

THÈSE

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Science

Présenté par : Saliha MEBARKI

*Contribution à la reconnaissance des formations aquifères des
ksour du Nord de Béchar- étude hydrogéologique et inventaires
des ressources en eau souterraine (Sud- Ouest Algérien).*

Faculté : Architecture et de génie civil
Département : Hydraulique
Domaine : Technologie
Filière : Hydraulique

Devant le Jury Composé de :

<i>Membres de Jury</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Domiciliation</i>
<i>BENAMARA LAKHDAR</i>	<i>Pr</i>	<i>Président</i>	<i>USTMB Oran</i>
<i>KHARROUBI BENALI</i>	<i>Pr</i>	<i>Encadreur</i>	<i>USTMB Oran</i>
<i>MOUFFOK BENALI</i>	<i>Pr</i>	<i>Examineurs</i>	<i>Univ. Sidi Belabbes</i>
<i>MANSOUR HAMIDI</i>	<i>Pr</i>		<i>Univ. Oran 2</i>

Remerciements

Je présente mes sincères remerciements avec mes profonds respects à mon encadreur Pr. BENALI KHARROUBI pour la confiance et l'autonomie qu'il m'a accordée, son suivi, sa patience, ses conseils et son aide, tout au long de la réalisation de ce modeste travail. Profonde reconnaissance et très grand merci.

Je remercie, monsieur, BENAMARA Lakhdar professeur à USTO-MB d'avoir accepté de présider le Jury, je lui en suis très reconnaissante.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à messieurs les professeurs MANSOUR Hamidi et MOUFFOK Benali pour l'honneur qu'ils font à ce travail en acceptant de participer au jury.

J'adresse fortement mes vifs remerciements à mon mari KENDOUCI Mohammed Amine, maître de conférences A au département de génie civil et hydraulique de l'université de Béchar, pour ses corrections, l'aide et les conseils précieux qu'il m'a apporté pendant l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi au personnel de l'administration de la D.R.E, l'O.N.M et l'A.N.R.H de Béchar.

Enfin, que tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la bonne marche de ce travail et la réalisation de ce travail trouvent ici l'expression de ma reconnaissance et de mes remerciements les plus profonds.

À mes parents

*Mon mari, ma fille Fatima Zahra et mon fils Abdeljalil
Mes frères*

Sommaire

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction générale..... 01

Chapitre I: Revus bibliographique sur les eaux souterraines

1. Introduction.....	04
2. Notion sur les eaux souterraines.....	05
2.1. Aquifère.....	05
2.2. Aquitard.....	05
2.3. Aquiclude.....	05
2.4. Nappe.....	05
2.4.1. Nappe libre.....	06
2.4.2. Nappe captive.....	06
2.4.3. Nappe semi captive.....	07
3. Quelques très grands systèmes aquifères du monde.....	08
4. Les eaux souterraines en l'Algérie.....	08
4.1. Les eaux souterraines en Algérie du Nord.....	08
4.2. Les eaux souterraines en Algérie du Sud.....	10
5. Les caractéristiques hydrodynamiques.....	12
5.1. La loi de DARCY.....	11
5.2. Paramètres hydrodynamiques de la nappe.....	12
5.3. La circulation de l'eau dans le sous-sol : La piézométrie.....	13
6. L'hydrochimie des eaux souterraines.....	14
6.1. Paramètres de qualité des eaux souterraines.....	14
6.1.1. Les paramètres physiques.....	15
6.1.1.1. Température.....	14
6.1.1.2. pH.....	15
6.1.1.3. La conductivité électrique.....	16
6.1.1.4. Teneur totale en sels dissous TDS.....	16

6.1.2. Les paramètres chimiques.....	17
6.1.2. Qualité des eaux.....	18
6.1.2.1. Teneur maximales admissible pour l'A.E.P.....	19
6.1.2.2. Qualité des eaux destinées aux activités agricoles.....	20
6.2. Faciès hydrochimiques.....	21
6.3. Notion sur la vulnérabilité.....	21
6.3.1. Type de vulnérabilité.....	22
6.3.1.1. La vulnérabilité intrinsèque.....	22
6.3.1.2. La vulnérabilité spécifique.....	22
6.3.2. Critères conditionnant la vulnérabilité intrinsèque.....	22
6.3.2.1. Critères liés au sol.....	23
6.3.2.2. Critères liés à la zone non saturée (ZNS).....	23
6.3.2.3. Critères liés à la zone saturée.....	24
6.3.3. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.....	25
6.3.3.1. Présentation de la méthode DRASTIC.....	25
6.3.3.2. Présentation de la méthode GOD.....	28
6.3.3.3. La méthode SINTACS	30
6.3.3.4. Méthode SI (Susceptibility Index).....	31
7. Conclusion.....	33

Chapitre II : Présentation générale de la région d'étude

1. Introduction	35
2. Cadre géographique.....	35
3. Population et activités socioéconomiques	36
4. Caractéristiques écologiques de ksour.....	37
5. Caractéristiques physiques de sous bassin versant des Ksour du Nord.....	37
5.1. Caractéristiques géométriques du bassin versant.....	38
5.1.1. Caractéristiques de forme.....	38
5.1.1.1. Indice de compacité de Gravelius (Kc).....	38
5.1.1.2. Rectangle équivalent.....	39
5.2. Caractéristiques du relief.....	40
5.2.1. Courbe hypsométrique.....	41
5.2.2. Altitudes caractéristiques.....	42
5.2.2.1. Altitudes maximale (Hmax) et minimale (Hmin).....	42

5.2.2.2. Altitude moyenne (Hmoy).....	42
5.2.2.3. Altitude médiane (H50%).....	42
5.2.3. Indices de pentes.....	43
5.2.3.1. Indice de pente globale (Ig).....	43
5.2.3.2. La pente moyenne du cours d'eau principal (Pmoy).....	43
5.2.4. Temps de concentration (TC).....	44
5.2.6. Réseau hydrographique.....	45
6. Cadre hydroclimatologique.....	45
6.1. Pluviométrie.....	46
6.1.1. Précipitations mensuelles et saisonnières.....	46
6.2. Température.....	47
6.3. Relation Température-Précipitation.....	48
6.3.1. Diagramme pluviaux - thermique de Gaussen et Bagnouls.....	48
6.3.2. Indices climatiques.....	49
6.3.2.1. Indice climatique de De Martonne.....	49
6.3.2.2. Climagramme de L. Emberger.....	50
6.4. Humidité relative.....	51
6.5. Evapotranspiration.....	52
6.5.1. Evapotranspiration potentielle (ETP).....	53
6.5.1.1. Formule de Turc.....	53
6.5.2. L'évapotranspiration réelle (ETR) ou le déficit d'écoulement (De).....	54
6.5.2.1. Formule de Turc.....	55
6.5.2.2. Formule de Coutagne	55
6.5.2.3. Abaque de Verdeil.....	56
6.6. Calcul du bilan hydrologique.....	57
6.6.1. Calcul de ruissellement théorique de surface.....	57
7. Conclusion.....	58

Chapitre III : La géologie de la zone d'étude

1. Introduction.....	59
2. Aperçu géologique régional.....	59
2.1. La lithostratigraphie régional.....	59
2.1.1. Le Précambrien.....	60
2.1.2. Le Paléozoïque.....	60

2.1.2.1. Le Cambro-Ordovicien (1200m à 4000m).....	60
2.1.2.2. Le Silurien (200m à 400m).....	60
2.1.2.3. Le Dévonien (700m à 2500m).....	60
2.1.2.4. Le Carbonifère.....	61
2.1.3. Le Mésozoïque.....	62
2.1.3.1. Le Trias (4m à 64m).....	62
2.1.3.2. Le Jurassique (70m à 300m).....	62
2.1.3.3. Le Crétacé.....	62
2.1.4. Le Tertiaire (25m à 52m).....	62
2.1.5. Le Quaternaire	62
2.2. Cadre structural régional.....	63
3. Etude géologique locale.....	64
3.1. La lithostratigraphie de la région de l’Ahmar et Boukaïs.....	64
3.1.1. Paléozoïque.....	65
3.1.2. Mésozoïque.....	65
3.1.3. Tertiaire.....	66
3.2. Phases tectoniques de la région de l’Ahmar et Boukaïs.....	66
3.2.1. Période panafricaine.....	67
3.2.2. Période hercynienne.....	67
3.2.3. Phase alpine.....	67
3.3. Lithostratigraphie de Mougheul.....	68
3.3.1. Substratum paléozoïque.....	68
3.3.2. Couverture Triaso-Jurassique.....	68
3.3.2.1. Formation d’Aïn Ben Serhane (4m).....	68
1/ Membre inférieur (3m).....	68
2/ Membre supérieur (1m).....	69
3.3.2.2. Formation de Koudiat El Haïdoura (64m).....	69
1/ Membre inférieur (29m).....	69
2/ Membre supérieur (35m).....	69
3.3.2.3. Formation de l’Oued Mennat (5m).....	70
3.3.2.4. Formation de l’Oued ElAbiod (120m).....	70
3.3.2.5. Formation de Hassi Laâma(34m).....	70
3.3.2.6. Le Quaternaire.....	71

3.4. Tectonique de la région de Mougheul.....	74
4. Conclusion.....	74

Chapitre IV : L'hydrogéologie de la zone d'étude

1. Introduction.....	76
2. Hydrogéologie régionale.....	76
2.1. Aquifère des calcaires du Carbonifère	76
2.2. Aquifère des grès du Carbonifère	76
2.3. Aquifère des calcaires du Turonien.....	77
2.4. Aquifère des calcaires lacustres de l'Eocène supérieur.....	77
2.5. Aquifère des formations du Quaternaire.....	78
3. Les nappes aquifères de la région de Mougheul.....	79
4. Les nappes aquifères de la région de Boukaïs.....	80
5. La piézométrie.....	81
5.1. La piézométrie durant l'année 2001	82
5.2. La piézométrie durant l'année 2009.....	83
6. Calcul des paramètres hydrodynamiques	86
6.1. Etude de la descente.....	86
6.1.1. Essai de pompage au niveau du forage de Menabha(M).....	86
6.1.2. Essai de pompage au niveau du forage F2.....	88
6.1.3. Essai de pompage au niveau du forage F3.....	89
6.1.4. Essai de pompage au niveau du forage F5.....	91
6.1.5. Essai de pompage au niveau du forage F10.....	92
6.1.6. Essai de pompage au niveau du forage F11.....	93
6.2. Etude de la remontée.....	94
6.2.1. La remontée dans le forage M (Menabha).....	94
6.2.2. La remontée dans le forage F2.....	95
6.2.3. La remontée dans le forage F3.....	96
6.2.4. La remontée dans le forage F5.....	96
6.2.5. La remontée dans le forage F4.....	97
6.3. Essais de puits par paliers de débits de courtes durées.....	99
7. Calcul Le rayon fictif (Rf) du forage (F3).....	101
8. Conclusion.....	103

Chapitre V : L'hydrochimie de la région d'étude

1. Introduction.....	104
2. Échantillonnage et méthodes d'analyse.....	104
3. Résultats et discussion	106
3.1. Faciès chimiques des eaux souterraines.....	106
3.2. Qualité de l'eau d'irrigation.....	107
3.2.1. Classification en fonction du Sodium absorbé par le sol « SAR ».....	107
3.2.2. Le pourcentage de sodium échangeable (ESP).....	108
3.3. Paramètres physiques.....	100
3.3.2. Potentiel d'hydrogène (pH).....	109
3.3.3. Conductivité électrique (CE).....	111
3.3.4. Teneur totale en sel dissous (TDS).....	112
3.3.5. Les éléments majeurs.....	113
3.3.5.1. Calcium (Ca ²⁺).....	113
3.3.5.2. Magnesium (Mg ²⁺).....	114
3.3.5.3. Potassium (K ⁺).....	116
3.3.5.4. Sodium (Na ⁺).....	117
3.3.5.5. Chlorure (Cl ⁻).....	118
3.3.5.6. Bicarbonate HCO ₃ ⁻	119
3.3.5.7. Sulfates SO ₄ ⁻²	120
3.3.5.8. Nitrates NO ₃ ⁻	122
4. L'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque dans l'aquifère jurassique inférieur de Mougheul.....	123
4.1. Détermination des critères de la méthode GOD	124
4.1.1. Critère (G) de type de nappe	124
4.1.2. Critère (O) Impact de la ZNS (Overall aquifer class)	124
4.1.3. Critère (D) Profondeur à la nappe (Depth to groundwater table)	125
4.2. Les résultats de l'application la méthode GOD	125
5. Conclusion.....	126
Conclusion générale.....	127
Références bibliographiques.....	130
Annexe.....	143

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Chapitre I :

Figure. I.1:	Figure I.1: Les deux grandes nappes du Sahara (Castany.1982).....	10
Figure .I.2:	Schéma illustrant le dispositif expérimental (Kendouci et al., 2016).....	11

Chapitre II :

Figure II.1 :	Situation géographique de la région d'étude.....	36
Figure II.2:	Présentation de sous bassin versant de Ksour.....	38
Figure II.3:	Rectangle équivalent de sous bassin versant du ksour du Nord.....	40
Figure II.4:	La courbe hypsométrique du sous bassin versant du Ksour.....	41
Figure II.5:	Structure du réseau hydrographique et l'ordre des cours d'eau du sous bassin versant de la région d'étude.....	45
Figure II.6:	Précipitations moyennes mensuelles interannuelles (2009/2019) en mm à la station du sous Mougheul	47
Figure II. 7:	Courbe des températures minimales, maximales et moyennes interannuelles du bassin de ksour (Station de Mougheul, (2009-2019).....	48
Figure II. 8 :	Diagramme pluviaux - thermique de Gaussen et Bagnouls du sous bassin versant de Mougheul (2009-2019).....	49
Figure II. 9:	Abaque de De Martonne.....	50
Figure II.10:	Climagramme de L. Emberger.....	51
Figure II.11:	Courbe des humidités relatives moyennes mensuelles interannuelles en % du sous bassin du Ksour du Nord série (2009-2019).....	52
Figure II.12:	Abaque de Verdeil (calcul de l'ETR).....	56

