Lagh KH-23	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée	Lagh KH-35	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée			
	$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$			$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$				
Lagh KH-24	$r(Na^{++}K^{+})>rMg^{++}>rCa^{++}$	Sulfatée sodique	Lagh KH-36	$rMg^{++}>rCa^{++}>r(Na^{++}K^{+})$	Eau magnésienne sulfatée			
	$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$			$rSO_4^{--}>rCl^{-}>rHCO_3^{-}$				

11. Diagramme de Schoeller-Berkaloff

La présentation des analyses chimiques sur les diagrammes de Schoeller et de Piper permet d'avoir une approche globale de la tendance chimique de l'eau.

Le diagramme a été établi par Schoeller en 1932, puis révisé par Berkaloff en 1952. Il est composé de sept droites verticales à échelle logarithmique, correspondant aux principaux ions analysés dans l'eau.

La représentation des analyses d'eau montrent que pour la plupart ont la même allure graphique avec des pôles distingués : Ca, Mg, SO_4 (fig. 85,86).

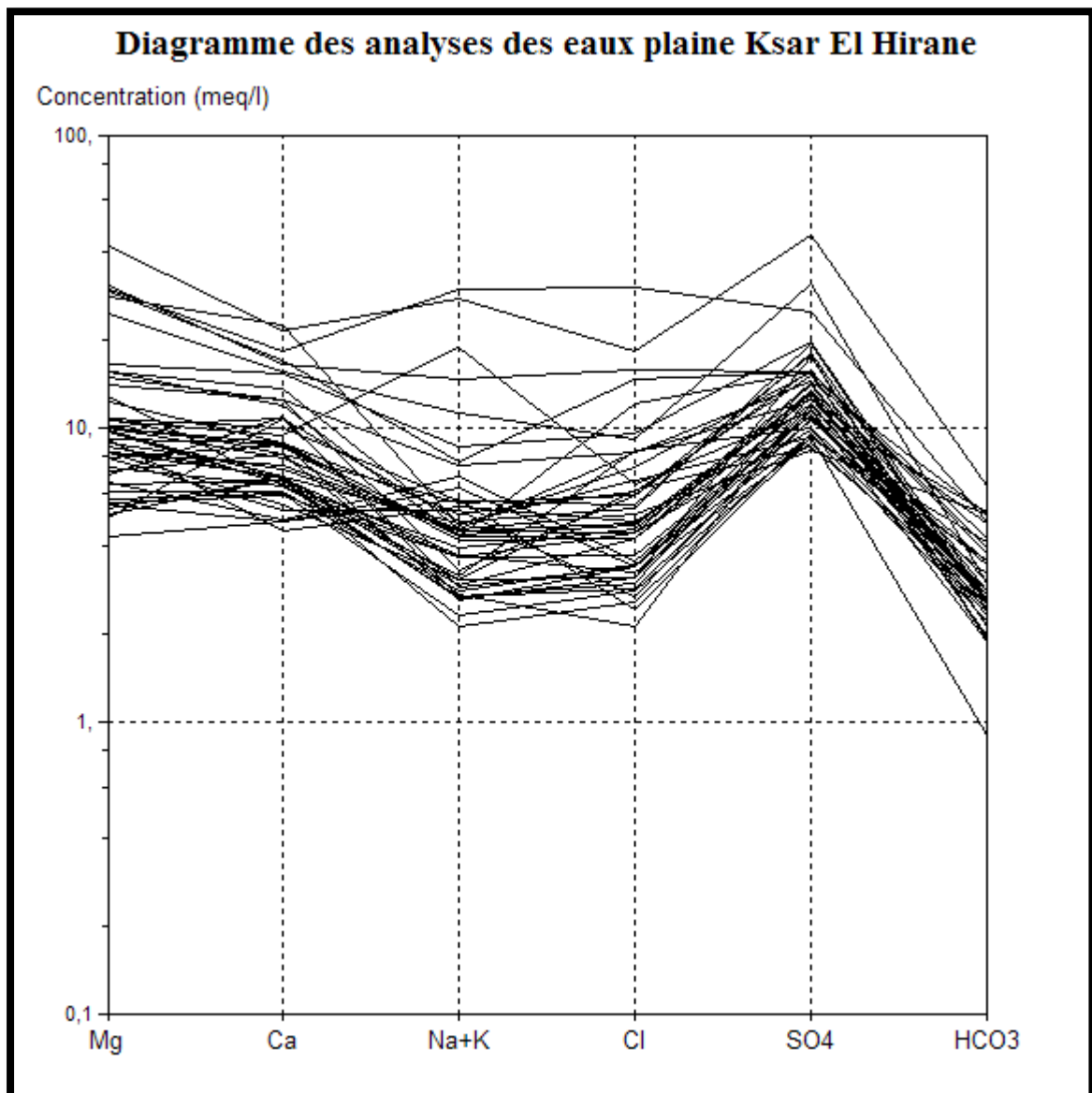


Figure 85: Diagramme des analyses des eaux plaine Ksar El Hirane

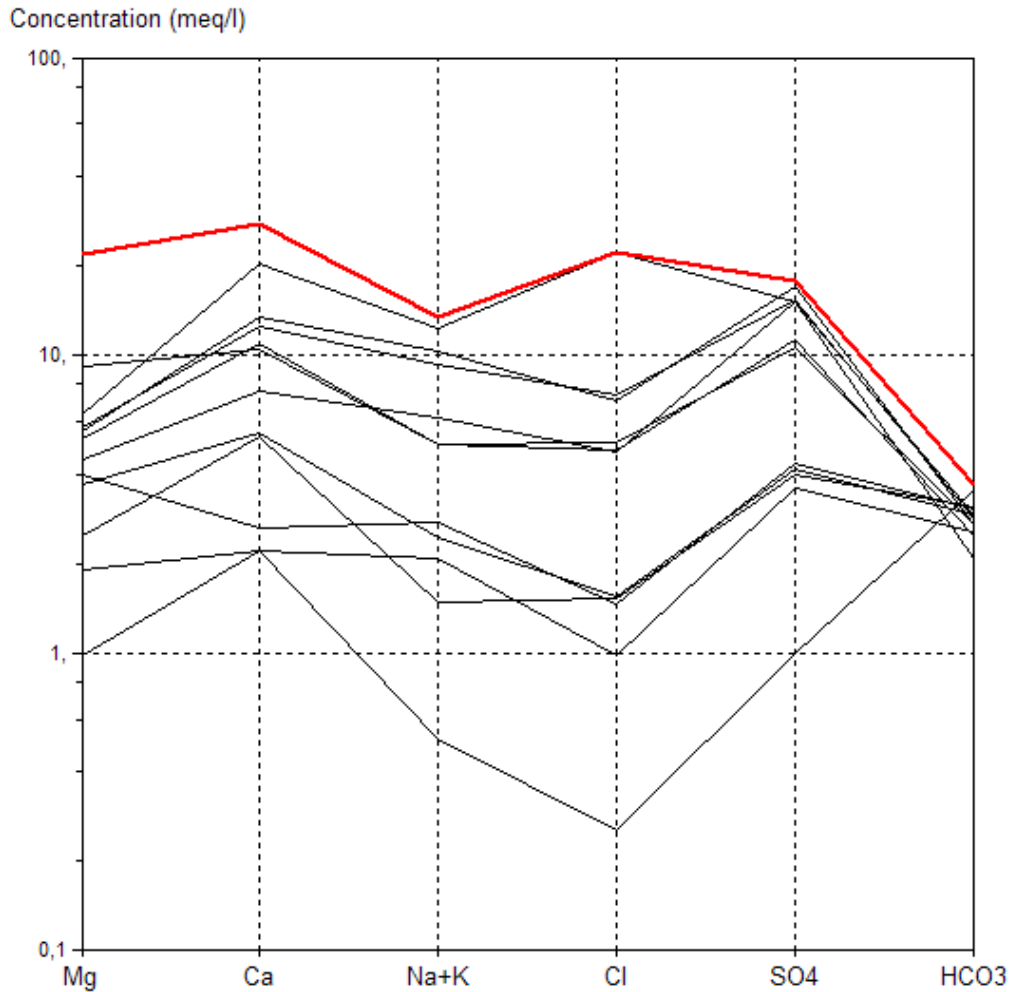


Figure 86: Diagramme des analyses des eaux d'après Schoeller

D'après les ions dominants (Ca, Mg, et SO_4) mis en évidence sur les diagrammes (fig. 85, 86), on peut confirmer la nature des terrains aquifères formés par les calcaires dolomitiques, les grès et les alluvions et dont les eaux souterraines sont influencées par les argiles gypseuses.

Diagramme de Piper

La projection des données sur le diagramme de Piper montre une tendance des cations vers le pôle calcique et les anions vers une tendance sulfatée.