Chapitre III :

Figure III.1 :	Carte géologique provisoire de la région Béchar (Deleau, 1951).....	63
Figure III.2:	Présentation générale de la zone d'étude l'Ahmar et Boukaïs	66
Figure III.3:	Carte géologique de la région de Mougheul (Mekkaoui, 2000).....	72
Figure III.4:	Coupe sans échelle lithologique de la région de Mougheul (Mekkaoui, 2000).....	73
Figure III.5:	Coupe schématique de la région de Mougheul(Mekkaoui, 2000).....	74

Chapitre IV :

Figure IV.1 :	Différentes unités aquifères dans la région de Béchar	79
Figure IV.2 :	Système aquifère dans la région de Mougheul (Mebarki, 2013).....	80
Figure IV.3 :	Système aquifère dans la région de Boukaïs (A.N.R.H, 2008).....	81

Figure IV.4 :	Carte piézométrique de la nappe jurassique inférieure de Mougheul octobre 2001.....	83
Figure IV.5 :	Carte piézométrique de la nappe jurassique inférieure de Mougheul décembre 2009.....	84
Figure IV.6 :	Carte piézométrique de la nappe jurassique inférieure de Mougheul (décembre 2016).....	86
Figure IV.7 :	Courbe de la descente (pompage d'essai longue durée) du forage Menabha M.....	87
Figure IV.8 :	Courbe de la descente (pompage d'essai longue durée) du forage F2.....	89
Figure IV.9 :	Courbe de la descente (pompage d'essai longue durée) du forage F3.....	90
Figure IV.10 :	Courbe de la descente (pompage d'essai longue durée) du forage F5.....	91
Figure IV.11 :	Courbe de la descente (pompage d'essai longue durée) du forage F10.....	92
Figure IV.12 :	Courbe de la descente (pompage d'essai longue durée) du forage F11.....	93
Figure IV.13 :	Courbe de la remontée dans le forage Menabha M.....	94
Figure IV.14 :	Courbe de la remontée dans le forage F2.....	95
Figure IV.15 :	Courbe de la remontée dans le forage F3.....	96
Figure IV.16 :	Courbe de la remontée dans le forage F5.....	97
Figure IV.17 :	Courbe de la remontée dans le forage F4.....	98
Figure IV.18 :	Carte d'égale transmissivité de la nappe de Mougheul.....	99
Figure IV.19 :	Courbe caractéristique (Débits/Rabattements) du forage F4.....	100
Figure IV.20 :	Courbe caractéristique (Débits/Rabattements) du forage F5.....	101
Figure IV.21 :	Zone d'influence du forage F3.....	102
Chapitre V :		
Figure V.1 :	Carte de localisation de la zone de Mougheul montrant les sites d'échantillonnage.....	105
Figure V.2 :	Diagramme d'analyse Schöeller-Berkaloff campagne 2009 et 2019.....	106
Figure V.3 :	Diagramme triangulaire de Piper campagne 2009 et 2019.....	107
Figure V.4 :	Illustration de l'ESP d'échantillons d'eaux souterraines de la région de Mougheul.....	109
Figure V.5 :	Le taux de variation du pH entre 2014 et 2019.....	110
Figure V.6 :	Le taux de variation de conductivité entre 2014 et 2019.....	111
Figure V.7 :	Le taux de variation du TDS entre 2014 et 2019.....	113
Figure V.8 :	Le taux de variation du Ca ²⁺ entre 2014 et 2019.....	114

Figure V.9:	Le taux de variation de Mg^{+2} entre 2014 et 2019.....	115
Figure V.10 :	Le taux de variation de K^{+} entre 2014 et 2019.....	116
Figure V.11 :	Le taux de variation du Na^{+} entre 2014 et 2019.....	117
Figure V.12 :	Le taux de variation du Cl^{-} entre 2014 et 2019.....	119
Figure V.13 :	Le taux de variation du HCO_3^{-} entre 2014 et 2019.....	120
Figure V.14 :	Le taux de variation du SO_4^{2-} entre 2014 et 2019.....	122
Figure V.15 :	Le taux de variation du NO_3^{-} entre 2014 et 2019.....	123
Figure V.16 :	Carte de vulnérabilité « GOD » de la nappe jurassique inférieure de Mougheul.....	126

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1 :	Quelques très grands systèmes aquifères du monde (J. Margat, 1990).....	07
Tableau I.2 :	Potentialités des eaux souterraines de l'Algérie du Nord (ONS, 2015).....	09
Tableau I.3 :	Estimation des ressources en eau souterraine de l'Algérie du Nord (ANRH, 2009)	09
Tableau I.4 :	quelques indications sur la relation existant entre la minéralisation et la conductivité (Rodier,2009).....	16
Tableau I.5 :	Critères de vulnérabilités couramment pris en compte (BRGM, 2002).....	23
Tableau I.6 :	Poids attribués aux paramètres DRASTIC (Aller et al., 1987).....	27
Tableau I.7 :	Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (Engel et al., 1996).....	27
Tableau I.8 :	Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (Barres et al., 1994).....	28
Tableau I.9 :	Classification selon le degré de vulnérabilité (GOD).....	29
Tableau I.10 :	Les paramètres méthode SI.....	32
Tableau I.11 :	Degré de vulnérabilité de la méthode SI (Ribiro, 2000).....	33

Chapitre II :

Tableau II. 1:	Caractéristiques de forme du sous bassin versant de ksour du Nord.....	39
Tableau II. 2 :	Répartition hypsométrique de sous bassin versant de Ksour.....	41
Tableau II. 3 :	Altitudes caractéristiques du sous bassin versant de ksour.....	43
Tableau II. 4 :	Classification du relief selon Ig (O.R.S.T.O.M).....	43
Tableau II. 5 :	Indices de pentes et la classification de relief pour le sous bassin versant de Ksour.....	44
Tableau II. 6 :	Caractéristiques de station climatique du bassin versant.....	46
Tableau II. 7 :	Précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station du sous bassin versant du Ksour.....	46
Tableau II. 8 :	Températures minimales, maximales et moyennes mensuelles interannuelles de la station de Mougheul	47
Tableau II. 9 :	Les humidités relatives moyennes mensuelles interannuelles en % du sous bassin du Ksour du Nord série (2009-2019).....	52
Tableau II. 10 :	Evapotranspiration potentiel moyennes mensuelles interannuelles selon Turc du sous bassin versant du Ksour du Nord, série (2009-2019).....	54
Tableau II. 11 :	Valeurs de l'ETR selon Turc (2009-2019).....	55
Tableau II. 12 :	Valeurs de l'ETR mensuelle selon Coutagne.....	56
Tableau II. 13 :	Résultats des paramètres du bilan hydrologique série (2009-2019).....	58

Chapitre IV :

Tableau IV.1	Mesures de la piézométrie année 2001 des forages captant le Jurassique Inférieur.....	82
Tableau IV.2 :	Mesures de la piézométrie année 2009 des forages captant le Jurassique Inférieur.....	84
Tableau IV.3 :	Mesures de la piézométrie année 2016 des forages captant le Jurassique inférieur campagne Décembre 2016 (Aloui et al., 2018).....	85
Tableau IV.4 :	Les résultats de calcul des caractéristiques hydrodynamiques (T.K.S) de l'aquifère de la plaine de Mougheul.....	98
Tableau IV.5 :	Essais du pompage de courte durée du forage F4.....	100
Tableau IV.6 :	Essais du pompage de courte durée du forage F5.....	101

Chapitre V :

Tableau V.1 :	Caractérisation des points d'eau.....	105
Tableau V.2 :	Classes de danger d'alcalinité des eaux souterraines de la nappe de Mougheul.....	108
Tableau V.3 :	Valeurs pH des points d'eau de la nappe de Mougheul (2009-2019).....	110
Tableau V.4 :	Valeurs CE ($\mu\text{S} / \text{cm}$) des points d'eau de la nappe de Mougheul (2009-2019).....	111
Tableau V.5 :	Valeurs TDS (mg / l) des points d'eau du Mougheul (2009-2019).....	115
Tableau V.6 :	Valeurs calcium (mg / l) des points d'eau de la nappe de Mougheul (2009-2019).....	114
Tableau V.7 :	Valeurs de magnésium (mg / l) des points d'eau de Mougheul (2009-2019).....	115
Tableau V.8 :	Valeurs de potassium (mg/l) des points d'eau de la nappe de Mougheul (2009-2019).....	116
Tableau V.9 :	Valeurs de sodium (mg / l) des points d'eau dans la nappe de Mougheul (2009-2019).....	117
Tableau V.10 :	Valeurs de chlorure (mg / l) des points d'eau dans la nappe de Mougheul (2009-2019).....	119
Tableau V.11 :	Valeurs de bicarbonate (mg / l) des points d'eau dans la nappe de Mougheul (2009-2019).....	120
Tableau V.12 :	Valeurs de sulfate (mg / l) des points d'eau dans la nappe de Mougheul (2009-2019).....	122
Tableau V.13 :	Valeurs de nitrate (mg / l) des points d'eau dans la nappe de Mougheul (2009-2019).....	123
Tableau V.14 :	Cotes attribuées au critère "Type de nappe".....	125
Tableau V.15 :	Cotes attribuées au critère "Impact de la ZNS".....	125
Tableau V.16 :	Cotes attribuées au critère " Profondeur à la nappe ".....	126

Résumé

Contribution à la reconnaissance des formations aquifères des ksour du Nord de Béchar- étude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau souterraine (Sud- Ouest Algérien)

Résumé :

Dans les zones arides, la pression sur les ressources en eau et en particulier sur les ressources en eaux souterraines est en augmentation en raison de la demande croissante et la détérioration de la qualité de l'eau. Les ressources en eau souterraine de la région des Ksour du Nord de Béchar s'organisent dans un système complexe dont les eaux de la nappe du jurassique inférieur (champs captant de Mougheul) et la nappe turonienne de Boukaïs et l'Ahmar assurent un rôle vital.

La zone d'étude est caractérisée par un climat aride, le bilan hydrologique du pas interannuel (10 ans) montre qu'une grande quantité d'eau se perd par évapotranspiration; ce bilan est déficitaire et pose le problème de l'alimentation de l'aquifère existante dans la région d'étude. Les nappes dans la région d'étude sont des nappes semi captives. Le calcul de la transmissivité à partir des essais de pompage dans le champ captant de Mougheul a donné des valeurs faibles ; les rabattements sont considérables dans presque tous les forages.

L'évolution des paramètres physico-chimiques montrent que tous les valeurs ne dépassent pas les normes de potabilité de l'OMS, cependant des concentrations élevées de nitrate ont été observées au niveau du puits APC 1 dépassant les normes de l'OMS (50 mg/l). Les eaux souterraines ont des faciès chimiques bicarbonaté-calcique, bicarbonaté-magnésien, sulfaté-calcique et sulfaté- magnésien. La qualité de l'eau généralement est bonne pour l'irrigation mais le puits d'eau APC1 nécessite un suivi de l'évolution de la salinité.

Mots clés : Béchar, Mougheul, hydrogéologie, eau souterraine, évaluation, évolution physicochimique.

Abstract:

In arid areas, the pressure on water resources and in particular on groundwater resources is on the rise, mainly due to increasing demand and the deterioration of water quality.

The groundwater resources of the Ksour region of the North of Bechar are organized in a complex system, including the waters of the lower Jurassic water table (Mougheul catchment fields) and the Turonian water table of Boukaïs and Ahmar which provide a vital role.

The study area is characterized by an arid climate, the hydrological balance of the interannual step (10 years) shows that a large amount of water is lost by evapotranspiration, this balance is in deficit and poses the problem of food existing aquifer in the study region. The aquifers in the study region are semi-captive aquifers. The calculation of the transmissivity from the pumping tests in the Mougheul catchment field gave low values; drawdowns are considerable in almost all boreholes.

The evolution of the physicochemical parameters show that all the values do not exceed the WHO drinkability standards, except the high nitrate concentrations were observed at the level of the APC1 well which exceeds the WHO standards (50 mg/l). Groundwater has bicarbonate-calcium, bicarbonate-magnesian, sulphate-calcium and sulphate-magnesian chemical facies. The water quality is generally excellent for irrigation, but the APC1 water well requires monitoring of changes in salinity.

Keywords: Bechar, Mougheul, hydrogeology, evolution, evaluation, physicochemical parameters.

الملخص:

في المناطق الجافة، يتزايد الضغط على موارد المياه ولا سيما على موارد المياه الجوفية ، ويرجع ذلك أساسًا إلى زيادة الطلب وتدهور جودة المياه. موارد المياه الجوفية في منطقة قصور شمال بشار في نظام معقد ، بما في ذلك المياه الجوراسية السفلية (حقل التجميع لموغل) والمياه التورونية في بوكايس ولحمر والتي توفر دورًا حيويًا. تتميز منطقة الدراسة بمناخ جاف ، فالميزان الهيدرولوجي (عشر سنوات) يظهر أن كمية كبيرة

من المياه تضيع بفعل التبخر ، وهذا الميزان هو في حالة عجز وي طرح مشكلة تغذية طبقة المياه الجوفية الموجود في منطقة الدراسة. طبقات المياه الجوفية في منطقة الدراسة هي طبقات شبه أسيرة. أعطى حساب النفاذية من اختبارات الضخ في مستجمعات المياه بموغل قيمًا منخفضة. انخفاض المياه الجوفية معتبر في جميع الآبار تقريبًا.