La représentation des analyses des eaux (fig. 87, 88) a permis d'identifier deux grandes familles :

- Sulfatées magnésiennes
- Sulfatées calciques

Ces résultats corroborent parfaitement avec les conclusions précédentes.

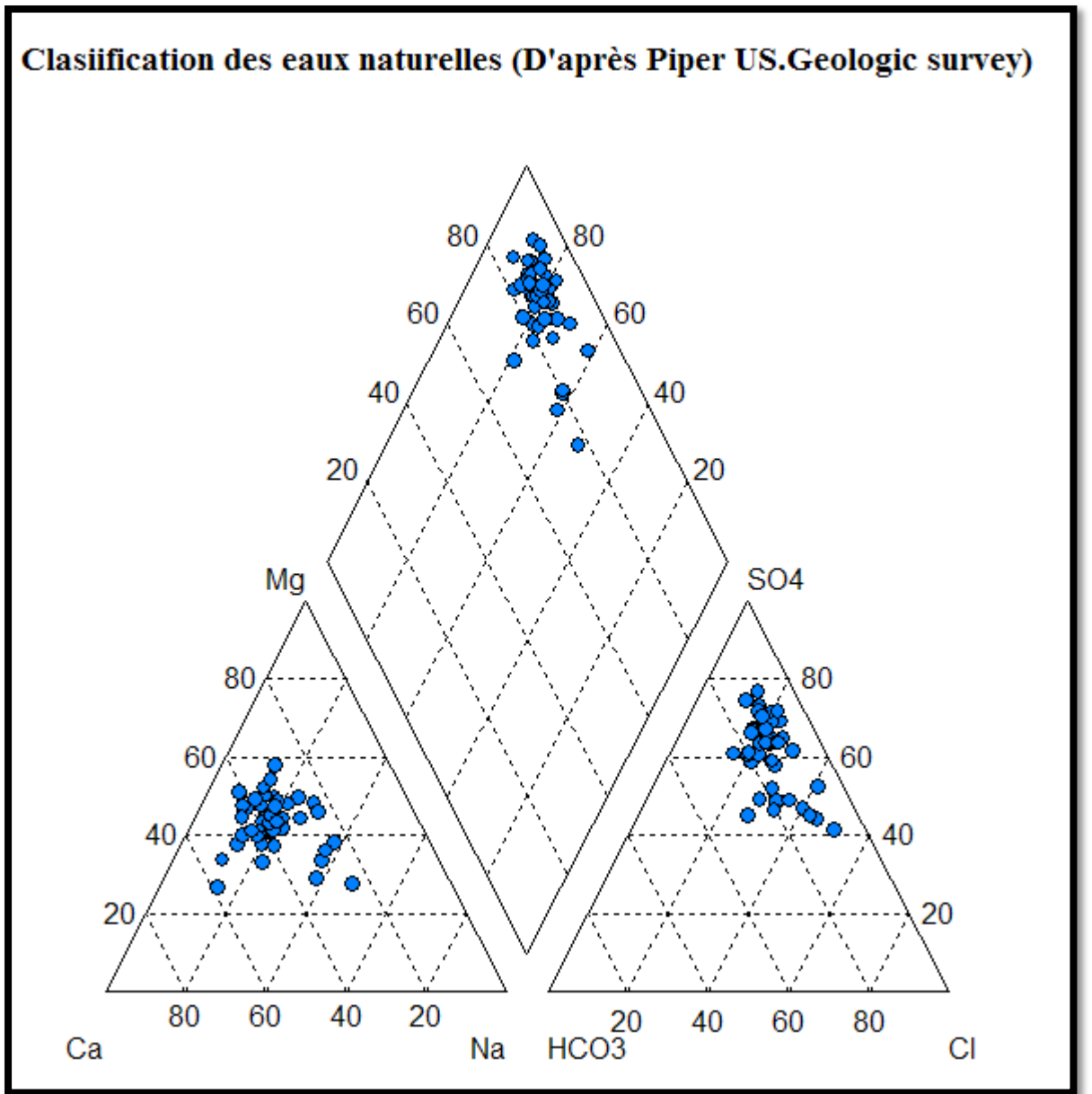


Figure 87: Classification des eaux naturelles (d'après Piper US geologie survey)

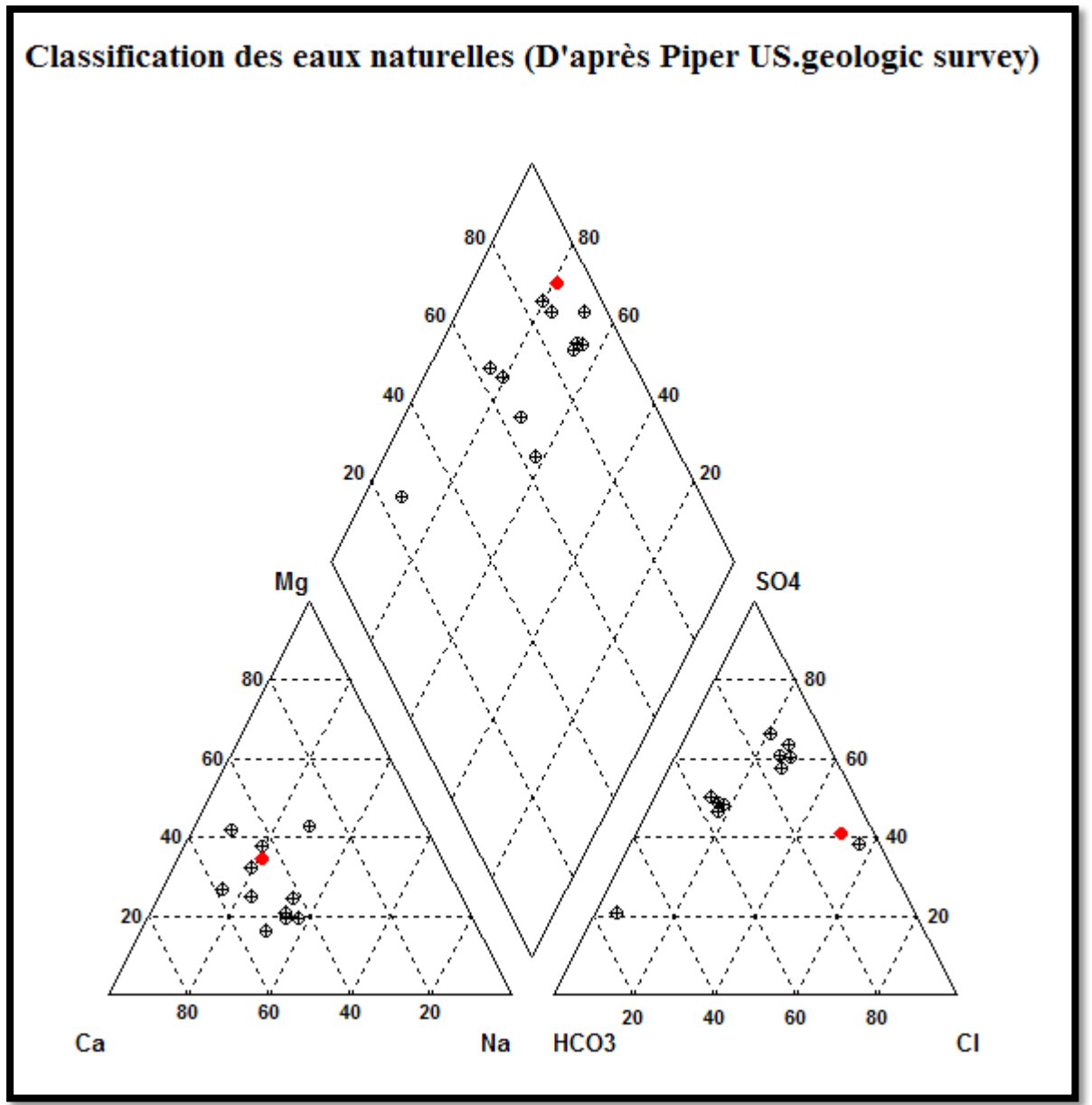


Figure 88: Classification des eaux (d'après Piper US geologue survey)

12. INDICE D'ÉCHANGE DE BASE (i.e.b) :

L'indice d'échange de base (i.e.b) défini par Schoeller (1934), traduit le rapport entre les ions échangés et les ions primitivement existants de même nature dans l'eau. Il permet de mettre en évidence l'évolution du processus chimique de l'eau au cours de son parcours souterrain.

L'indice est calculé par la formule suivante ;

$$i. e. b = \frac{rCl^- - [r(Na^+ + K^+)]}{rCl^-}$$

Selon les valeurs de cet indice on a ;

- Echange des ions Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau par les ions Na^+ et K^+ des formations encaissantes, si l'i.e.b est de signe négatif.
- Remplacement des ions Na^+ et K^+ de l'eau par des ions Mg^{++} et Ca^{++} des formations encaissantes, si l'indice i.e.b est de signe positif.
- Un équilibre entre les composants chimiques de l'eau et ceux du terrain encaissants pour un indice i.e.b nul.

A noter que les argiles possèdent une capacité d'échange i.e.b pratiquement élevée. L'utilisation de cet indice est d'une importance car il met en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain.

Les valeurs de l'i.e.b calculées montrent que les eaux souterraines de l'ensemble des puits captant les nappes de la vallée du M'Zi et la plaine de HAMDA échangent les ions Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau par les ions Na^+ et K^+ des formations encaissantes. Il s'agit là d'une relation évidente entre les eaux des aquifères formés par des grès, calcaires et dolomies et celles de la nappe alluviale Moi-Plio-Quaternaire.

Cependant, pour certains puits F-3, F-4, P-11 et P-3 HAMDA, le puits KH-29 pour la vallée du M'Zi l'indice est positif traduisant un échange des ions Na^+ et K^+ de l'eau par des ions Mg^{++} et Ca^{++} des formations encaissantes.

Tableau 79: balance analyse des eaux de la plaine du Mzi

Echantillon	IEB	Echantillon	IEB	Echantillon	IEB	Echantillon	IEB
Hamda FH-1	-1,02	Lagh KH-22	-1,18	Lagh KH-02	-2,55	Lagh KH-19	-1,87
Hamda P-2	-0,58	Lagh KH-43	-2,25	Lagh KH-03	-1,73	Lagh KH-20	-1,46
Hamda F-2	-0,46	Lagh KH-21	-2,03	Lagh KH-04	-2,87	Lagh KH-23	-1,75
Hamda F-3	0,45	Lagh KH-45	-1,40	Lagh KH-05	-1,67	Lagh KH-24	-1,79
Hamda F-4	0,03	Lagh KH-27	-2,23	Lag KH-07	-1,99	Lagh KH-25	-1,83
Hamda F-5	-1,03	Lagh KH-42	-1,34	Lagh KH-08	-2,27	Lagh KH-26	-1,59
Hamda F-6	-0,31	Lagh KH-44	-1,66	Lagh KH-09	-3,00	Lagh KH-30	-1,05
Hamda F-8	-1,09	Lagh KH-28	-1,99	Lagh KH-01	-2,48	Lagh KH-31	-1,44
Hamda P-1	-0,27	Lagh KH-17	-2,69	Lagh KH-10	-1,13	Lagh KH-34	-1,91
Hamda P-11	0,40	Lagh KH-29	0,32	Lagh KH-11	-1,14	Lagh KH-35	-3,01
Hamda P-3	0,02	Lagh KH-32	-1,70	Lagh KH-12	-3,05	Lagh KH-36	-1,72
Hamda P-4	-0,94	Lagh KH-33	-2,30	Lagh KH-13	-2,01	Lagh KH-37	-1,68
		Lagh KH-39	-2,13	Lagh KH-15	-2,27	Lagh KH-38	-2,54
		Lagh KH-14	-2,22	Lagh KH-16	-0,92	Lagh KH-40	-1,62
		Lagh KH	-4,60	Lagh KH-18	-1,09	Lagh KH-41	-8,09

13. Qualité chimique des eaux

Dans le but d'appréhender de manière éprouvée aussi que possible l'aptitude des eaux de la nappe du M'zi aux principaux usages, on a procédé à l'évaluation de leur qualité, tout en se basant sur un certain nombre de paramètres physique et chimiques. Dans notre présente étude, on a retenu deux principaux usages ; l'alimentation en eau potable (AEP) et l'usage agricole.

14. Aptitude à l'usage d'AEP

Afin de définir la potabilité de l'eau de la nappe du M'zi, nous allons nous baser sur les normes reliées à la dureté totale(DHT).

La DHT indique la teneur totale de l'eau en sel de Calcium (Ca^{++}) et de Magnésium (Mg^{++}). Elle est exprimée en degré français ($^{\circ}F$) et est calculée selon la formule suivante :

$$DHT = 5(rC_a^{++} + rM_g^{++})^{\circ}F$$

Nous avons rassemblé au tableau n° 82 et 83 les résultats du degré hydrométrique total des eaux souterraines.

Tableau 80: dureté des eaux de Hamda

Echantillon	DHT (F °)	Potabilité
Hamda FH-1	20,44	Modérément douce
Hamda P-2	45,96	Dure
Hamda F-2	94,84	Très dure
Hamda F-3	133,97	Très dure
Hamda F-4	39,04	Dure
Hamda F-5	80,97	Très dure
Hamda F-6	60,14	Très dure
Hamda F-8	15,91	Modérément douce
Hamda P-1	91,17	Très dure
Hamda P-11	248,23	Très dure
Hamda P-3	98,72	Très dure
Hamda P-4	32,97	Dure

Tableau 81: dureté des eaux de la vallée du Mzi

Echantillon	DHT (F °)	Potabilité	Echantillon	DHT (F °)	Potabilité	Echantillon	DHT (F °F)	Potabilité	Echantillon	DHT (F °)	Potabilité
Lagh KH-22	68,99	Très dure	Lagh KH-33	32,73	dure	Lagh KH-01	60,67	Très dure	Lagh KH-24	57,36	Très dure
Lagh KH-43	159,62	Très dure	Lagh KH-39	51,51	dure	Lagh KH-10	201,75	Très dure	Lagh KH-25	95,22	Très dure
Lagh KH-21	136,42	Très dure	Lagh KH-14	78,57	Très dure	Lagh KH-11	315,02	Très dure	Lagh KH-26	90,11	Très dure
Lagh KH-45	234,95	Très dure	Lagh KH	45,34	dure	Lagh KH-12	59,44	Très dure	Lagh KH-30	66,1	Très dure
Lagh KH-27	100,88	Très dure	Lagh KH-02	83,4	Très dure	Lagh KH-13	83,38	Très dure	Lagh KH-31	230,45	Très dure
Lagh KH-42	68,12	Très dure	Lagh KH-03	96,52	Très dure	Lagh KH-15	78,97	Très dure	Lagh KH-34	80,6	Très dure
Lagh KH-44	93,6	Très dure	Lagh KH-04	89,44	Très dure	Lagh KH-16	81,8	Très dure	Lagh KH-35	57,41	Très dure
Lagh KH-28	146,52	Très dure	Lagh KH-05	133,13	Très dure	Lagh KH-18	253,96	Très dure	Lagh KH-36	77,12	Très dure
Lagh KH-17	75,98	Très dure	Lag KH-07	104,2	Très dure	Lagh KH-19	68,96	Très dure	Lagh KH-37	90,07	Très dure
Lagh KH-29	95,1	Très dure	Lagh KH-08	104,9	Très dure	Lagh KH-20	80,97	Très dure	Lagh KH-38	137,63	Très dure
Lagh KH-32	60,88	Très dure	Lagh KH-09	134,58	Très dure	Lagh KH-23	76,71	Très dure	Lagh KH-40	106,11	Très dure
									Lagh KH-41	65,52	Très dure

Pour l'ensemble des eaux des nappes, il s'avère que leur "THT" est élevé ; il s'agit par conséquent d'une potabilité caractérisée par des eaux dures à très dures.

15. Aptitude à l'usage agricole

L'eau destinée à l'agriculture doit présenter des caractéristiques physiques et chimiques tolérables par les plantes et au sol. Les fortes teneurs en Sodium, par exemple, détruisent la structure physique du sol, où les particules d'argiles se gonflent puis se dispersent, rendant la circulation de l'eau très lente. La dégradation de la

structure physique du sol se traduit donc par l'abaissement de sa perméabilité et de son pouvoir d'aération.

Dans le but d'étudier l'aptitude des eaux de la région de Laghouat à l'irrigation, on a fait appel à la méthode du S.A.R.

Le SAR

Le risque d'abondance de Sodium dans l'eau peut être mis en évidence par la valeur du Sodium absorbable " Sodium Absorption Ratio" (S.A.R).

D'après Richards, le S.A.R est donné par la formule ;

$$S.A.R = \frac{rN_a^+}{\sqrt{\frac{rC_a^{++} + rM_g^{++}}{2}}}$$

Les valeurs déduites du S.A.R sont consignées au tableau n° 100, 101.

En combinant le S.A.R avec la conductivité électrique de l'eau, nous avons représenté tous les points d'eau sur les figures n° 111 et 112.

D'après les points représentatifs, il s'avère que les eaux sont pour la plupart classées dans le couple : C₁-S₁ ou C₂-S₁, c'est-à-dire de qualité bonne à moyenne pour l'irrigation.