يُظهر تطور المعلمات الفيزيائية والكيميائية أن جميع القيم لا تتجاوز معايير منظمة الصحة العالمية للمياه الصالحة للشرب،

Résumé

باستثناء تركيزات النترات العالية التي لوحظت على مستوى البئر APC1 والتي تتجاوز معايير منظمة الصحة العالمية (50مجم/لتر). تحتوي المياه الجوفية على أوجه كيميائية من البيكربونات الكالسيوم والبيكربونات مغنيسيوم والكبريتات كالسيوم والكبريتات مغنيسيوم. جودة المياه جيدة بشكل عام للري، لكن البئر APC1 المياه تتطلب مراقبة التغيرات في الملوحة

الكلمات المفتاحية : بشار ، موغل ، هيدروجيولوجيا ، مياه جوفية ، تقييم ، تطور فيزيائي-كيميائي.

Introduction générale

1. Introduction

Dans de nombreuses régions du monde, les bassins versants, les rivières, les étangs, les aquifères et les écosystèmes associés ont subi des modifications importantes ainsi la vitalité, la qualité et la disponibilité des ressources en eau ont fait face à de nouvelles menaces humaines (**Singh et al., 2015a**).

Dans les scénarios actuels, de nombreux pays sont confrontés au problème de la pénurie d'eau, même la bonne qualité de l'eau potable n'est pas disponible pour la société humaine (**Gleick, 2000**). L'augmentation de la demande en eau a obligé les gens à dépendre des eaux souterraines, ce qui a entraîné une importante exploitation des réserves d'eau souterraine (**Singh et al., 2006 ; Thakur et al., 2013**). La bonne qualité des eaux souterraines est importante pour la planification et la gestion futures (**Rawat et al., 2018**).

Avec l'accroissement de la population mondiale, le développement économique de la planète (un enfant né dans un pays développé consomme 30 à 50 fois plus d'eau qu'un enfant né dans un pays sous développé), la consommation d'eau a presque doublé au cours de ces cinquante dernières années. En conséquence, les ressources en eau diminuent à un rythme rapide (**Kabour, 2017**).

Le problème majeur dans la région de Béchar, est le manque d'eau superficielle hormis le barrage de DjorfTorba qui se caractérise par de faibles apports météoriques et un fort pouvoir évaporant de l'atmosphère ; les réserves souterraines sont donc devenues la principale ressource en eau (**Mebarki, 2013**). La croissance de la population et le développement de l'activité agricole que connaît la région de Béchar se traduisent par un besoin énorme en eau. Actuellement, la demande en eau ne peut être satisfaite que par la mobilisation des ressources en eau souterraine à partir des forages de la région des Ksour du Nord (le champ captant de Mougheul). Cette action combinée à la sécheresse et la surexploitation a provoqué le tarissement des sources avec un rabattement remarquable de l'aquifère.

Le présent travail est une contribution à la reconnaissance des formations aquifères des ksour du Nord de Béchar comportant une étude hydrogéologique et un inventaire des ressources en eau souterraine (Sud- Ouest Algérien). De plus, nous avons remarqué la complexité des écoulements souterrains d'une part et souligné la diversité de la qualité chimique des eaux souterraines d'autre part.

Les eaux souterraines sont en effet moins connues que les eaux de surface. L'origine de ce constat est durable, non seulement les réseaux d'observation des eaux souterraines sont insuffisants ou inexistantes, mais leur exploitation est également plus difficile. Les nappes sont en effet des objets tridimensionnels dans lesquelles les phénomènes ne sont généralement pas homogènes et échappent à l'observation directe. De ce fait, il est indispensable d'effectuer des auscultations bien connues en hydraulique souterraines : essais de puits, essais de nappe, et piézométrie afin d'optimiser une exploitation rationnelle et d'éviter les effets néfastes dus à des surexploitations (**Mebarki, 2013**).

2. Problématique

Dans la région des Ksour du Nord, les besoins en eau deviennent de plus en plus contraignantes du point de vue qualitatif et quantitatif pour la ville et pour la palmeraie, notons que :

- Les besoins en eau pour les différents usagers (Alimentation en eau potable, irrigation des palmeraies) ne cessent d'augmenter ce qui nécessite la recherche de solutions adéquates pour les générations futures.
- La surexploitation des nappes (cas la nappe de Jurassique inférieur au niveau de Mougheul)
- L'assèchement des sources dans la région d'étude.

L'objectif de ce travail est une contribution pour améliorer la connaissance de la ressource en eau au niveau des ksour du Nord de Béchar par l'étude de l'hydrogéologie locale de la région et le développement d'une banque de données sur les ressources en eau souterraines, leurs utilisations et leurs comportements hydrodynamiques.

3. Objectifs scientifiques du travail

Les objectifs de cette étude sont :

- Comprendre le fonctionnement hydrogéologique du système aquifère local.
- Contribuer à édifier la grande pyramide scientifique de l'hydrogéologie du Sahara algérien.
- La caractérisation et l'évolution annuelle (entre 2009 et 2019) des paramètres physicochimiques des eaux souterraines de Ksour du Nord de Béchar.

- Et enfin gérer l'utilisation optimale des ressources en eau souterraines.

La présentation de ce travail est organisée en cinq chapitres :

Chapitre I. Revue bibliographique sur les eaux souterraines : Aperçu sur les systèmes d'aquifère dans le monde et dans l'Algérie, les caractérisations hydrogéologiques et hydrochimiques des eaux souterraines.

Chapitre II. Présentation générale de la région d'étude : présentation de site d'étude, ainsi que son cadre géographique, géomorphologique et hydroclimatologique.

Chapitre III. La géologie de la zone d'étude : Aperçu sur la lithostratigraphie et le plan structurale de la région d'étude.

Chapitre IV. L'hydrogéologie de la zone d'étude : La détermination des caractéristiques et des propriétés de l'aquifère de notre site d'étude.

Chapitre V. L'hydrochimie de la région d'étude : Dans ce contexte, le présent travail vise à suivre l'évolution annuelle, entre 2009 et 2019 des paramètres physico-chimiques, identifier les faciès chimiques des eaux, et à évaluer la qualité des eaux souterraines de la région de Ksour du Nord (cas de Mougheul).

Chapitre I

Revue bibliographique sur les eaux souterraines

1. Introduction

Les eaux souterraines sont la principale source d'eau douce de l'humanité. Elles représentent 30 % de l'eau douce de la planète. Le reste constitue les calottes polaires (69 %) ainsi que les fleuves et les lacs (1 %).

Les eaux souterraines offrent des ressources avantageuses pour de nombreux utilisateurs, prédominantes dans certains pays mais de nature variées; elles sont incorporées aux ressources des eaux de surface. Elles sont largement utilisées dans un grand nombre de pays, elles constituent souvent la principale source d'approvisionnement en eau potable. Elle contribue dans une proportion appréciable aux approvisionnements en eau industrielle dans les pays développés et constitue la ressource locale quasi exclusive pour l'irrigation et l'élevage en zones arides.

Dans plusieurs régions du monde la situation est loin d'être aussi idyllique. En milieu aride ou semi-aride les rivières sont souvent inexistantes ou rares et ne coulent que quelques semaines ou au mieux quelques mois dans l'année. Sur le plan local, il peut y avoir une inadéquation entre le développement démographique et plus généralement socio-économique, d'une part et la disponibilité de la ressource en eau de l'autre. La situation peut même devenir préoccupante si le raisonnement s'effectue en terme de réserve d'eau souterraine renouvelable (**Margat , 2008**).

Les prélèvements d'eau souterraine dans le monde ont été estimés à 1 000 km³ /an en 2010, dont 67 % pour l'irrigation, 22 % pour les besoins domestiques et 11 % pour l'industrie. Ces volumes représentent près de 10 % des ressources en eau souterraine renouvelables et 25 % des prélèvements en eau douce de la planète (**VAN DER GUN, 2012**).

La croissance élevée de la population a pour conséquence un besoin accru en eau pour la production agricole et le développement industriel, qui, à terme conduit à plus de pompage des eaux souterraines à l'échelle mondiale (**PNUE, 2003; FAO, 2003; BURKE et MOENCH, 2000**). Un pompage en hausse peut conduire à la baisse extrême des niveaux des nappes d'eau. Les impacts de la surexploitation des eaux souterraines sont nombreux et souvent irréversibles.

Lorsque l'on considère la qualité des eaux souterraines et leur dégradation, il faut faire la différence entre la contamination naturelle et celle anthropique. Dans la plupart des cas l'eau souterraine est naturellement potable et ne nécessite pas de traitement. Il ya quelques

exceptions à travers le monde où l'eau souterraine naturelle a des concentrations de divers matériaux solubles à des niveaux qui sont nocifs pour la santé humaine, animale ou végétale (AGW-Net, BGR, IWMI, Cap Net, RAOB, et IGRAC, 2015).

2. Notion sur les eaux souterraines

L'eau contenue dans le sol et le sous-sol a pour origine quasi exclusive les précipitations du grand cycle de l'eau. On peut y distinguer une eau « verte », qui est l'eau de pluie stockée temporairement en surface dans les premiers mètres du sol et qui est reprise par l'évaporation et (surtout) par la transpiration de la végétation (poste dominant dans le bilan hydrologique) et une eau « bleue », souterraine, qui s'infiltré plus profondément dans la terre, circule dans les pores, fissures et autres interstices et constitue les aquifères dont nous parlerons plus loin. Cette eau s'écoule vers les sources, les fleuves ou directement dans la mer et elle peut être captée par l'homme grâce à des puits ou à des forages. Pour compléter cet inventaire, l'eau « bleue » superficielle est celle qui s'écoule dans les rivières (Marsily et al., 2017).

2.1. Aquifère

Un aquifère est un corps (couche, massif) de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre :

- l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantité d'eau appréciable.

Un aquifère peut comporter une zone non saturée.

2.2. Aquitard

Un aquitard est une formation peu perméable (ou semi-perméable) dans laquelle l'eau souterraine circule à faible vitesse. Ces formations peuvent assurer la communication entre des aquifères superposés par le phénomène de drainance.

2.3. Aquiclude

Les aquicludes sont des formations imperméables ne produisant pas d'eau.

2.4. Nappe

Une nappe est l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère dont toutes les parties sont en liaison hydraulique. (Castany et Margat, 1977).

2.4.1. Nappe libre

La nappe à surface libre est comprise dans un aquifère qui comporte une zone non saturée de caractéristiques semblables à celles de la zone saturée et une zone de fluctuation. **(Castany et Margat, 1977)**.

La nappe libre se localise dans des formations poreuses aquifères en communication verticale avec l'atmosphère **(Gilli et al., 2008)**, les conséquences d'un tel dispositif sont :

- le remplissage immédiat des forages ou des puits en cours de réalisation dès qu'ils atteignent la surface de la nappe ou la première discontinuité aquifère (joint de stratification ou fracture);
- la facilité de la recharge de la nappe ;
- le maintien de conditions oxydantes propices à la persistance des espèces chimiques métalliques (fer, manganèse) sous forme de minéraux solides (oxydes, hydroxydes) ;
- la minéralisation des substances organiques humiques ou polluantes (aspects positifs) ;
- l'exposition de la ressource à la pollution inorganique de surface (aspect négatif).

2.4.2. Nappe captive

La nappe, ou partie d'une nappe, sans surface libre, donc soumise en tous points à une pression supérieure à la pression atmosphérique, et dont la surface piézométrique est supérieure au toit de l'aquifère, à couverture moins perméable qui la contient. S'oppose à nappe libre. **(Margat, 1972)**

Une nappe captive comprise dans un aquifère semi-captif peut être dénommée nappe semi-captive.

La recharge ne peut alors se faire que par transit latéral depuis les zones d'affleurement de l'aquifère (zone libre), ou vertical par le faible flux traversant des terrains peu perméables de couverture (drainance descendante). La conséquence est un milieu plus abrité de la pollution de surface mais aussi de l'oxygénation ce qui se traduit par des conditions anoxiques favorisant la conservation des molécules organiques et le passage en solution des cations métalliques indésirables (fer et manganèse) **(Gilli et al., 2008)**.

2.4.3. Nappe semi captive

Le toit ou le substratum (ou les deux) de la nappe sont souvent constitués par une formation géologique semi-perméable. Celle-ci permet, dans certaines conditions hydrodynamiques favorables (différence de charge) des échanges d'eau (ou de pression) avec la nappe superposée ou sous-jacente appelée drainante. Ce phénomène implique une nappe semi captive (**Castany, 1980**).

3. Quelques très grands systèmes aquifères du monde

Quant aux réservoirs aquifères, la diversité de leurs tailles, de leurs extensions en profondeur, de leur complexité, de leurs structures, des formes et des degrés de leurs connexions avec les cours d'eau est extrême. À côté de quelques très grands aquifères de taille continentale et le plus souvent transfrontières (tab. I.1), d'innombrables aquifères de faible ou moyenne étendue sont entièrement enchâssés dans des bassins fluviaux de quelques milliers ou dizaines de milliers de km². S'y ajoute une grande variété d'échanges physico-chimiques entre eau et sols ou roches, d'où résultent des qualités d'eau naturelles diversifiées y compris bien souvent au sein d'un même aquifère (**Margat, 1990**).

Tableau I. 1 : Quelques très grands systèmes aquifères du monde (**Margat, 1990**)

Pays	Dénomination	Etendue Km ²	Volume en réserve 10 ⁹ m ³	Flux moyen (alimentation 10 ⁶ m ³ /an)	Durée de renouvellement
Australie	Grand Bassin Artésien	1700000	20000	1100	~20000
Egypte, Libye, Soudan, Tchad	Grès de Nubie	2000000	75000	~1000	75000
Arabie Saoudite	Ensemble des aquifères du bassin sédimentaire (système multicouche)	~1000000	35000	~1060	~33000
Algérie, Tunisie	Continental Intercalaire et terminal du Sahara septentrional	780000	60000	850	70000

Niger, Mali, Nigéria,	Continental intercalaire	~500000	10000à15000	~800	10000à20000
USA	Ogallala Aquifère (High Plains)	450000	~15000	6à8000	~2000
USA	Central Vally (Californie)	80000	1130	~7000	~160
Brésil	Bassin sédim. De Maranhã (système multicouche)	700000	80000 (dont 3000 en nappe libres)	4000	20000
Chine	Plaine du Ho Pei(système multicouche)	136000	5000à10000	35000	150à300
URSS	Bassin artésien du Dniepr-Donetz (système multicouche)	>250000	175000	5000	35000
France	Sables verts du bassin de Paris	50000	425	20	21000

4. Les eaux souterraines en l'Algérie

En l'état actuel des connaissances, les eaux souterraines sont globalement évaluées à environ 8 milliards de m³/an (plus de 2 milliards régions du Nord et 6 milliards régions Sahariennes) (Tab. I.2) elles sont exploitées à plus de 90 % (PNE, 2010).