Tableau 82: Résultats du SAR (nappe Hamda)

Echantillon	Hamda FH-1	Hamda P-2	Hamda F-2	Hamda F-3	Hamda F-4	Hamda F-5	Hamda F-6	Hamda F-8	Hamda P-1	Hamda P-11	Hamda P-3	Hamda P-4
SAR	0,30	1,01	3,25	3,30	0,68	1,71	2,47	1,52	3,03	2,58	1,50	1,46

Tableau 83: Résultats du SAR (nappe alluviale)

Echantillon	SAR	Echantillon	SAR	Echantillon	SAR	Echantillon	SAR
Lagh KH-22	1,08	Lagh KH-33	0,90	Lagh KH-01	0,79	Lagh KH-24	2,78
Lagh KH-43	2,07	Lagh KH-39	2,68	Lagh KH-10	2,42	Lagh KH-25	1,73
Lagh KH-21	1,98	Lagh KH-14	0,96	Lagh KH-11	4,80	Lagh KH-26	1,38
Lagh KH-45	2,92	Lagh KH	2,61	Lagh KH-12	1,43	Lagh KH-30	1,83
Lagh KH-27	5,78	Lagh KH-02	1,43	Lagh KH-13	0,98	Lagh KH-31	1,56
Lagh KH-42	2,00	Lagh KH-03	0,95	Lagh KH-15	1,49	Lagh KH-34	1,50
Lagh KH-44	1,29	Lagh KH-04	0,83	Lagh KH-16	0,87	Lagh KH-35	1,45
Lagh KH-28	1,02	Lagh KH-05	0,83	Lagh KH-18	0,83	Lagh KH-36	0,97
Lagh KH-17	1,66	Lagh KH-07	1,66	Lagh KH-19	1,24	Lagh KH-37	0,78
Lagh KH-29		Lagh KH-08	1,41	Lagh KH-20	1,30	Lagh KH-38	1,08
Lagh KH-32	1,06	Lagh KH-09	5,99	Lagh KH-23	0,91	Lagh KH-40	1,47
						Lagh KH-41	0,95

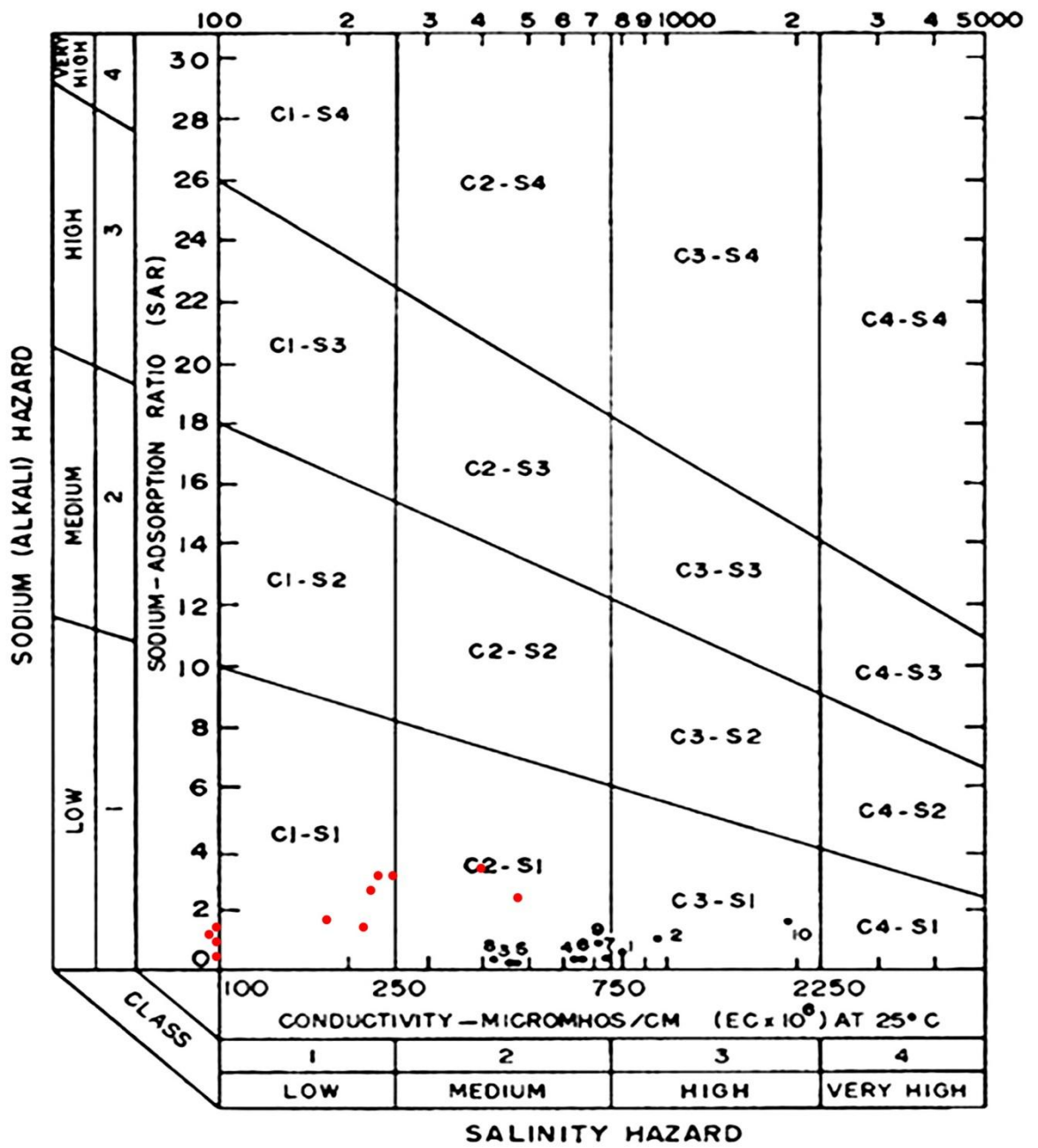


Figure 89: S.A.R Hamda

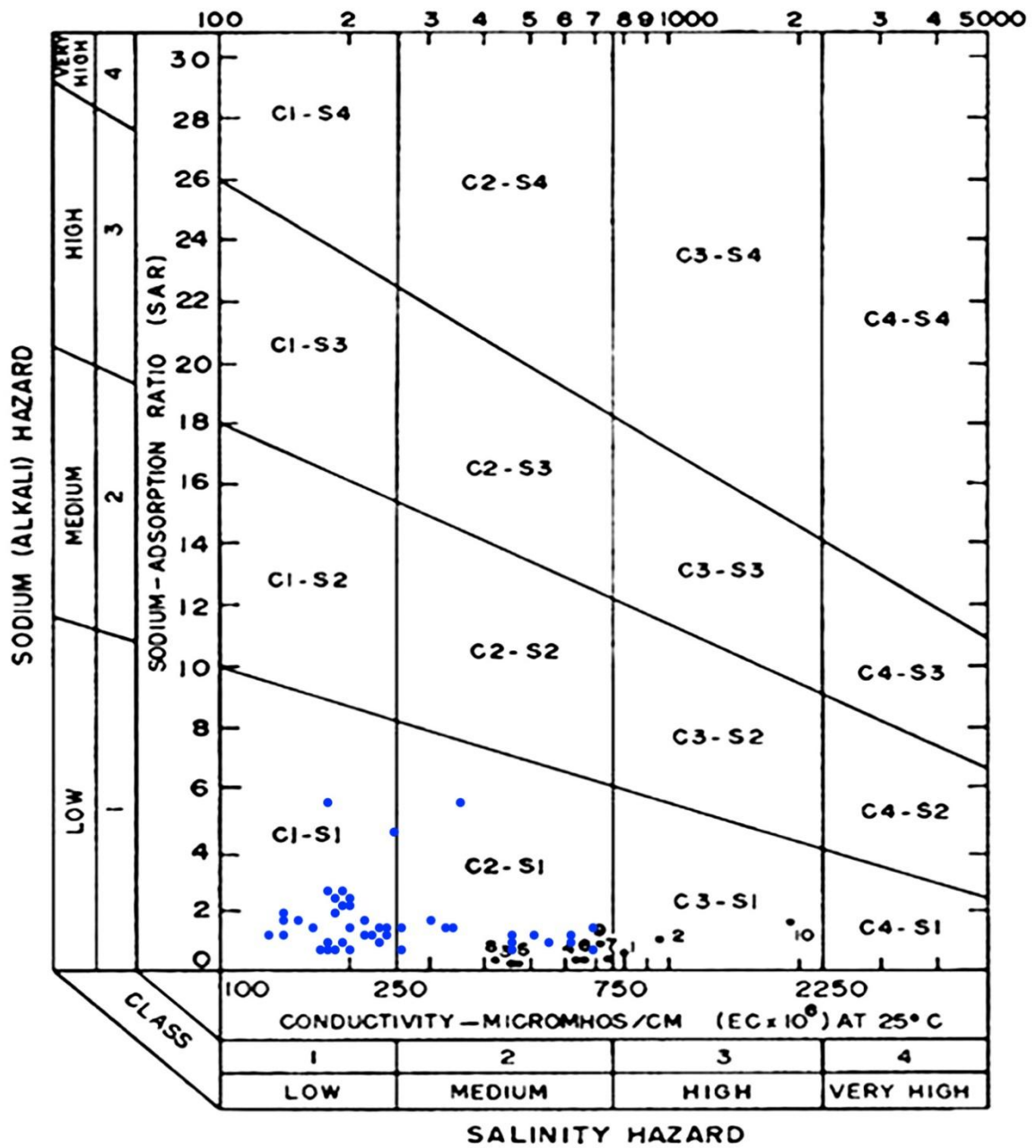


Figure 90: S.A.R vallée du M'zi

III- Interprétation de la qualité des eaux d'irrigation :**1. Analyse des classes de salinité et de sodicité :**

- | | |
|---|--|
| 1-Salinité :
- C1 : risque faible
- C2 : risque moyen
- C3 : risque élevé
- C4 : risque très élevé | 2- Sodicité :
S1 : risque faible
S2 : risque moyen
S3 : risque élevé
S4 : risque très élevé |
|---|--|

2. interprétation des classes de couples : salinité-sodicité :

- C1-S1: Bonne qualité pour l'irrigation. Précaution avec les plantes sensibles.
- C1-S2 et C2-S1: Qualité moyenne à bonne. A utiliser avec précaution dans les sols lourds mal drainés et pour les plantes sensibles (arbres fruitière).
- C2-S2, C1-S3 et C3-S1 : Qualité moyenne à médiocre. A utiliser avec précaution. Nécessite de drainage avec doses de lessivage et/ou apport de gypse.
- C1-S4, C2-S3, C3-S2 et C4-S1 : Qualité médiocre à mauvaise. Exclure les plantes sensibles et les sols lourds. Utilisable avec beaucoup de précautions dans les sols légers et bien drainés avec doses de lessivage et/ou apports de gypse.
- C2-S4, C2-S4 et C3-S3 : Qualité mauvaise. A n'utiliser, avec beaucoup de précautions, que dans les sols légers et bien drainés et pour des plantes résistes. Risques élevés. Lessivage et apports de gypse indispensables.
- C3-S4 et C4-S3 : Qualité très mauvaise. A n'utiliser que dans des circonstances exceptionnelles.
- C4S4 : Déconseillée pour l'irrigation.

IV- Cas de l'eau minérale Milok :

Il nous a semblé intéressant de préciser le contexte hydrogéologique du captage de l'eau minérale "Milok" qui se trouve localisé au niveau de la région étudiée, et de proposer un périmètre de protection de ces eaux souterraines.

Tableau 84: Caractéristiques du captage "Milok"

Dénomination	Eau minérale Hamda
Site	Hamda
Location	Laghouat
Date	13/05/1986
Aquifer geology	Barrémien
Lithology	Grès
Reference	SONATRACH

1. Caractéristique chimiques :

Il s'agit d'une eau minérale de faible minéralisation (eau légère), présentant un faciès chimique de très bonne qualité "bicarbonaté calcique" et un degré hydrométrique montrant une eau douce.

Hardness	meq/l	°f	°g	mg/l CaCO3
Total hardness	4,1	20,49	11,48	204,9
Permanent hardness	2,08	10,41	5,83	104,1
Temporary hardness	2,02	10,08	5,65	100,8
Alkalinity	2,02	10,08	5,65	100,8

(1 °f = 10 mg/l CaCO3/ 1 °g = 10 mg/l CaO)

	mg/l	mmol/l	meq/l	meq %
Na+	14,0	0,609	0,609	0,0
K +	4,0	0,102	0,102	0,0
Ca++	64,0	1,597	3,194	30,813
Mg++	11,0	0,452	0,905	0,0
Cl-	36,0	1,015	1,015	10,271
SO4--	91,0	0,947	1,895	10,271
HCO3-	123,0	2,016	2,016	20,542

2. Rapports caractéristiques:

D'après les résultats des rapports caractéristiques les eaux sont issues de la nappe du Barrémien (Ca/Mg= 5,8), dont les influences par les argiles gypseuses de fort sentir (Ca/SO4=0,7, Na/Cl=0,38).

	mg/l
Ca/Mg	5,818
Ca/SO4	0,703
Na/Cl	0,389

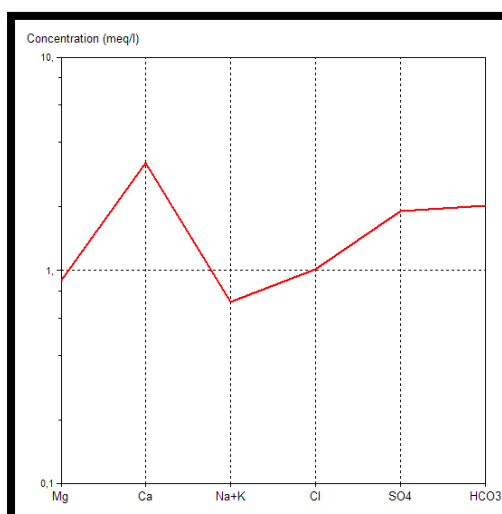


Figure 91: Diagramme des analyses des eaux d'après Shoeller

3. Le périmètre de protection du forage de Milok (eau minérale)

Le périmètre de protection est un contour délimitant le domaine géographique à l'intérieur duquel est interdite ou réglementée toute activité susceptible de porter atteinte à la conservation qualitative et quantitative des ressources en eaux souterraines. On distinguera :

3.1. Périmètre de protection immédiat (zone I)

3.1.1. Délimitation

Les dimensions de la Zone I sont au minimum de 30 m en amont et 10 m dans les autres directions par rapport au point d'eau. Il correspond donc à l'environnement proche du point de captage. Ce périmètre a pour fonction principale d'empêcher la détérioration de l'ouvrage et d'éviter les déversements de substances polluantes à proximité immédiate du captage.

3.1.2. Servitudes

Toutes activités sont interdites à l'intérieur de la Zone I. Elle doit être clôturée à l'exception de l'exploitation et l'entretien des équipements et des activités autorisées dans l'acte de déclaration d'utilité publique.

Le terrain est acquis en pleine propriété par l'état, sauf en cas d'impossibilité.

3.2. Périmètre de protection rapproché ou intermédiaire (zone II)

Le périmètre de protection rapproché doit protéger efficacement le captage vis-à-vis de la migration souterraine de substances polluantes. Sa surface dépend des caractéristiques de l'aquifère, des débits de pompage et de la vulnérabilité de la nappe.

Le temps de transfert retenu entre la pollution et le captage est d'environ 50 jours, ce qui représente suivant les terrains gréseux en présence une surface comprise entre 1 et 100 hectares.

3.2.1. Délimitation

De prime abord, il faut garder à l'esprit que la raideur des versants, surtout la partie occidentale, intensifie avant tout l'activité des divers processus de transport

(c'est aussi les lieux où les eaux courantes exercent au maximum leurs activités de transport, d'ablation latérale et d'accumulation), en raison de l'amointrissement des forces d'inertie opposées à l'action de la gravité. Les fortes pentes contribuent aussi, avec les basses températures, à limiter la plupart des activités de pédogenèse (les fortes pentes constituent l'un des facteurs essentiels du déclenchement des érosions accélérées). De ce fait, les sols y restent souvent minces, discontinus et peu évolués. En conséquence, le pouvoir auto épurateur de la couverture (sol) se retrouve amoindri permettant ainsi à la propagation de la pollution de connaître une efficacité accrue fragilisant de plus en plus l'état du forage.

Il y a lieu de souligner que les éléments, précédemment cités, se trouvent en dehors du rayon de 1000 m (rayon d'action minimum 1000 m en amont du forage, mais à l'intérieur du bassin versant du point d'eau. Par définition ils font partie de la Zone II.

3.2.2. Servitudes

La Zone II comprend les aires où toute activité polluante aboutira à une mise en danger immédiate du forage. Les servitudes doivent être très strictes et par conséquent toute activité potentiellement polluante est interdite, toutes les activités, installations et dépôts susceptibles de nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux sont également interdits. Sont généralement interdits dans ce périmètre :

- le forage et puits autres que ceux nécessaires à l'extension du champ captant et à la surveillance de sa qualité.
- l'exploitation des carrières à ciel ouvert, l'ouverture et le remblaiement d'excavations à ciel ouvert ;
- le dépôt d'ordures ménagères, immondices, détritiques et produits radioactifs et de tous produits et matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux ;
- l'installation de canalisations, réservoirs ou dépôts d'hydrocarbures liquides ou gazeux, de produits chimiques et d'eaux usées domestiques ou industrielles ;
- l'épandage ou l'infiltration des lisiers et d'eaux usées d'origine domestique ou industrielle.

3.3. Périmètre de protection éloigné ou hydrogéologique (zone III)

3.3.1. Délimitation :

La Zone III, correspondant aux limites du bassin versant **du forage d'Aïn Mansour**, comprenant au moins toutes les surfaces à risque de pollution élevé dans cette partie du bassin versant, dominées par les formations gréseuses. Ces formations sont parcourues de ravineaux secs débouchant parfois dans des dépressions de formes et de dimensions variables comme les dépressions fermées de type dolines.