4.1. Les eaux souterraines en Algérie du Nord

La géomorphologie de l'Algérie du Nord est dominée par des reliefs à fortes pentes. Elle est associée à une lithologie essentiellement marneuse, qui donne des séries peu ou pas perméables mais aussi érodables. Ces caractéristiques font de l'Algérie du Nord une région assez défavorisée en matière d'eaux souterraines. Pratiquement, seules les grandes plaines alluviales plio-quaternaires en sont pourvues : Soummam, Mitidja, Djendjen, Sébaou, Annaba, Sidi Bel Abbès, Mostaganem, Mascara, Oran et les petites vallées qui entaillent l'Atlas Tellien. La puissance des horizons aquifères dépasse rarement les 30 mètres d'épaisseur. Par ailleurs, du fait de l'imperméabilité des sols la réalimentation naturelle des aquifères est très faible (Boudjadja et al., 2003).

En conséquence, les réserves en eaux souterraines sont en quantité limitée. De plus, nombre d'entre eux sont surexploitées au point que ceux qui se trouvent en bordure du littoral sont totalement dégradés par l'avancée des biseaux salés. Dans cette situation se trouvent les aquifères du bas Chlef et d'Oran à l'Ouest, du Sébaou, du Mazafran, du Nador, d'EI Hachem au centre, et de Djendjen, de la Soummam, du Zitoun et de Taher à l'Est (**Boudjadja, 2003**).

Le nombre total des aquifères de la partie Nord est de l'ordre de 170. Elles peuvent emmagasiner des ressources exploitables de l'ordre de 2 136.2Hm³ /an en année moyenne et de 717.6 Hm³ /an en année sèche (tab. I.3).

Tableau I.2: Potentialités des eaux souterraines de l'Algérie du Nord. (**ONS, 2015**)

Région Désignations	OranieChott Cherqui	Cheliff Zahrez	Algérois Soummam Hodna	Constantinois Seybouse Mellégué	Total Algérie du Nord
Ressources souterraines mobilisables (Mm ³ /an)	400	245	775	580	2000
Ressources souterraines mobilisées (Mm ³ /an)	375	230	745	550	1900

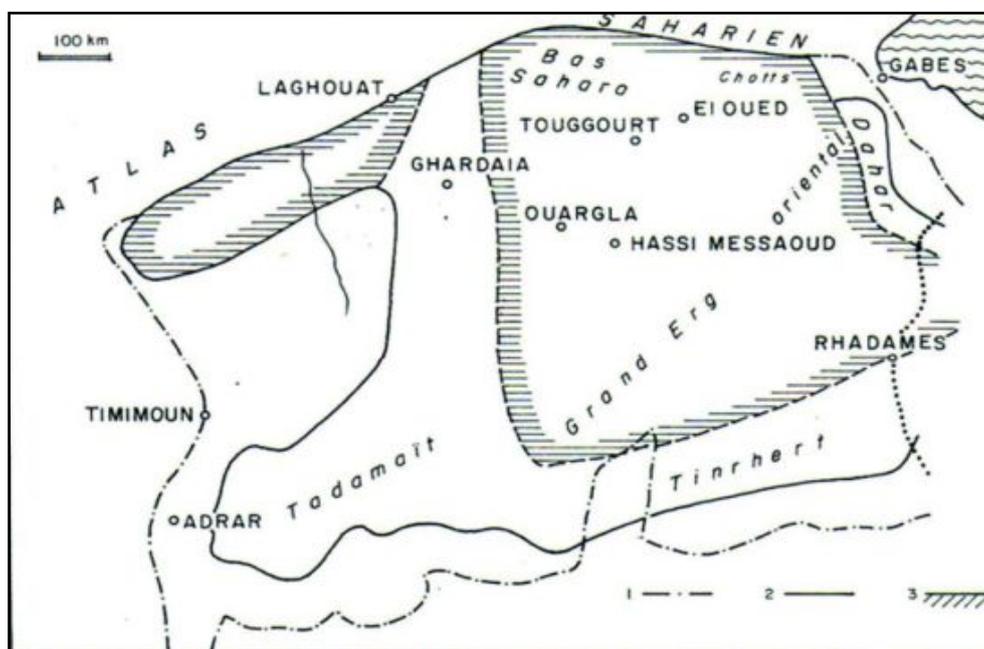
Tableau I.3: Estimation des ressources en eau souterraine de l'Algérie du Nord (**ANRH, 2009**)

Région	Année moyenne (Hm ³ /an)	Année sèche (Hm ³ /an)
Région Ouest	428.52	110.3
Région Centre	922.70	339.6
Région Est	785.00	267.8
Total	2 136.2	717.6

Le PNE 2010 a ajouté Sept aquifères, elles peuvent emmagasiner des ressources exploitables de l'ordre de 2 724 Hm³ /an en année moyenne et de 762 Hm³ /an en année sèche (**Bounab, 2017**).

4.2. Les eaux souterraines en Algérie du Sud

Le sud du pays se caractérise par la présence des nappes phréatiques, souvent saumâtres. Le système aquifère du Sahara septentrional désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes (Fig. I.1). La nappe du Continental Terminal, sise à 100 – 400 m de profondeur, couvre tout le Bas-Sahara et la nappe du Continental Intercalaire dite « albiense », sise à 1000-1500 m de profondeur est d'une étendue plus grande (Castany, 1982). Elle couvre une superficie de plus de 10 millions de km², répartie entre les trois pays (Algérie–Tunisie et la Libye). Elles constituent des réserves importantes (de 30000 à 40000 km³) dont les potentialités exploitables sont actuellement estimées à 5 jusqu'à 6 km³/an, soit l'équivalent de 12 000 fois la capacité de nos barrages actuels mais malheureusement ces eaux ne sont pas renouvelables (ONS, 2015). Le caractère «non renouvelable» de cette ressource et les contraintes physiques et géologiques qui caractérisent ces systèmes en font un patrimoine fragile qui nécessite une gestion rationnelle pour sa durabilité. Les prélèvements (1,6 km³ par forages et 85 hm³ par foggaras) représentent le 1/3 des ressources renouvelables, estimées à 5 km³ (4km³ dans le Continental Intercalaire et 1 km³ dans le Complexe Terminal) (Mebarki, 2010 et Bounab et al., 2017).



1. Continental intercalaire - 2. Complexe terminal - 3. Limite de l'aire d'exploitation du système aquifère du Complexe terminal

Figure I.1: Les deux grandes nappes du Sahara (Castany, 1982)

5. Les caractéristiques hydrodynamiques

La caractéristique hydrodynamique majeure des milieux poreux est leur porosité interconnectée qui constitue une propriété sédimentologique; l'écoulement se fait dans toute la section de l'aquifère avec des vitesses relativement homogènes et faibles du fait de la grande section d'écoulement (**Gilli et al., 2008**).

5.1. La loi de DARCY

L'expérience de base de l'hydrogéologie des milieux continus a été réalisée par **Darcy** en **1856**. Darcy a étudié la quantité d'eau transmise au travers d'un échantillon de matériau poreux contenu dans une colonne (de section S et de longueur L) et soumis à une charge hydraulique constante (H). Il a ainsi déterminé que le débit Q à la base de la colonne était proportionnel à la section de la colonne, à la hauteur de la charge hydraulique, inversement proportionnel à la longueur de matériau traversé et fonction d'un coefficient K caractéristique de ce même matériau filtrant (fig.I.2) (**Kendouci et al, 2016**).

$$Q = S.K.(H/L).....(I.1)$$

K est désigné comme la conductivité hydraulique (encore désigné comme le coefficient de perméabilité ou la perméabilité) du matériau et exprimé en m/s. Il représente la plus ou moins grande capacité d'un matériau à se laisser traverser par l'eau.

Dans la nature, il est possible de trouver une échelle très vaste de valeur de K. De façon générale, les roches granulaires non consolidées et les roches fissurées présentent des valeurs élevées de conductivité hydraulique, à l'opposé les roches composées de particules fines (silts, argiles) ou encore les roches cristallines cohérentes montrent des valeurs très faibles (**Kendouci, 2018**).

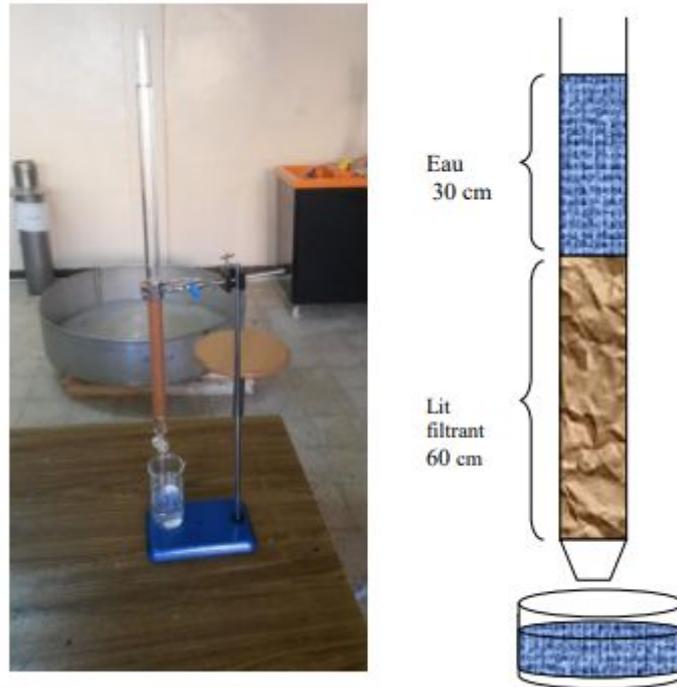


Figure I.2: Schéma illustrant le dispositif expérimental (Kendouci et al., 2016)

5.2. Paramètres hydrodynamiques de la nappe

La perméabilité K d'un réservoir caractérise la facilité avec laquelle l'eau le traverse sous l'effet d'un gradient hydraulique. Il s'agit d'un coefficient, défini par la loi de Darcy, qui correspond au débit Q (en m^3/s) traversant une unité de section A (en m^2) sous l'effet d'un gradient hydraulique unitaire (i).

Donné par l'expression $K = Q/A.i$, il est assimilable à une vitesse de filtration et s'exprime en mètres par seconde (m/s). Sa valeur évolue de 10^{-1} ou 10^{-2} m/s dans les terrains les plus perméables à 10^{-7} m/s pour les formations peu perméables (Gilli et al., 2008).

La perméabilité offre une représentation ponctuelle d'un milieu aquifère mais présente d'importantes variations latérales et verticales en fonction de la nature lithologique des horizons concernés et de la densité du réseau de fissures. C'est pourquoi on utilise fréquemment des notions plus globales qui caractérisent des volumes plus importants et homogènes de la nappe: la transmissivité et le coefficient d'emménagement (Gilli et al., 2008).

La transmissivité T représente le débit d'un niveau aquifère sur toute son épaisseur, par unité de largeur et sous un gradient hydraulique unitaire. Elle correspond donc au produit de

la perméabilité moyenne K (en m/s) par l'épaisseur du niveau e (en m), soit $T = K.e$, et s'exprime en m^2/s (Gilli et al., 2008).

Le coefficient d'emmagasinement S est le rapport du volume d'eau libéré par unité de surface, sous une charge hydraulique unitaire, et détermine la fonction capacitive du réservoir.

Il exprime, en nappe libre, la capacité de vidange des pores de la roche et peut donc être assimilé à sa porosité efficace. En nappe captive, il résulte de la décompression de la roche et de l'eau contenue dans ses pores. Sa valeur varie de 0,2 à 0,01 pour les nappes libres et de 0,001 à 0,0001 pour les nappes captives (Gilli et al., 2008).

La diffusivité T/S régit la propagation des influences dans le milieu aquifère. Elle s'exprime en m^2/s et détermine, notamment, le transfert de masses d'eau ou de pressions (Gilli et al., 2008).

5.3. La circulation de l'eau dans le sous-sol : La piézométrie

La piézométrie, aussi appelée le niveau piézométrique, est le niveau que l'eau souterraine atteint dans un puits. Si le niveau piézométrique de l'aquifère régional est connu en tous points d'un territoire, la surface imaginaire qui relierait tous les niveaux mesurés s'appellerait la surface piézométrique. Pour représenter la surface piézométrique sur une carte, des lignes sont tracées entre différents points de même niveau piézométrique (appelées isopièzes ou courbes piézométriques), comme sur une carte topographique. L'écoulement de l'eau souterraine s'effectue des points de piézométrie élevée aux points de piézométrie plus basse (UQAM et al., 2013).

Les reconnaissances piézométriques liées aux études hydrogéologiques fournissent les informations suivantes :

- la profondeur, l'épaisseur, l'étendue et la perméabilité des couches de terrains aquifères et des réseaux de joints dans la roche ;
- la cote altimétrique de la surface de la nappe ou le niveau des formations aquifères;
- la répartition des pressions interstitielles ;
- la composition chimique de l'eau et sa température.

6. L'hydrochimie des eaux souterraines

L'étude de la chimie des eaux souterraines fournit de nombreuses informations utiles pour l'hydrogéologie et aide à comprendre les phénomènes qui se produisent dans le système aquifère. C'est-à-dire que dans l'échange éventuel entre l'eau et la roche, il est connu que la minéralisation des eaux souterraines peut être due à des éléments chimiques obtenus par la dissolution et le changement de minéraux dans le réservoir.