Les parties les plus hautes de la zone d'alimentation sont fortement fracturées et accompagnées d'une intense fissuration suivant les directions grossièrement orthogonales: Nord 60° et Nord 140°.

Plusieurs Oueds ou chabets, caractérisés par un écoulement temporaire, drainent le bassin versant hydrogéologique du forage et font, par définition, partie de la Zone III ainsi que les ravins.

3.3.2. Servitudes

Dans la Zone III, les installations et activités, ci-dessous énumérées, sont interdites ou devant être réglementées :

- Cimetières.
- Carrières/excavations.
- Pacage d'animaux.
- Pesticides/herbicides
- Déversement des eaux usées
- Dépôts d'hydrocarbures
- Stations de services
- Terrains militaires
- Dépôts d'ordures

Le dernier périmètre n'a pas de caractère obligatoire. Il renforce le précédent et peut couvrir une superficie très variable où peuvent être réglementés les activités, dépôts ou installations qui, malgré l'éloignement du point de prélèvement et compte tenu de la nature des terrains, présentent un danger de pollution pour les

eaux prélevées, par la nature et la quantité de produits polluants mis en jeu ou par l'étendue des surfaces qu'ils affectent.

Il s'agit donc d'un périmètre qui dépend fondamentalement de la structure géologique et de la configuration spatiale de l'hydrodynamique des eaux souterraine.

V- IMPACT DE LA POLLUTION

Les eaux souterraines constituent une ressource économique et écologique de première importance. Toutefois, ces réserves s'épuisent et leur qualité se dégrade sous l'effet des différentes activités humaines.

Par ailleurs, la demande en eau est à satisfaire non seulement du point de vue quantité mais devant répondre surtout aux exigences de qualité.

La sensibilisation des agriculteurs sur l'impact de l'utilisation en excès des engrais sur la qualité des eaux souterraines est très importante.

Enfin, un suivi de la qualité des eaux et de mesures piézométriques régulier est recommandé en vue de préserver ces ressources.

La pollution détériore la qualité de l'environnement en provoquant aussi de grands dangers pour les eaux souterraines et superficielles.

Les facteurs de pollution sont multiples : industrie, agriculture, vie domestique et vie biologique, ainsi d'autre types de pollution liée aux formations géologiques qui se produit grâce à leur lessivage par les eaux.

Dans la région étudiée, il y a trois sources principales de la pollution :

- Pollution d'origine domestique et urbaine : due à l'usage de l'eau par les foyers domestiques, ce type de pollution caractérise la région de Laghouat et la partie centrale du bassin versant, mais reste relativement peu importante du fait du nombre assez réduit d'habitants dans cette région.

- Pollution d'origine agricole : due à l'usage excessif des engrais chimiques pour la fertilité des sols surtout dans la partie nord au niveau de la plaine de Hamda. Cette forme de pollution est également très limitée.
- Pollution Industrielle: Elle est le résultat de la présence des unités de transfert et de pompage des hydrocarbures de la SONATRACH, sises dans la région de Milok et Messeka. Un risque d'éventuelle pollution des ressources souterraines peut exister, si des mesures de protection n'ont pas été prises.
- Quant aux rejets des effluents domestiques au niveau de l'Oued M'Zi et de l'Oued Messaad, il est impératif de raccorder tous les rejets des eaux de l'assainissement aux réseaux allant vers la station d'épuration de sidi Hakoum.
- Par ailleurs la station de compression SC4 située en amont de l'Oued M'Zi, des études d'impacts sur l'environnement ont été réalisées par SONATRACH pour parier à toute éventualité de pollution.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La zone d'étude fait partie de l'ensemble de l'atlas saharien, régie par un climat aride à semi-aride avec une précipitation moyenne annuelle de 160mm.

Ce type de climat est caractérisé par une grande variabilité annuelle et interannuelle, avec de grandes périodes sèches. La pluviométrie qui régit le régime des eaux souterraines et superficielles, se caractérise par des précipitations irrégulières ayant lieu, généralement, entre octobre et avril. Les précipitations se concentrent, souvent, durant quelques jours ou quelques heures. Les températures sont assez élevées (moyennes maximales atteignent 16,87 °C).

La zone est drainée en grande partie par l'oued Messaad et l'oued sekhlafa, qui tous les deux rejoignent l'oued M'zi.

Dans son contexte régional, le secteur d'étude appartient au domaine de l'atlas saharien, ceci correspond à une grande chaîne intracratonique, formée de terrains méso-cénozoïques, constituant la couverture sédimentaire d'un socle paléozoïque. Cette chaîne est limitée au Nord par l'accident Nord atlasique et au sud par l'accident sud atlasique.

L'étude géologique nous a permis de mettre en évidence la présence des formations favorables au développement des aquifères (fissurés, poreux et karstiques), il s'agit des calcaires dolomitiques fissurés au niveau de Dj. Molik et le synclinal de la Dakhla, les massifs gréseuses Barrémo-Valanginen couvrant toute la région de Hamda, et enfin les formations alluvionnaires Mio-Pliocène tapissant la vallée de l'oued M'zi.

Du point de vue hydrogéologique, la zone étudiée abrite principalement deux nappes ; l'une superficielle localisée dans les alluvionnaires Mio-Pliocène de la vallée du M'zi de, l'autre profonde contenue dans les grès poreux du Barrémien et Valanginien région de Hamda.

Les sondages électriques effectués dans la région, ont permis de mettre en évidence la structure plissée de la région du Milok, correspondant à un synclinal dissymétrique à flanc redressé vers le Sud-Est, suivi par un anticlinal érodé à cœur d'âge Crétacé inférieur. Les formations Albien-Cénomaniens et Valanginien-Barrémien sont représentées par deux niveaux résistants séparés par un horizon conducteur.

L'examen de la carte piézométrique du Barrémien au niveau de la plaine de Hamda, montre un écoulement général Sud-Est Sud-Ouest, avec un écoulement local au niveau du Milok qui se fait du Nord vers le Sud. Du grès barrémien vers l'oued M'zi.

Le gradient varie de 0,19 à 0,39. A noter qu'au niveau du chapeau de gendarme, zone très fracturée, l'écoulement des eaux se fait de l'oued M'zi vers les grès barrémiens.

Les essais hydrodynamiques nous ont permis de calculer le coefficient d'emmagasinement de l'ordre de 10^{-4} , ce qui confirme le caractère captif à semi-captif de l'aquifère.

En ce qui concerne le comportement hydrodynamique de la nappe alluviale 140 points d'eau ont été inventoriés. La piézométrie révèle un écoulement Nord-Ouest Sud-Est au niveau de la flexure Sud atlasique. A l'aplomb de l'aérodrome et Mkhareg, l'oued alimente les alluvions. Par contre, au niveau du pont de l'oued M'zi, on révèle des écoulements superficiels permanents sur une longueur d'environ de 500 mètres. Ceci est dû probablement, à l'existence d'une barrière étanche du calcaire turonien. Le gradient hydraulique est élevé au niveau de la zone d'alimentation (0,28), et diminue progressivement le long de l'écoulement pour atteindre 0,03 au niveau Ksar El Hirane et Kabeg.

L'étude hydro chimique des nappes montre que les eaux présentent un faciès chloruré sodique. La représentation cartographique des éléments nous a permis d'étudier l'évolution spatiale de la chimie des eaux.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- ABED S. (1982)** : Lithostratigraphie et sédimentologie du Jurassique moyen et supérieur du Djebel Amour. Thèse de doctorat 3 ième cycle; univ. de Pau et des pays de l'Adouire.
- ABADA A. et Isaadi A. (1977)** : Contribution à l'étude hydrogéologique de la région de Laghouat. DEA, Alger.
- ACHOUR M., BENSABA H. CHENAFI A. HASSANI M. I.(2012)** : Contribution du SIG à l'élaboration d'une méthodologie de calcul des paramètres physio-graphiques d'un bassin versant, cas du bassin versant du M'zab (Algérie). Colloque international, Terre et Eau Univ. Annaba, Algérie novembre 2012.
- ANP (1972)** : Etude hydrogéologique du bassin versant de Sidi Bouzid. Rapport inédit.
- ANRH - ENAGEO (1986)** : Etude géophysique et hydrogéologique du synclinal d'Aflou.
- ANRH - ENAGEO (1988)** : Etude géophysique complémentaire dans le synclinal d'Aflou.
- ANRH** : Données hydrométriques des Oueds : Sidi Naceur, Touil, Seklafa et M'Zi.
- ANRH** : Données climatologiques des stations du Djebel Amour.
- Archambault J (1987)** : Réflexion sur l'alimentation et l'évaporation des nappes phréatiques en Afrique sub-saharienne. Hydro. N°2 Burgeap, Paris. pp 69-78.
- Aricha M et Si Merabet M.A (1990)** : Etude hydrogéologique du bassin versant de l'Oued Morra (Atlas Saharien Central), daïra d'Aflou. Mém. d'ing. IST (Oran), 245 p.
- Arlery R. ,Grisollet H., Guilmet BO (1973)** : Climatologie. Méthodes et pratiques .Ed Gauthier-Villars. 2e Edition 434 p.
- Astier J.L (1971):** Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Edit Masson et Cie.
- Bacalowicz M. et Oberlin G (1972)** : Pour une méthodologie des évaluations de l'évapotranspiration.
Journ. of hydrogéologie 15. pp 187-191.
- Bagnouls F. et Gaussen H. (1954)** : Les climats biologiques et leurs classifications. Ann. de géogr., p 193-220.
- Basseto D. et Coumes F (1967)** : Série lithologique du Djebel El Azreg de Laghouat Etude stratigraphique de la zone de passage Jurassique Crétacé. Publ. Serv. Geol. de l'Algérie. Bull. N° 35 (Nlle série), p. 13-20.
- Basseto D. et Guillemot J. (1971)** : Notice explicative de la carte géologique à 1/200.000 Ain Riche.
Serv. géol. de l'Algérie, 74 p.
- Bassoulet J. P (1973)** : Contribution à l'étude stratigraphique du Mésozoïque de l'Atlas Saharien Occidental (Algérie). Thèse d'Etat, Université de Paris. Tome I, 314 p, 37 fig.

- B.N.E.H** : Alger, barrage de Seklafa dans la wilaya de Laghouat, Etude de faisabilité. C – Hydrogéologie2, Annexes du rapport. Secrétariat d'Etat à l'Hydraulique, Alger.
- Bobée B. (1978)** : Eléments de statistiques. Rapport LHM / 79 / RD / 28.
- Bobée B., Ashkar F. (1991)** : The gamma family and derived distributions applied in hydrology. Water resources publications. 203 p.
- 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.
- Boukhachba S. et Ouali B.E (1992)** : Etude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'Oued El - Mallah (Djebel Amour), Atlas Saharien central. Mém. ding. IST (Oran).
- BRGM (1972)** : Interprétation des données de pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères. Aide-mémoire- 72 SGN 273 AME,102 p.
- BRGM (1991)** : Mécanismes d'acquisition de la qualité chimique d'une eau souterraine. Etude expérimentale in situ, N° 79, SGN. 661 hydro, 120 p.
- Brochet P. et Gerbier N. (1974)** : L'évapotranspiration, aspect agrométéorologique, évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Monographie N° 65 de la météo nationale, 95 p.
- Brunet M. (1975)** : Distribution gaussienne - logarithmique, cahier ORSTOM, série hydrol, vol. XII, N°2
- Brunet M. (1977)** : Test d'homogénéité, cahier ORSTOM, série hydrol, vol. XIV, N°2
- Castany G. (1963)** : Traité pratiques des eaux souterraines, Dunod Edit, Paris, 657 p
- Castany G. (1967)** : Principes de l'établissement des bilans d'eau. Bull. B.R.G.M. 3, ParisXV.
- Castany G. (1968)** : Prospection d'exploitation des eaux souterraines, Dunod Edit, 717 p.
- Castany G. (1982)** : Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod Edit., 237 p.
- Chaumont M., Paquin C., (1971)** : Carte pluviométrique de l'Algérie au 1/ 500.000. Moyennes 1913-1963. Pub. Soc. Hist. Nat. d'Afrique du Nord. pp 24. 1 carte.
- Choiskel E. (1988)** : Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des données météorologiques. La météorologie 7 e série, N° 23, Juin- Août 1988. p 19-30.
- Choubert G et Faune Muret A. (1960-1962)** : Evolution du domaine atlasique depuis les temps Paléozoïques. Mém. Soc. Géol. France, livre-mém. de Fallot, T1.
- Cornet A. (1952)** : Carte géologique détaillée au 1 / 200.000, feuille de Geryville (El-Bayadh). Publ. Serv. Carte géol. Algérie, feuille N° 66.
- Cornet A. (1952)** : L'Atlas Saharien Sud oranais. Publ.XIX congr. géol.Intern., Alger, monog.reg., lière série, N° 12.

- 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.
- De Hoop D., Sesören A et Voûte . C (1988) :** The use of SPOT images for water resources surveys : the examples of the Kasserine area (Tunisia) and the Jebel Amour (Algeria), Nouvelles de SPOT/SPOT News - letter, July N°. 10, 15 - 16.
- Demmak (1980) :** Contribution à l'étude des écoulements solides des cours d'eau d'Algérie. 1ère partie: mise en forme des données de base. Bilan de sept années de mesures. Alger. Minis. de l'hydraul. Service hydrologie.
- Douihassi M (1976) :** Etude géologique d'Ain Ouarka, Boussemghoun (partie central des monts des Ksour), tome I (Stratigraphie). Thèse 3 ième cycle, IST (Oran).
- Dubief J. (1953) :** Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Direction du Service de la Colonisation et de l'Hydraulique, Sc des études scientifiques, Clairbois, Birmandreis (Alger), 457 p.
- Dubief J.(1960) :** Le climat du Sahara, tome I , Univ. d'Alger. Inst. Rech. Sahar., publ. CNRS - paris
- Dubief J.(1960) :** Le climat du Sahara, tome II - fasc. I, univ. d'Alger. inst. Rech. Sahar., publ. CNRS - paris, 275p, 200 fig, 106 cartes, 24 photos.
- Dubreuil P. (1974) :** Initiation à l'analyse hydrologique. Edit. Masson et Cie, 216 p.
- Durand Delga M. (1968) :**La Méditerranée occidentale. Etapes de sa genèse et problèmes structuraux liés à celle - ci. Soc. géol. France. Mém. H.S. N° 10, p 203-224.
- ESRI (Environmental System Research Institute) (2010) :** help software ArcGIS10
- ETHLA (1979) :** Rapport de fin de sondage AF III., wilaya de Laghouat , inédit- F.A.O (1975) : Les besoins en eaux des cultures. Bull. irrigation et drainage N° 24. Rome. 198p.
- Fabre J. (1976) :** Introduction à la géologie du Sahara algérien, 363 p, 172 fig; S.N.E.D, Alger.
- F.A.O (1976) :** La qualité de l'eau en agriculture. Bull. irrigation et drainage N° 29. Rome. 81p.
- Fares F. (1974) :** Etude micropaléotologique du Djebel Azereg. Notice interne , I.A.P, ref 321 (non publiée).
- Flamand G. B.M (1911) :** Recherches géologiques et géographiques sur le haut pays de l'Oranie et sur le Sahara, Thèse d'état, Lyon, 1002 p, 157 fig, 3 cartes géol, 16 pl.
- Flandrin J. (1948) :** Contribution à l'étude du Nummulitique algérien. Bull.Serv. de la carte géol de l'Algérie. Alger, 334 p-81 pl.
- Flandrin J. (1952) :** Les chaînes Atlasiques et la bordure Nord du Sahara.

- Foucart T. et Bensaber A. (1987)** : Méthodes pratiques de la statistiques. Edit Masson, Paris, 188 p.
- Forkasiewicz J. et Paloc H. (1967)** : Régime de tarissement de la foux de la Vis. Chron. hydrogéol. B.R.G.M, N° 10.
- Joly F., Simonin A. et Guillemot J. (1986)** : Interprétation géomorphologique de l'image Spot du 23 Février 1986 concernant le Djbel Amour (Algérie) et sa bordure saharienne, photo - Interprétation, N° 6, 1985.2 [1986], 9-24.
- Gignoux M. (1946)** : remarques sur la répartition des faciès du Trias en Algerie. C.R.Somm. 1Bull. Soc. géol. France (5) XVI, N° 1 - 2, page 20 - 22.
- Gousskov M (1949)** : Etude hydrogéologique dans le pays des Dayas (Annexes de Laghouat et de Djelfa), rapport inedit.
- Guilcher A. (1965)** : Précis d'hydrologie marine et continentale, édit. Masson et Cie, Paris.
- Guillemot J. et Yapaudjian L (1991)**: Notice explicative de la carte géologique de Laghouat au 1/200.000, serv. géol. de l'Algerie (Sous presse).
- Hannachi A. (1981)** : Relation entre aquifères profonds et superficiels. hydrogéologie de la vallée de l'Oued M'Zi, à l'Est de Laghouat, thèse 3 ième cycle, Grenoble, 227 p.
- Hydrologie (Service)** : Annuaire hydrologique. ANRH Alger, 100 p.
- IAP (1974)** : Contribution à l'étude géologique de la feuille de Laghouat au 1 / 200.000.
- Kamen M. et Isri R (1989)** : Etude hydrogéologique de la région du Djebel Milok (Wilaya de Laghouat) et du forage Hamda. Mém. d'ing., IST (Oran), 128 p.
- Kazi Tani N. (1986)** : Evolution géodynamique de la bordure africaine : Le domaine intra-plaque Nord algérien. Approche méga séquentielle. Thèse doct. Es. Sc, Univ. de Pau, 871p.
- Keicken (1962)** : Esquisse tectonique de l'Algerie. bull. Serv. Carte géol, Algerie, Série N° 3.
- Kheddoum O. (1998)** : Contribution à l'étude hydrogéologique du synclinal d'El - Abiodh Sidi Cheikh (Atlas Saharien occidental : partie méridio - orientale), mém. d'ing., IST (Oran), 154 p.
- Kruseman G.P et Deridder N.A (1974)** : Interprétation et discussion des pompages d'essai. International Institute for Land reclamation and improvment. Wageningen the Netherlands, Bult. 11 F, Traduit par Meilhac A .
- Macoïn P. (1971)** : Découvertes d'organismes d'âge Portlandien dans les séries connues du «Néocomien» de l'Atlas Saharien (Algérie). Publ. Serv. Géol de l'Algérie. Bull N° 41 (Nelle série), p 51 -58.
- Mahboubi M'hamed (1983)** : Etude géologique du Crétacé post Aptien et du Tertiaire Continental de la bordure méridionale du Djebel Amour (Atlas Saharien Central).Thèse 3^{ième} cycle, I.S.T, Univ. d'oran, 161 p.