L'eau de pluie est légèrement acide du fait de sa teneur en CO₂ dissous. Au cours de son infiltration dans le sol et le sous-sol, elle se charge en ions et acquiert des propriétés physiques et chimiques qui caractérisent l'eau de la nappe qu'elle forme. Les eaux souterraines sont plus ou moins minéralisées en fonction:

- de la nature des roches traversées et des minéraux rencontrés au cours de l'infiltration;
- du temps de contact de l'eau avec les minéraux, donc de la vitesse de percolation de l'eau dans le sous-sol;
- du temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration.

6.1. Paramètres de qualité des eaux souterraines

La qualité d'une eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques mais également par son usage. Ainsi, une eau impropre à la consommation peut être adaptée à l'irrigation ou à la pisciculture. Dans les pays en voie de développement à climat aride, le rôle des eaux souterraines est d'autant plus important qu'elles constituent souvent la seule source d'approvisionnement en eau potable et sont donc vitales pour le développement de ces pays **(Travi, 1993)**.

Les analyses physico-chimiques d'eau souterraine font référence à toutes les actions de détermination d'une valeur sur un échantillon, qu'il s'agisse d'analyses de mesures ou d'observations. Elles sont réalisées en laboratoire ou sur le site de la station de mesure. Les informations relatives aux résultats d'analyse sont fournies par l'organisme chargé de l'analyse. Elles sont communiquées sous la responsabilité de l'organisme producteur de données qui confirme ou non le résultat au regard de la connaissance et du contrôle du processus de production de la donnée. Il s'engage ou pas sur la vraisemblance et la représentativité de la donnée par rapport au milieu où a été réalisé le prélèvement **(Sandre ,2011)**.

6.1.1. Les paramètres physiques

6.1.1.1. Température

La température de l'eau est critique car c'est une propriété importante dans les paramètres environnementaux. Il est important de mesurer la température de l'eau car nous pouvons voir les caractéristiques de l'eau telles que les propriétés chimiques, biologiques et physiques de l'eau ainsi que les effets possibles sur la santé. La température de l'eau est un facteur important qui détermine si une masse d'eau est acceptable pour la consommation et l'utilisation humaine (SDWF, 2020).

- La température dans l'eau régit les types de vie aquatique qui y vivent.
- Il régule la concentration maximale d'oxygène dissous dans l'eau.
- La température influence le taux de réactions chimiques et biologiques.
- Il affecte le niveau d'oxygène dissous dans l'eau, la photosynthèse des plantes aquatiques, les taux métaboliques des organismes aquatiques et la sensibilité de ces organismes à la pollution, aux parasites et aux maladies.

La température joue un rôle majeur dans la solubilité des sels et gaz et donc en conductibilité. Elle traduit la différence entre l'eau qui circule en profondeur et l'eau qui circule à proximité de la surface, elle constitue un des facteurs affectant la vitesse du produit chimique réactions. La température moyenne de l'eau en toutes saisons allait de 24 ° C à 25 ° C; la variation thermique de les eaux souterraines peuvent être liées à la profondeur de l'aquifère et la saison. Par exemple, l'ancien Conseil de l'Europe Les directives communautaires fixent 12 ° C comme niveau de référence pour le température de l'eau prévue (consommation humaine, et à 25 ° C, température à ne pas dépasser (Rodier et al., 2009).

6.1.1.2. pH

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H⁺ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau. Le pH des eaux naturelles est lié à la nature des terrains traversés. Dans les eaux naturelles, les valeurs du potentiel d'Hydrogène se situent entre 6 et 8,5 (Chapman et al., 1996). Le pH est un paramètre important, il détermine son aptitude à l'usage humain, agricole, industriel et au fonctionnement des écosystèmes aquatiques (Sharma et al., 2018).

6.1.1.3. La conductivité électrique

La conductivité représente l'un des moyens de valider les analyses physicochimiques de l'eau, en effet des contrastes de conductivité mesurés sur un milieu permettent de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélange ou d'infiltration (**Kendouci, 2018**).

La conductivité est également fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente. Elle permet d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau (**Pescod, 1985 et Rodier, 1994**). Elle constitue une bonne appréciation de la minéralisation de l'eau. Une conductivité élevée traduit une quantité de sels dissous très importante (**Rodier, 1996**) et elle donne une idée de la minéralisation d'une eau, elle est à ce titre un bon marqueur de l'Origine d'une eau (**HCEFLCD, 2006**).

La mesure de la conductivité permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation globale de l'eau.

Le tableau ci-dessous donne quelques indications sur la relation existant entre la minéralisation et la conductivité (**Rodier, 2009**).

<i>Conductivité < 100 $\mu\text{S/cm}$: minéralisation très faible ;</i>
<i>100 $\mu\text{S/cm}$ < conductivité < 200 $\mu\text{S/cm}$: minéralisation faible ;</i>
<i>200 $\mu\text{S/cm}$ < conductivité < 333 $\mu\text{S/cm}$: minéralisation moyenne ;</i>
<i>333 $\mu\text{S/cm}$ < conductivité < 666 $\mu\text{S/cm}$: minéralisation moyenne accentuée ;</i>
<i>666 $\mu\text{S/cm}$ < conductivité < 1 000 $\mu\text{S/cm}$: minéralisation importante ;</i>
<i>Conductivité < 1 000 $\mu\text{S/cm}$: minéralisation élevée.</i>

6.1.1.4. Teneur totale en sels dissous TDS

La teneur totale en sels dissous est un paramètre important pour évaluer la qualité des eaux souterraines, ce terme est utilisé pour décrire la présence de sels inorganiques et de petites quantités de matière organique en solution dans l'eau. Les principaux constituants sont généralement les cations de calcium, de magnésium, de sodium et de potassium et les anions de carbonate, de bicarbonate, de chlorure, de sulfate et de nitrate (**Jacintha et al., 2017**). Des niveaux TDS élevés indiquent généralement une eau dure et peut entraîner une accumulation de tartre dans les canalisations ce qui diminue de l'efficacité des filtres à eau, des chauffe-eau, et peut provoquer des problèmes d'esthétique tels qu'un goût saumâtre ou salé (**WHO, 1993**). D'autres paramètres (tels que l'évaporation et l'évapotranspiration) peuvent augmenter ces

concentrations. "Le TDS est égal à la somme des principaux ions contenus dans un litre d'eau" (Drever, 2001).

6.1.2. Les paramètres chimiques

6.1.2.1. Calcium (Ca^{+2})

Le calcium est généralement l'élément dominant de l'eau potable et sa teneur varie principalement en fonction de la nature du terrain traversé (sol calcaire ou gypse) (BRGM, 2006). Cet élément est fréquent dans les roches sédimentaires, il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées suite à la présence du gaz carbonique. Le calcium peut provenir également des formations gypsifères ($\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), qui sont facilement solubles.

6.1.2.2. Magnesium (Mg^{+2})

C'est un élément qui accompagne souvent le calcium et vient de la dissolution des dolomites, des calcaires dolomitiques et minéraux ferromagnésiens. Dans les formations carbonatées (les calcaires, les calcaires dolomitiques et les dolomies), la concentration en magnésium est contrôlée par les équilibres avec les minéraux carbonatés. Le magnésium est un élément prédominant dans les eaux drainant des aquifères contenant des carbonates magnésiens comme la dolomie. Dans ce contexte, les concentrations sont généralement de l'ordre de quelques dizaines de mg/l ou plus (BRGM, 2006).

6.1.2.3. Sodium (Na^+)

Le cation sodium (Na^+) est très abondant sur la terre. On le retrouve dans les roches cristallines et les roches sédimentaires (sable, argile, évaporite). La roche Halite (évaporite NaCl) est le sel de cuisine. Il est très soluble dans l'eau. Le sodium est par contre généralement peu présent dans les roches carbonatées. Notons que les argiles peuvent être saturées en ions Na^{+2} , par le processus d'échange de bases (Rodier, 1976).

6.1.2.4. Potassium (K^+)

C'est un élément alcalin, très réactif avec l'eau, et il se trouve dans les roches ignées et dans la nature sous forme de chlorure double dans de nombreux minerais (BRGM, 2006). Bien que dans les roches ignées la teneur en potassium soit presque aussi importante que celle du sodium, sa présence à peu près constante dans les eaux naturelles ne dépasse pas habituellement 10 à 15 mg/l (Rodier, 1976).

6.1.2.5. Chlorure (Cl^-)

Le chlorure sous forme d'ion chlorure (Cl^-) est le principal anion inorganique présent dans l'eau et les eaux usées (**Thakur et al., 2015**). Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines et sont principalement liées à la dissolution des champs de sel. La dissolution de ces sels sont très faciles d'où leur présence en fortes concentrations dans les eaux ayant traversé l'argile-sableux ou formations argileuses. Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de la corrosion dans les tuyaux et les réservoirs à partir de 500 mg / l (**norme OMS**).

6.1.2.6. Bicarbonate (HCO_3^-)

Les bicarbonates se trouvent dans les eaux naturelles et leur présence dans l'eau est due à la dissolution de formations carbonatées comme les calcaires et les dolomites (**Drever, 2001**). HCO_3^- est l'anion le plus commun des eaux souterraines, essentiellement dérivé du dioxyde de carbone (CO_2) du sol (**Yammani et al., 2008**).

6.1.2.7. Sulfates (SO_4^{2-})

Ils sont présents dans les eaux naturelles à des niveaux très variables, et ils peuvent provenir de la dissolution du gypse. Ce dernier peut être triasique, car il peut être associé à plus formations récentes telles que les argiles Mio-Plio-Quaternaires. Ils dépendent également des déchets industriels. Les sulfates sont très éléments solubles et également très stables (**BRGM, 2006**).

6.1.2.8. Nitrate (NO_3^-)

C'est une forme très soluble, et sa présence dans l'eau est liée aux engrais, l'ion nitrate (NO_3^-) est la forme d'azote la plus oxydée. Le nitrate dans les eaux souterraines peut provenir de sources ponctuelles telles que les systèmes d'évacuation des eaux usées et les installations d'élevage, de sources non ponctuelles telles que les terres agricoles fertilisées, les parcs ou les sources naturelles d'azote (**Thakur et al., 2015**).

6.1.2. Qualité des eaux

Lors de l'utilisation de l'eau hors de son milieu, sa qualité est souvent mentionnée, elle est fonction du type d'usage. Ainsi, les exigences relatives à la qualité sont différentes d'une utilisation à l'autre.

6.1.2.1. Teneurs maximales admissibles pour l'A.E.P

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), une eau potable est une eau que l'on peut boire sans risque pour la santé. L'OMS la définit comme une eau ayant les caractéristiques microbiennes, chimiques et physiques qui répondent aux directives de l'OMS. En clair, une eau potable est une eau qui ne contient pas d'agents pathogènes ou d'agents chimiques à des concentrations pouvant nuire à la santé (**Boudia, 2017**).

L'Algérie s'est basée sur les normes internationales, pour établir ses propres normes, on peut dire que c'est une combinaison des différentes normes qui existe sur le plan international. Les normes établies par certains chercheurs comme **Mr. Boudoukha** et al à travers une synthèse hydrochimique dans les différentes régions du Nord Algérien qui ont proposé en **1992** des normes de potabilité spécifiques à la partie Nord du pays.

- Calcium et Magnésium

Ces deux ions sont qui fixent la dureté totale de l'eau. Dans l'eau, le calcium est un composant majeur de la dureté, l'apport en calcium nécessaire à l'organisme est surtout apporté par l'alimentation (**Bouziani, 2000**).

La teneur de magnésium dépend des terrains traversés, Leur concentration n'est pas tellement dépendantes des activités humaines, donc le magnésium n'est pas utilisé comme indicateur de pollution (**Ahonon, 2011**). Les eaux potables de bonne qualité doivent renfermer de 100 mg/l de calcium et 50 mg/l de magnésium selon l'OMS.

- Sodium et Potassium

L'effet de potassium est mineur sur le corps humain. A partir de 34mg/l on remarque que l'eau commence à avoir un léger goût. Le sodium n'est laxatif qu'à de très forte concentration 1 g/l. L'O.M.S recommande une valeur de 20mg/l.

- Carbonate et bicarbonate

La concentration des bicarbonates et des carbonates dans l'eau est essentiellement fonction des conditions d'équilibre, la présence d'anhydrite carbonique dans l'eau, donne une saveur agréable et ne présente aucun inconvénient pour la santé humaine.

- Chlorure

Les chlorures sont dangereux pour les personnes atteintes de maladies cardiovasculaires, mais en général des teneurs de 700 mg/l de Na Cl ne présentent aucun inconvénient pour l'homme. L'O.M.S fixe une valeur de 250 mg/l pour une eau destinée à la consommation humaine.

- Sulfate

Les sulfates proviennent essentiellement de lessivage des terrains gypseux. Une teneur supérieur à 250 mg/l n'est pas dangereux mais peut entraîner des troubles diarrhéiques chez l'enfant. L'O.M.S recommande une valeur limite de 500 mg/l.

- Nitrate

L'O.M.S fixe une valeur limite de 50 mg/l pour l'eau potable.

6.1.2.2. Qualité des eaux destinées aux activités agricoles

Les eaux souterraines sont devenues la principale source d'utilisation de l'eau dans le secteur agricole dans de nombreux pays où les systèmes fluviaux et de drainage sont insuffisants d'où une mauvaise qualité des eaux souterraines utilisées à des fins d'irrigation qui est devenue un sujet de préoccupation ces dernières années (Rawat et al., 2018).

Classification en fonction du Sodium absorbé par le sol « SAR »

Cette classification nécessite une évaluation de la concentration des ions Na^+ dans le sol, qui remplace le calcium ou le magnésium dans le complexe en suivant la relation Eq. (1) (Appelo et al., 1993; Postma et al., 1999):

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{[(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/2]^{1/2}} \dots\dots\dots (1.2)$$

Où : Les concentrations des ions Na^+ , Ca^{+2} et Mg^{+2} sont exprimés en méq/l.

Sur la base de la plage de SAR, l'eau d'irrigation peut être classée en quatre classes: SAR < 10 (idéal ou excellent), 10–18 (bonne), 18–26 (eau convenable) et > 26 (eau médiocre).

6.2. Faciès hydrochimiques

L'interprétation des résultats des analyses a pour but de déterminer le faciès chimique et d'effectuer une comparaison spatio-temporelle. Parmi les méthodes graphiques les plus utilisées, celle de **Schöeller et Berkloff (1935-1938)** et celle de **Piper 1944**. Le diagramme triangulaire de Piper comprend trois triangles (**Back et Hanshaw, 1965**) ont défini les subdivisions du champ de dominance qui ont représenté le type ou les catégories d'eau qui forment la base d'un système de classification commun pour les eaux naturelles. La lithologie, la cinétique de la solution et les schémas de débit de l'aquifère contrôlent l'hydrochimie de tous les faciès (**Nemčić-Juree et al., 2017**).

6.3. Notion sur la vulnérabilité

Depuis les années **1970**, la détection croissante de contamination dans l'eau souterraine a suscité le développement du concept de vulnérabilité à la pollution des aquifères. La vulnérabilité de l'eau souterraine est souvent définie comme « la capacité d'un système hydrogéologique à transmettre un contaminant potentiel depuis la surface du sol jusqu'à la zone saturée ». Les cartes de vulnérabilité illustrent différents degrés de sensibilité de l'aquifère et fournissent des informations utiles et nécessaires permettant d'orienter les choix des politiques de prévention et de gestion des risques de pollution des ressources en eau souterraine de la région dans la perspective d'une gestion durable. La vulnérabilité des aquifères à la pollution dans une région donnée résulte d'une combinaison de plusieurs facteurs qui sont : l'hydrogéologie, la réaction aquifère-contaminant et les sources de pollution (**Latifi et al., 2017**).

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

La vulnérabilité des nappes à la pollution est définie comme leur sensibilité aux différents facteurs de contaminations à partir de la surface du sol, c'est l'étude des possibilités de la propagation des polluants dans l'espace souterrain lié à l'autoépuration naturelle du sol donc a la présence des conditions indispensables à son action, elle est favorisée par la circulation de l'eau. (**Castany, 1982**).

6.3.1. Types de vulnérabilité

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

6.3.1.1. La vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité intrinsèque est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. Cette vulnérabilité dépend de différents facteurs, notamment la nature du sol (pédologie), la pente du terrain, la nature et l'épaisseur de la zone non saturée ;

6.3.1.2. La vulnérabilité spécifique

La vulnérabilité spécifique est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants.

A mentionner qu'à l'échelle de l'investigation, les deux types de vulnérabilité ne peuvent être placés sur le même niveau. La vulnérabilité intrinsèque est considérée comme invariante dans le temps, alors que la vulnérabilité spécifique est instantanée, liée surtout aux sources de pollution. D'autre part, la vulnérabilité spécifique est prise en compte pour répondre généralement à un problème bien particulier (spécifique) (**Achour, 2014**).

6.3.2. Critères conditionnant la vulnérabilité intrinsèque

Pour qualifier la vulnérabilité intrinsèque, un certain nombre de critères sont disponibles, ils sont associés aux ensembles souterrains dans lesquels ils interviennent et sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.5 : Critères de vulnérabilités couramment pris en compte (BRGM, 2002)

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

6.3.2.1. Critères liés au sol

Dans le processus de l'infiltration des polluants à la nappe, les propriétés du sol influent largement sur le mécanisme de transfert, ainsi la texture, la porosité, la composition minéralogique et chimique, la teneur en argiles et en matière organique constituent les principaux paramètres. La topographie du sol joue aussi un rôle important dans le processus de migration du polluant vers la nappe, elle conditionne la détermination des zones d'infiltration préférentielle de la nappe. De ce fait, elle peut être considérée représentative de la recharge efficace de la nappe (BRGM 2002).

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

La zone non saturée est la zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe d'eau souterraine libre. A cet endroit, la quantité d'eau gravitaire est temporaire, en transit. Le transfert des polluants dans le sol s'effectue d'abord à travers la zone non saturée (ZNS) avant d'atteindre la zone saturée (nappe) (BRGM, 2002). Les critères régissant la propagation du contaminant dans cette zone sont multiples et complexes, on retrouve (Ahour, 2014);

- Profondeur de la nappe libre (ou épaisseur de la zone non saturée) : épaisseur de la zone non saturée (ZNS) conditionnent le temps de transfert d'un polluant jusqu'à la

nappe (rétention, stockage, interaction physico-chimique avec l'encaissant) et donc sa possibilité de dégradation au cours du transfert.

- Perméabilité verticale de la ZNS : Elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant de la surface du sol vers la nappe.
- Structure de la ZNS : la texture, la teneur en matière organique et en argile Les variations de faciès, le degré d'hétérogénéité et le degré de fissuration de la zone non saturée, constituent autant de facteurs qui conditionnent la propagation d'un polluant jusqu' à la nappe.

6.3.2.3. Critères liés à la zone saturée

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

- **Type de nappe**

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

- **Paramètres hydrodynamiques**

Ils déterminent la vitesse de propagation des polluants dans la nappe, ainsi que le temps de séjours dans la zone saturée. Ces paramètres hydrodynamiques sont ; la transmissivité (T), la perméabilité (K), le coefficient d'emmagasinement (S) et le gradient hydraulique (i).

- **Piézométrie de la nappe**

La piézométrie retrace la géométrie de la nappe et son fonctionnement hydrodynamique qui peuvent évoluer au cours d'un cycle hydrologique complet.

- **Epaisseur de l'aquifère réservoir**

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

- **Limites d'écoulement**

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

- **Pouvoir filtrant de l'aquifère réservoir**

Deux principaux types de réservoirs d'eau souterraine sont à distinguer ; les aquifères homogènes à perméabilité d'interstices. Ils sont composés de matériaux détritiques et disposant un pouvoir auto-épuration très important. Les aquifères hétérogènes à perméabilité de fissures. Dans ceux-ci la vitesse d'écoulement des eaux est rapide, d'où un pouvoir auto-épuration quasiment nul. Cette catégorie d'aquifères peut se retrouver dans les milieux fissurés et les milieux carbonatés karstiques (**Achour, 2014**).

6.3.3. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (**Gogu et Dassargues, 1998 et 2000**).

6.3.3.1. Présentation de la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'**Environmental Protection Agency (EPA)** aux Etats-Unis en **1985** et **Aller et al. en 1987**, afin d'estimer le potentiel de pollution et d'évaluer la vulnérabilité verticale des eaux souterraines. Elle se base sur sept critères qui sont :

[D] : Depth to groundwater (Distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée)

[R] : Net Recharge efficace (recharge de l'aquifère)

[A] : Aquifer media (la lithologie de la zone saturée de l'aquifère)

[S] : Soil media (nature du sol)

[T] : Topography (pente topographique du terrain en %)

[I] : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée)

[C] : Hydraulic Conductivity (perméabilité de l'aquifère).

Chaque paramètre est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité. Une fois les différentes classes définies et leurs notes attribuées, la méthode détermine l'indice DRASTIC (ID) qui permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de la nappe. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice (ID) calculé est élevé.

Cet indice est défini de la manière suivante :

$$ID = Dn.Dp + Rn.Rp + An.Ap + Sn.Sp + Tn.Tp + In.Ip + Cn.Cp \dots\dots\dots(I.3)$$

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

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

n : notation accordée à chaque paramètre.

Le tableau I.6 contient les poids attribués à chacun des paramètres ci-dessus. Les poids les plus élevés (5) sont attribués à la nature lithologique et à l'épaisseur de la zone non saturée. Les poids les plus faibles (1 et 2) sont attribués respectivement à la pente et à la nature lithologique du sol.

- **Le système de notation appliqué**

Pour chacun des paramètres DRASTIC, une note est affectée sur une échelle entière allant de 1 (le moins important) à 10 (le plus important). Pour un paramètre donné, une note basse implique que la nappe concernée n'est pas vulnérable à la pollution et vice-versa (Tab. I.7 et 8).

Les hypothèses implicites liées à l'application de la méthode DRASTIC ont été données par :

- Le contaminant potentiel provient de la surface.
- Le contaminant parvient dans l'aquifère grâce aux précipitations.
- Le contaminant est parfaitement conservatif (se déplace à la même vitesse que l'eau).

Tableau I.6: Poids attribués aux paramètres DRASTIC (Aller et al., 1987)

Symbole	Paramètre	Propriétés	Poids
D	Profondeur de la nappe	Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met beaucoup de temps pour atteindre la surface piézométrique.	5
R	Recharge	Véhicule principal pour le transport du contaminant. Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé.	4
A	Lithologie de l'aquifère	Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand	3
S	type de Sol	Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.	2
T	Topographie	Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible	1
I	Zone non saturée	Son impact est déterminé à partir de la texture des terrains qui la constituent. La percolation du polluant jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette texture est favorable	5
C	Perméabilité	Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide.	3

Tableau I.7: Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (Engel et al., 1996).

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 101
Moyen	101 - 140
Élevé	141 - 200
Très élevé	> 200

Tableau I.8 : Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (**Barres et al., 1994**).

D : distance à la nappe Epaisseur de la ZNS		R : recharge Pluie efficace	
Valeurs en mètres	Notation	Valeurs en mm	Notation
0 – 1,5	10	>25,5	9
1,5 – 4,5	9	17,5 – 25,5	8
4,5 – 9	7	10 – 17,5	6
9 – 15	5	5 – 10	3
15 – 22	3	0 – 5	1
22,5 – 30	2		
>30	1		

A : nature de la zone saturée		S : nature du sol	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sable,	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats ou pentes	7
Grès massif	6	Limon sableux	6
Shales en séquence	6	Limon	5
Métamorphique altéré, grès lités, calcaires	4	Limon silteux	4
Métamorphique	3	Limon argileux	3
Shale massif	2	Argile non agrégée et non fissurée	1

T : topographies, pentes		I : nature de la ZNS	
Valeurs en % de la pente	Notation		
0 - 2	10	Calcaire karstique	10
2 – 6	9	Basalte	9
6 – 12	5	Sable et gravier	8
12 – 18	3	Sable et gravier avec silt et argile	6
>18	1	Calcaire lité, grès, shale	6
		Grès	6
		Calcaire	6
		Shale	3
		Silt/argile	1

I : nature de la ZNS	
> 9,4 10 ⁻⁴ m/s	10
4,7 10 ⁻⁴ - 9,4 10 ⁻⁴ m/s	8
32,9 10 ⁻⁵ - 4,7 10 ⁻⁴ m/s	6
14,710 ⁻⁵ - 32,9 10 ⁻⁵ m/s	4
4,710 ⁻⁵ - 14,710 ⁻⁵ m/s	2
4,710 ⁻⁷ - 4,710 ⁻⁵ m/s	1

6.3.3.2. Présentation de la méthode GOD

La méthode GOD est une méthode de systèmes paramétriques développée par Foster en Angleterre en 1987 (**Foster, 1987**). Elle présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas la migration latérale des polluants dans la zone saturée (**Mardhel et al., 2005**).

Elle repose sur trois critères :

- G: type de nappe (Groundwater occurrence) ;
- O: type de l'aquifère en terme de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ;
- D: profondeur de la nappe (Depth to groundwater table).

La détermination de l'indice GOD (IG) est obtenue par la multiplication de ces trois paramètres, selon l'équation (2), où "C" est la cote affectée au paramètre (Ake et al., 2009) :

$$IG = Ca * Cl * Cd$$

- Ca : cote du type d'aquifère,
- Cl : cote de la lithologie de d'aquifère (essentiellement la zone non saturée),
- Cd : cote de la profondeur de la nappe.

La vulnérabilité augmente avec l'indice et la classification, elle compte cinq de 0 à 1.

Tableau I.9 : Classification selon le degré de vulnérabilité (GOD)

Classe	Intervalle
Vulnérabilité très faible	0-0.1
Vulnérabilité faible	0.1-0.3
Vulnérabilité modéré	0.3-0.5
Vulnérabilité forte	0.5-0.7
Vulnérabilité extrême	0.7-1

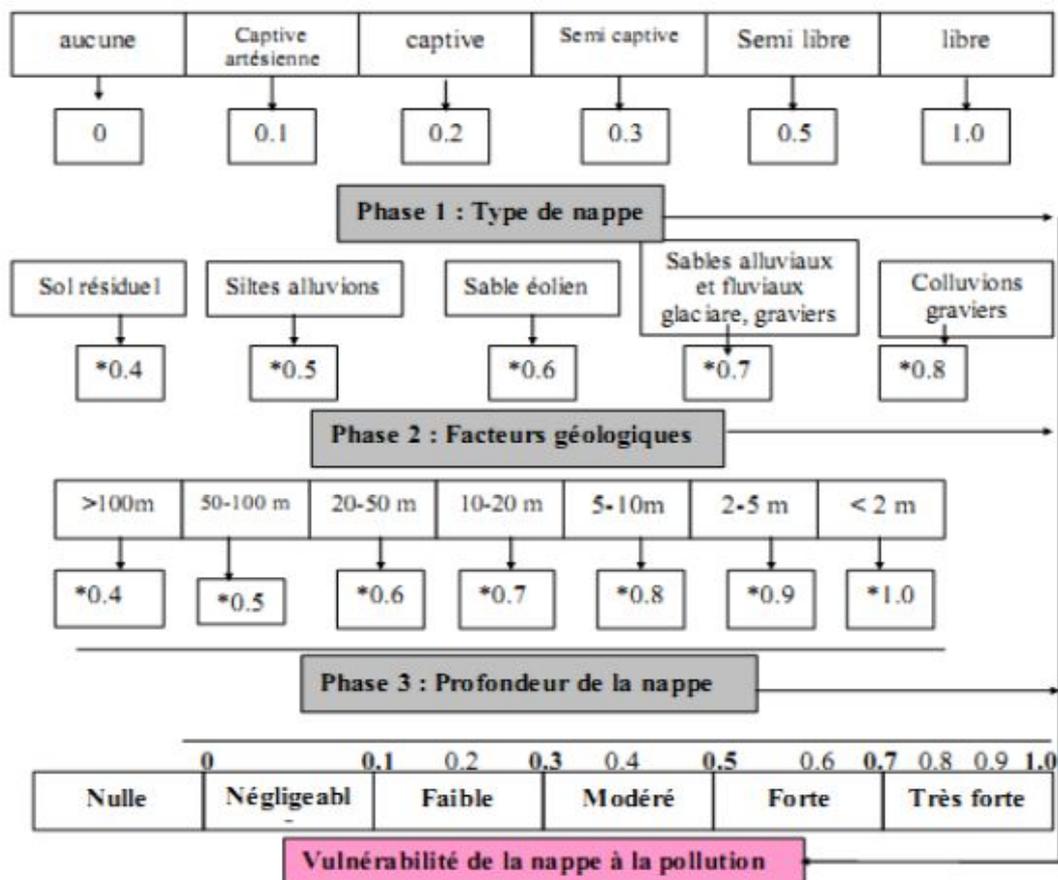


Figure I. 3 : Indices de classification de la vulnérabilité selon la méthode GOD (Foster, 1987).