- Mangin A.(1981)** : Apport des analyses corrélatoire et spectrale dans la reconnaissance des systèmes hydrologiques. C.R. Acad. Sc. Paris , t.293, série II, pp 401-404.
- Mangin A.(1982)** : Mise en évidence de l'originalité et de la diversité des aquifères karstiques. Ann. Scient., univ. Besançon, 3 ième colloque d'hydrologie en pays calcaire, France.
- Margat J. (1963)** : Notice explicative du diagramme d'analyse d'eau. BRGM DG 63 A B1, 38 p.
- Marsily G. (DE). (1981)** : Hydrogéologie quantitative. Edit. Masson. Paris, 215 p.
- Mattauer M. (1973)** : Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. Edit. Herman, Paris
- Michel Capderou** : Atlas solaire de l'Algérie (3 tomes). Edit Office des Publications universitaires, Alger, 1987.
- Miquel J. (1984)** : Guide pratique de l'estimation des probabilités de crues. Edit. Eyrolles, 1984
- Mudry J. et Blavoux B (1986)** : Utilisation de l'analyse en composante principale (sur variables centrées réduites) pour l'étude du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques du Sud Est de la France. Hydrogéol. N° 1, p 53 - 59.
- Nadji A. (1997)** : Etude sédimentologique, cartographique et néotectonique des formations post - Turoniennes de l'Atlas Saharien Central. Région d'Aflou (Laghouat). mém. de Magister, IST (Oran), 302p
- Ritter E. (1902)** : Le Djebel Amour et les monts des Ouled Nail. Bult. N° 43, publ. sc. géol. de l'Algerie.
- OMS (1972)** : Normes internationales pour l'eau de boisson. Genève.
- Péguy. Ch. P (1970)** : Précis de climatologie, édit. Masson et Cie.
- Regenier J. (1963)** : Formules d'évapotranspiration. Cahier O.R.S.T.O.M. ,Série pédologie N° 4.
- Remenieras G. (1980)** : L'hydrologie de l'ingénieur. Edit. Eyrolles.
- Richard J (1979)** : Evaluation des ressources d'un aquifère d'après l'analyse du bilan d'eau : Application au système de Tébessa (Algérie). Univ. de Languedoc, 156 p.
- Riou ch. et Dubois G.J (1967)** : Premières mesures d'évapotranspiration potentielles en république de Tchad. Cahier O.R.S.T.O.M. , série hydro, vol IV N° 2.
- Roche M.A. (1973)** : Hydrogéologie de la haute Saoura (Sahara Nord Occidentale). Publ. serv. géol. Alger, bull. N° 43, 91 p et edit. CNRS , Paris, publ. N°18.
- Roche M. (1963)** : Hydrologie de surface. O.R.S.T.M. Edit. Gautier Villars.
- Rodier J. (1980)** : Analyse de l'eau, 6ième édition. Dunod.
- Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E.(2004)** : An assessment of the SRTM Topographic Products, Jet Propulsion Laboratory, 143p, California, USA.

- Rolland G (1895) :** Hydrologie du Sahara Algérien. In documents relatifs à la mission dirigée au Sud
par M. A Choisy -425 p– Imp. Nat - Paris.
- Rousselle L. (1970) :** Sur une faunule de Rhynchonelle du Jurassique supérieur de la région de Laghouat (Sud Algérien). Bull. géol. de France (7) XII N°3, P573 - 578.
- Rossier Y (1988) :** Présentation d'un logiciel d'analyse des linéaments et de comparaison des diverses représentations linéamenteuses. 4 ième coll. hydrolog. pays calc. Ann. Sc. univ. Besançon, géologie, mém. H. série N°6, p 169-176.
- Plotnikov N.A (1962) :** Ressources en eaux souterraines. Classification et méthodes d'évaluation. Edit. Gautier Villars. Paris VI, 194 p.
- Seltzer P. (1946) :** Le climat de l'Algérie. Univ. d'Alger. Institut de météorologie et physique du globe de l'Algérie. Alger. p 219,53 fig., 83 cartes.
- Serra L. (1954) :** La représentation des facteurs climatologiques par les courbes d'égalité de probabilité. La météorologie 1. p 177- 183.
- S.N. Repal (1952) :** Régions Sud telliennes et Atlas Saharien. publ. XIX congr. géol. Intern. , Alger, monog.rég., 1ière série, N°20.
- Sesören A . et Voûte C. (1987) :** The use of SPOT images for water resources surveys, the example of the Jebel Amour (Algeria), XX th Congress of the International Association of Hydrogeologists IAH, Rome 1987 on hydrogeology for the Development.
- SRTM Données MNT, site internet :** <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/srtm3/Africa>
- Stamboul M. (1983) :** Contribution à l'étude hydrogéologique de la haute vallée du Sebga (Djebel Amour, Atlas Saharien Central, Algérie). Thèse de magister, IST (Oran).
- Stamboul M. et Rouquet L. (1984) :** Résultats préliminaires sur l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Sebga, Djebel Amour, Atlas Saharien central, Algérie. Caractérisation du bassin d'alimentation des sources de l'Oued Touil 4^{ème} séminaire des sciences de la terre, Alger 5/6/7 Juin 1984.
- Stamboul M., Mansour H., Isri R. et Kamen M. (1994) :** Mise en exploitation de forage hydraulique en domaine saharien (Atlas Saharien central: Djebel Milok) et le problème posé par la pénétration partielle, séminaire maghrébin de géologie appliquée, Annaba 21/22/23 Nov 1994.
- STROJEXPORT (1972) –** Etude et recherche d'eau dans les steppes de la région d'El Bayadh. . Rapport interne. 56 p, 12 fig, 2 tabl.
- Sutton G. (1949) :** Rain falt un Egypt. Statistics Stormo – run – off – Physical paper n° 53 Cairo 1947. Gouvernement press - Cairo 1949 – 129p.

- Tardy Y. (1986)** : Le cycle de l'eau, climats, paléoclimats et géochimie globale. Edit. Masson et Cie.
- Thornthwaite CW. (1948)** : An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, pp 55-94.
- Treuil M. (1970)** : Les diagrammes d'équilibre en hydrochimie. Bull. BRGM, 2ième édition, section III, N°4, 1970, pp 45-74.
- Turc L. (1961)** : Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Ann. agronomique, Vol. 12 N° 1. I.N.R.A.
- Verdeil P. (1961)** : Principes généraux de l'hydrologie des karsts. Mémoires de l'Association Internationale des Hydrogéologues. Rome. – Tome IV – pp 94 – 98.
- Verdeil P. (1969)** : Utilisation pratique de la méthode de Thornthwaite dans l'étude du bilan hydrique des bassins. Congrès National d'Hydrogéologie. –Journées H.SCHOELLER. – Bordeaux. 13 p, 6 Tableaux.
- Verdeil P. (1971)** : Limites d'utilisation des courbes de tarissement dans la détermination des caractéristiques morphologiques des karsts. Annales Scientifiques de l'Université de Besançon –3 ème série – Géologie pp 325 – 331, 1 Carte.
- Verdeil P. (1989)** : Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie. Séminaire des Sciences de la terre, Alger.
- Yousfi M.N et Ait Ahmed C. (1992)** : Contribution à l'étude hydrogéologique de la grande source et de la palmerais de Beni - Abbes (Sahara Nord occidental). Mém d'ing. IST (Oran). 440p.
- WHO (2008)**: Guidelines for drinking-water quality [Electronic version for the Web]