6.3.3.3. La méthode SINTACS

La méthode SINTACS (Civita, 1994) est la version italienne de la méthode DRASTIC : c'est une adaptation de cette méthode aux conditions méditerranéennes. Cette méthode prend en considération les mêmes paramètres que la méthode DRASTIC avec des poids et des cotes différentes. L'acronyme SINTACS correspond aux initiales des sept facteurs suivants :

- la profondeur du plan d'eau (S = Soggiacenza),
- la recharge efficace de l'aquifère (I = infiltrazione),
- l'effet de l'autoépuration de la zone vadose (N = effeto di autoepurazione del non-saturo),
- le type de sol (T = tipologia della copertura),
- les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère (A = caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero),

- la conductivité hydraulique de l'aquifère ($C = \text{conductibilit\`a dell'acquifero}$)
- la pente topographique ($S = \text{l'acclivita della superficie topografica}$).

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

Scénario « Impact Normal » : scénario relatif aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés avec une profondeur de la nappe qui n'est pas très élevée, localisés dans des aires à sols épais. Les zones relatives à ce scénario correspondent aux régions stables, de point de vue occupation des sols, avec existence ou non de terres cultivées, une utilisation faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et des périmètres urbains très dispersés ;

Scénario « Impact Sévère » : correspond aux mêmes types d'aquifères soumis à une occupation des sols intensive ,avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, des implantations industrielles et urbaines denses, et des dépôts liquides et solides de déchets;

Scénario « Drainage important à partir d'un réseau superficiel » : scénario relatif aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau ;

Scénario « Terrain très karstifié »;

Scénario « Terrain fissuré »

6.3.3.4. Méthode SI (Susceptibility Index)

Cette méthode d'évaluation de la vulnérabilité verticale a été développée au Portugal par **Ribeiro (2000)**. Elle prend en compte les pollutions d'origine agricole, essentiellement les nitrates et les pesticides, elle utilise cinq paramètres (Tab. I.10). Les quatre premiers sont identiques aux méthodes DRATIC et SINTACS, le cinquième est un nouveau paramètre qui a été introduit, il s'agit de l'occupation des sols (OS). Selon les valeurs de l'indice de vulnérabilité, la méthode SI présente quatre classes de degrés de vulnérabilité (**Achour, 2014**).

L'indice de vulnérabilité (SI) est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants :

$$I_{SI} = D_c \times D_p + R_c \times R_p + A_c \times A_p + T_c \times T_p + O_{Sc} \times O_{Sp} \dots \dots \dots (I.4)$$

Où:

I_{SI}: l'indice de SI.

D_C: note de profondeur.

D_p: poids de la profondeur.

R_c: note de Recharge.

R_p: Poids de Recharge.

A_c: note de Lithologie.

A_p: poids de Lithologie

T_c: note de Topographie.

T_p: poids de Topographie.

I_c: note de L'occupation des sols.

I_p: poids de L'occupation des sols

Tableau I.10 : Les paramètres méthode SI.

	Paramètres	Propriété	Poids
D	Profondeur de la surface de la nappe	Profondeur de la l'aquifère est facteur important dans l'étude de la vulnérabilité, car toute atténuation du polluant s'opère en relation avec la profondeur. Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met beaucoup pour atteindre la surface piézométrique.	0,186
R	Recharge nette	définit la quantité d'eau est importante, plus la possibilité de contaminer la nappe est élevée.et c'est facteur important de la vulnérabilité. Généralement plus la quantité d'eau est importante, plus la possibilité de contaminer la nappe est élevée.	0,212
A	Nature lithologique de l'aquifère	Le facteur milieu aquifère met en relation la capacité des matériaux aquifères à stocker et à transporter les polluants dans les souterraines pendant l'infiltration dans les couches. caractérisé par la granulométrie des terrains saturés, plus la granulométrie est fine, plus le piégeage est grand.	0,259
T	Topographique (pente du terrain)	La topographie influence le développement du sol qui a un effet sur l'atténuation des contaminants. Plus la pente de la terre est grande, plus le ruissellement d'eau est grand et la pollution des eaux souterraines est très faible.	0,212
Os	L'occupation des sols	La couverture biophysique de la surface des terres émergées, s'est basée sur la vectorisation des différentes entités (roche ,sol nu ,habitation et zone humide)	0,222

Le degré de vulnérabilité de la méthode SI donne une classification pour 4 indices selon l'intervalle.

Tableau I.11: Degré de vulnérabilité de la méthode SI (**Ribiro, 2000**).

Critères de vulnérabilité	Intervalle de la vulnérabilité
Faible	< à45
Moyen	45 à 64
Fort (élevé)	65 à 84
Très fort (très élevé)	85 à 100

7. Conclusion

Les eaux souterraines sont en effet moins connues que les eaux de surface. L'origine de ce constat est durable, non seulement les réseaux d'observation des eaux souterraines sont insuffisants ou inexistantes mais leur exploitation est également plus difficile. Les nappes sont en effet des objets tridimensionnels dans lesquelles les phénomènes ne sont généralement pas homogènes et échappent à l'observation directe.

De ce fait, il est indispensable d'effectuer des auscultations bien connues en hydraulique souterraines, à savoir : essais de puits, essais de nappe et piézométrie afin d'optimiser une exploitation rationnelle et d'éviter les effets néfastes due à des surexploitations.

L'étude des propriétés physicochimique des eaux d'une nappe permet, non seulement de juger la salubrité des eaux vis-à-vis de l'usage domestique et agricole mais elle constitue un complément très utile pour l'étude hydrogéologique. L'étude de la qualité physico chimique des eaux a pour but d'identifier les faciès chimiques des eaux, leurs qualités, leurs potabilités, et de suivre leur évolution spatiale.

La préservation de la qualité des eaux issues des aquifères est d'autant plus importante du fait que cette ressource, une fois contaminée, devient inappropriée pour la consommation (**Jourda et al., 2006**). Une des approches d'aide à la protection et à la prévention des eaux souterraines contre la pollution est la cartographie des zones vulnérables à la pollution (**Champagne et al., 1993**). Plusieurs techniques ont été développées pour analyser la

vulnérabilité intrinsèque telles que les méthodes paramétriques DRASTIC, GOD, SI, SINTACS.

Chapitre II

Présentation générale de la région d'étude

1. Introduction

Ce chapitre présente les traits majeurs du site d'étude, son cadre géographique, géomorphologique et hydroclimatologique. Ces éléments ont contribué à situer le système aquifère dans son contexte régional et à identifier les éléments utiles à la compréhension des problématiques abordées au cours de cette étude.

Dans ce chapitre nous utiliserons les divers types de paramètres géométriques et morphométriques ayant pour but la quantification des caractéristiques du milieu physique du sous bassin des Ksour du Nord.

La connaissance du climat consiste à analyser les différents facteurs climatiques spécialement les précipitations et les températures qui se caractérisent par l'évolution du temps d'un domaine bien déterminé.

2. Cadre géographique

Les Ksour du Nord constituent les villages de Boukaïs, L'Ahmar et Mougheul, ils s'étendent sur une superficie de 3295 Km² soit 2.04 % de la commune de Béchar (161.400 Km²) et se situent à une cinquantaine de Km au Nord du chef-lieu de wilaya de Béchar. Ils sont reliés à ce dernier par la CW3 (Fig. II.1.a et b), ce sont des oasis qui surgissent dans l'extrémité Sud-ouest de l'Atlas Saharien.

Les ksour du Nord se situent aux confins algéro-marocains, ils sont limités au Nord par Theniat Zerga et El Megsem, au Sud par le Plateau d'Om Sbaa, à l'Est par Guelb Elharkat, Djebel Horreit et le Plateau d'El Gaada enfin à l'Ouest par Gara Itima et Gara Zebouge (Fig. II.1.c). Ils se distinguent par un climat rude du à son emplacement dans l'extrême Sud-ouest du Djebel Grouz, à l'orientation des reliefs que se disposent selon une direction générale Est-Ouest. Cette disposition permet à la région de recevoir les courants humides de l'Ouest mais aussi les courants chauds sahariens arides venant du Sud-est.

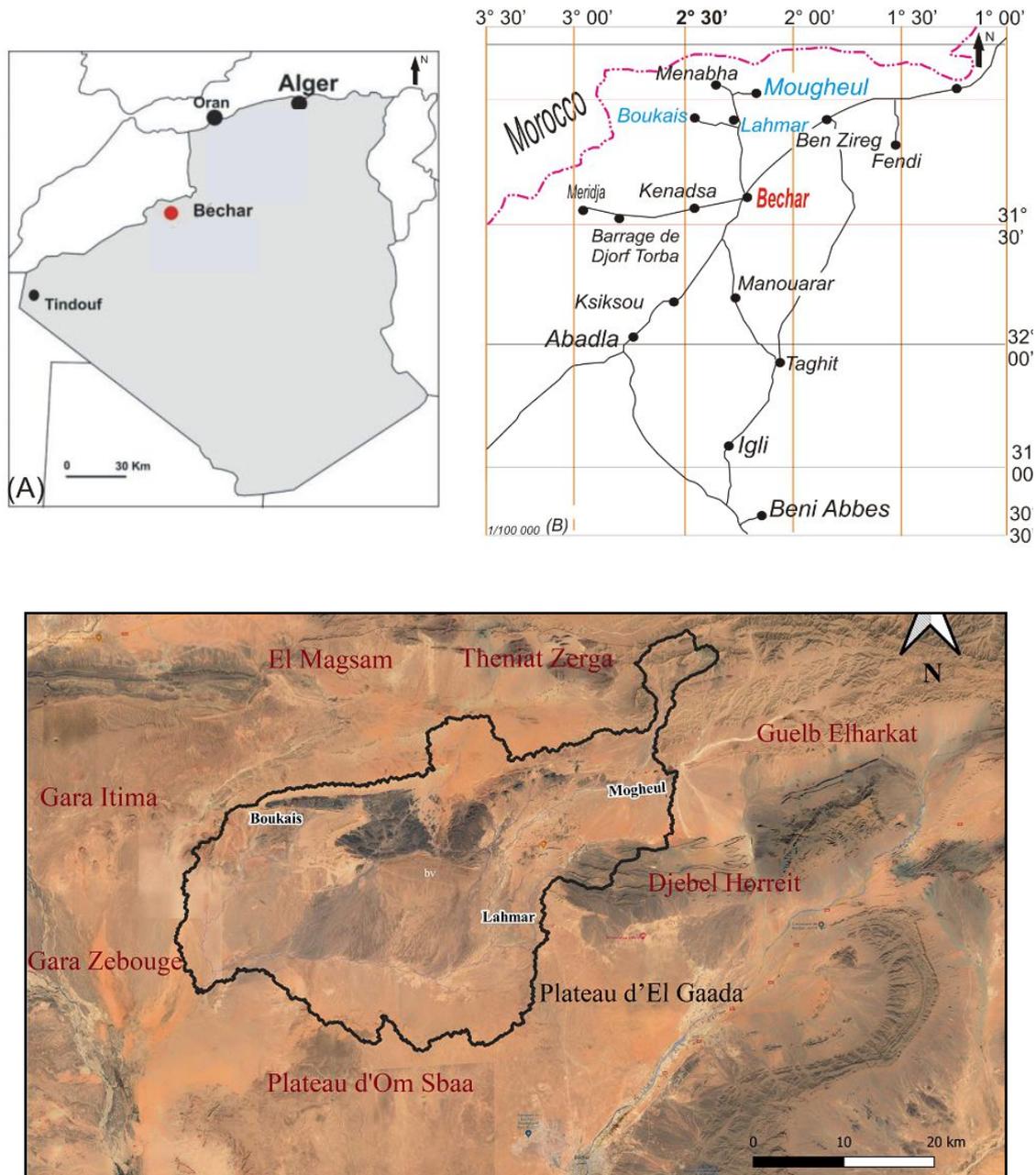


Fig. II.1: Situation géographique de la région d'étude.

3. Population et activités socioéconomiques

Les sédentaires sont regroupés en petites agglomérations (Boukais, Lahmar, et Mogheul). Leurs ressources sont uniquement agricoles, l'existence des points d'eau pérennes permet d'entretenir des jardins fertiles dont les produits sont destinés à une consommation locale. Depuis le dernier recensement de la population, La région compte 2500 habitants, présentent un taux de croissance annuel de 3% (DPAT W Bechar, 2010).

La population en 2021 est estimée selon la formule ci- après :

$$P_n = P_o (1 + a)^n \dots \dots \dots (II.1)$$

Avec :

P_o : Population de départ

P_n : Population après (n) années

n : Nombre d'années considérées

a : Taux d'accroissement naturel

$$P_{2021} = 2500 \times (1 + 0,03)^{11}$$

$$P_{2021} = 3461 \text{ habitants}$$

L'activité exercée par les habitants des Ksour du Nord se centralise essentiellement donc sur le domaine agricole.

4. Caractéristiques écologiques des ksour du Nord

La végétation de l'oasis est constituée par plusieurs strates, le palmier domine dans la strate arborescente, il est accompagné par des arbres fruitiers au niveau de la strate arbustive et par de nombreuses cultures annuelles en strate herbacée.

La palmeraie est constituée par de nombreuses variétés de palmiers dattiers dont l'importance économique varie d'une variété à une autre.

Les vergers fruitiers sont composés par une grande diversité d'espaces occupés par le citronnier et le grenadier. Les plantes annuelles sont représentées par des céréales telles l'orge et le blé; les plantes maraichères sont composées de la tomate, de la pomme de terre, des betteraves et des navets. La culture du henné (plante utilisée pour la teinture des cheveux et les mains) occupe également une place importante en raison de leurs prix de vente intéressants (Maalem et al., 2014).

5. Caractéristiques physiques de sous bassin versant des Ksour du Nord

Le sous bassin versant des ksour du Nord est une partie du bassin versant septentrional de l'Oued Guir (27000 km²) avec une superficie de 1287,67 km² et un périmètre de 343.32 km (Fig. II.2).

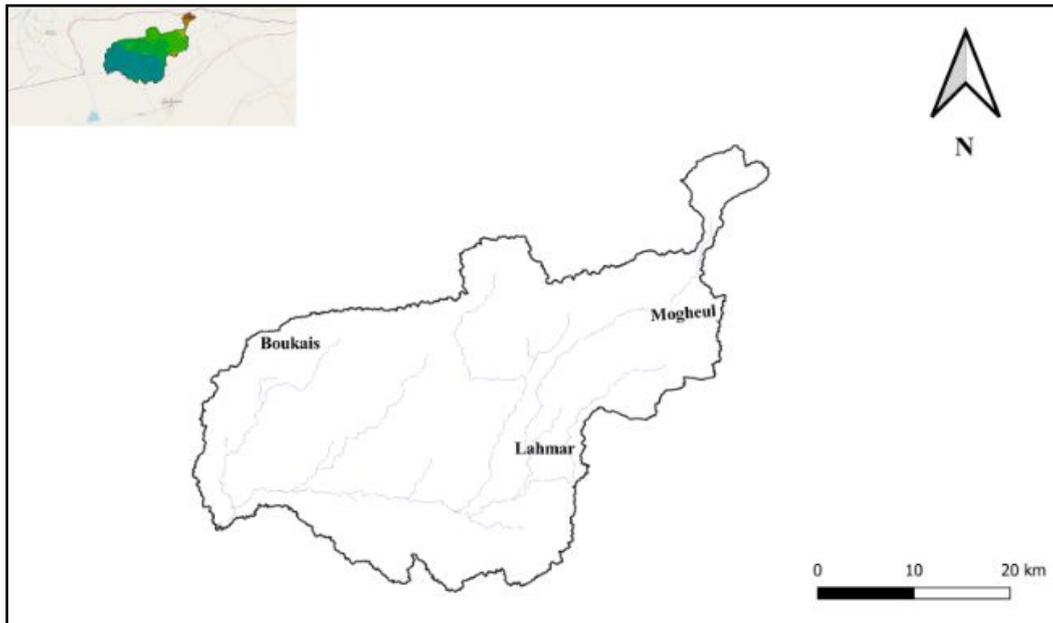


Figure II.2 : Présentation du sous bassin versant des Ksour du Nord.

5.1. Caractéristiques géométriques du bassin versant

Les paramètres géométriques d'un bassin versant peuvent être abordés à l'aide de sa surface et de son périmètre. Pour déterminer la superficie et le périmètre du bassin versant des ksour du Nord on a utilisé logiciel « QGIS 3.16 » (Tableau II.1).

5.1.1. Caractéristiques de forme

Les formes des bassins correspondants étant donc plus ou moins semblables. La forme d'un bassin versant influence fortement sur l'écoulement global et notamment le temps de réponse du bassin. Un bassin versant allongé ne réagira pas de la même façon qu'un bassin de forme ramassé même s'ils sont placés dans les mêmes conditions topographiques.

5.1.1.1. Indice de compacité de Gravelius (K_c)

Appelé aussi indice de forme, cet indice est défini comme le rapport entre le périmètre du sous bassin versant (P) et la circonférence du cercle (E) de diamètre (D) ayant la même superficie. Plus cet indice se rapproche de l'unité plus le bassin aura une forme ramassée et plus le temps de concentration des eaux sera court.

Pour la forme allongée nous avons :

$$K_c = P/E \dots \dots \dots (II.2) \text{ Avec :}$$

P: périmètre du bassin versant.

E: périmètre d'un cercle.

$$\begin{cases} E = \pi \times D \\ D = \frac{\sqrt{4S}}{\pi} \end{cases} \Rightarrow K_c = 0.28P / \sqrt{S} \quad \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

La valeur de l'indice de compacité ($K_c=2.67$) montre que le sous bassin versant des ksour a une forme allongée qui favorise l'augmentation du temps de concentration des eaux de ruissellement.

5.1.1.2. Rectangle équivalent

Il est défini comme le rectangle de longueur (L) et de largeur (l) qui à la même surface (S), le même périmètre (P), le même indice de compacité (K_c), et la même hypsométrie que le sous bassin versant étudié. Les courbes de niveau devenant des droites parallèle aux petits cotés et l'exutoire du bassin étant assimilé à l'un de ces petits cotés. On assimile le sous bassin à un rectangle qui lui est équivalent pour pouvoir comparer plusieurs bassins du point de vue de l'influence de la forme sur l'écoulement.

$$L = \frac{k_c \sqrt{S}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \quad \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

$$S = L * l \Rightarrow l = \frac{S}{L}$$

Avec :

L : Largeur du bassin en (Km).

L: longueur du bassin en (Km).

S : surface en (Km²).

Tableau II.1 : Caractéristiques de forme du sous bassin versant de ksour du Nord

sous bassin versant des ksour	Surface (km ²)	Périmètre (Km)	K_c	Rectangle équivalent	
	1287,67	343.32		Longueur (km)	Largeur (km)
				167	7.9

On peut représenter le sous bassin versant de ksour par un rectangle équivalent (Fig. II.3).

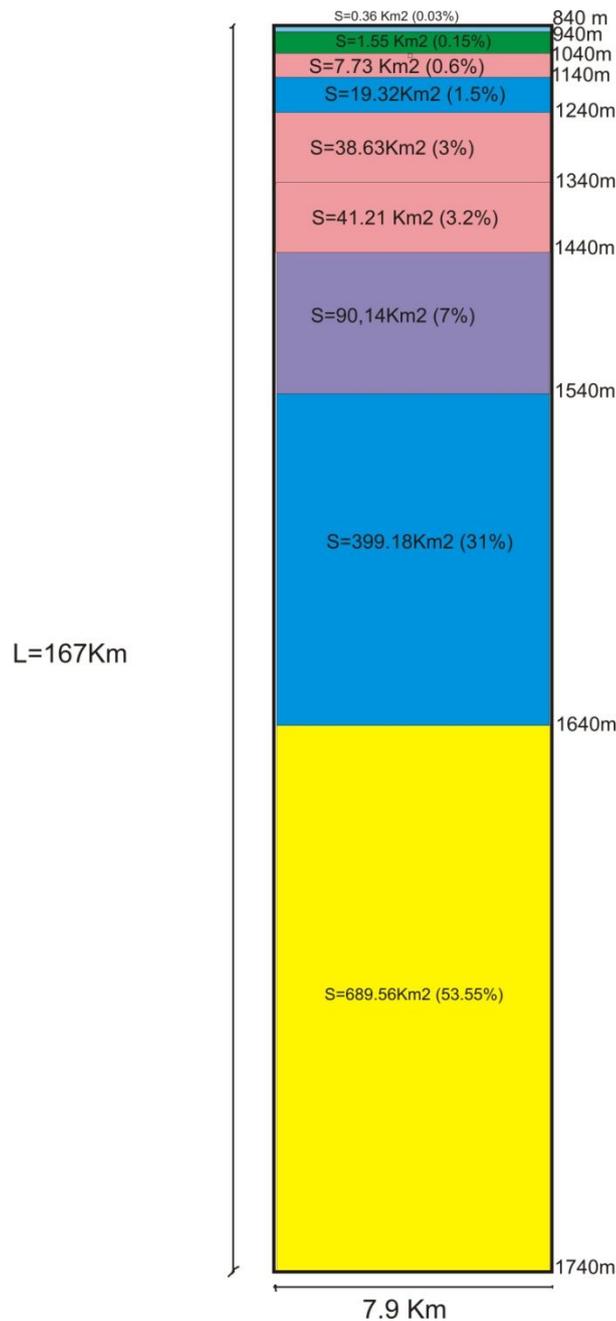


Figure II.3 : Rectangle équivalent du sous bassin versant des ksour du Nord.

5.2. Caractéristiques du relief

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un sous bassin.

5.2.1. Courbe hypsométrique

Le relief est caractérisé par sa courbe hypsométrique (figure II.4), celle-ci nous renseigne sur la répartition de la surface en fonction de la tranche d'altitude en portant en ordonnée les tranches données et en abscisse la surface du bassin pour laquelle chaque point est une cote au moins égale à cette altitude. Les surfaces en abscisses sont exprimées en pourcentage de la surface totale du bassin.

La méthode (en utilisant un planimètre) nous permet d'obtenir cette courbe. A partir de cette courbe il est possible de définir la dénivelée (D) par: $D=h_{5\%} - h_{95\%}$. La répartition altimétrique du sous bassin versant de Ksour est représentée sur le (tableau II.2.) et par la (Fig. II.4).

Tableau II.2 : Répartition hypsométrique de sous bassin versant de Ksour.

Altitudes (m)	D (m)	Surface partielle (km ²)	Surface cumulée (km ²)	Surface partielle (%)	Surface cumulée (%)
1640-1740	100	0,36	0,36	0,03	0,03
1540-1640	100	1,55	1,91	0,15	0,18
1440-1540	100	7,73	9,64	0,6	0,78
1340-1440	100	19,32	28,96	1,5	2,28
1240-1340	100	38,63	67,59	3	5,28
1140-1240	100	41,21	108,8	3,2	8,48
1040-1140	100	90,14	198,94	7	15,46
940-1040	100	399,18	598,12	31	46,48
940-840	100	689,55	1287,67	53,55	100

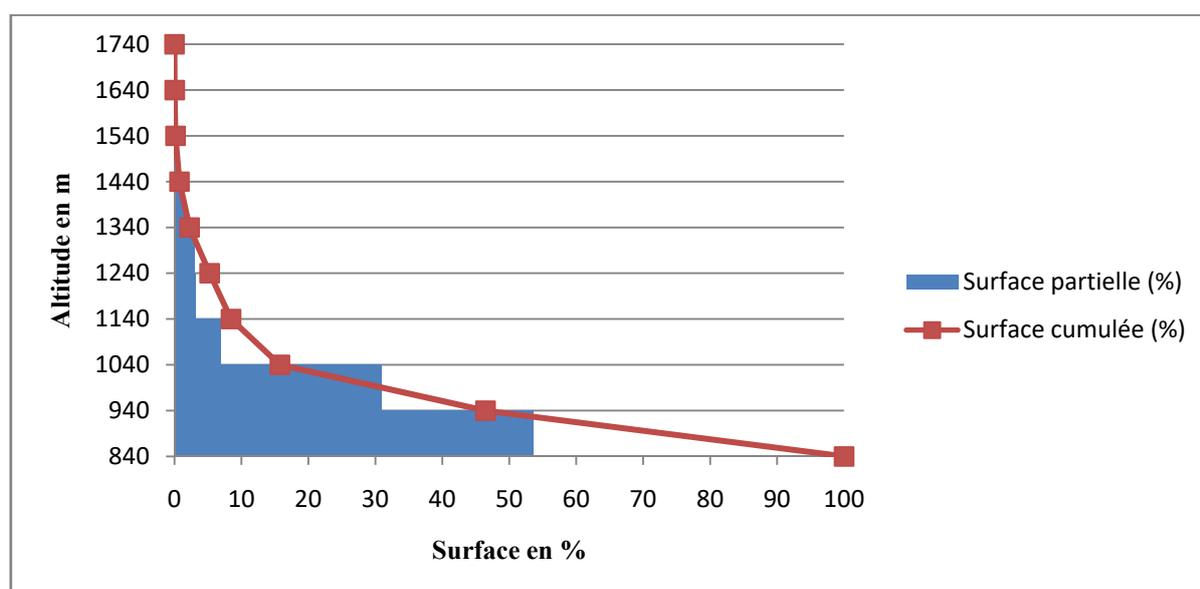


Figure II.4: La courbe hypsométrique du sous bassin versant des Ksour du Nord.

Le but recherché ici (fig. II.4) est la détermination de la classe de relief, la hauteur moyenne, la médiane et le pourcentage des aires partielles entre les différentes courbes de niveau.

5.2.2. Altitudes caractéristiques

Les altitudes caractéristiques nécessaires pour les calculs hydrologiques sont les altitudes maximale et minimale :

5.2.2.1. Altitude maximale (H_{\max}) et minimale (H_{\min})

Elles sont obtenues directement à partir de la carte topographique (tab. II.2), l'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin, celle minimale le point le plus bas qui représente généralement à l'exutoire.

Ces deux données deviennent importantes surtout lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, les précipitation et le couvert neigeux; elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

5.2.2.2. Altitude moyenne (H_{moy})

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique (tableau II.2). On peut la définir comme suit :

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{A_i \cdot h_i}{A} \dots\dots\dots(\text{II.5})$$

Avec : H_{moy} : altitude moyenne du bassin (m).

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau (km^2).

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m).

A : superficie totale du bassin versant (km^2).

5.2.2.3. Altitude médiane ($H_{50\%}$)

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique (tableau II.3). Ces altitudes caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau II.3: Altitudes caractéristiques du sous bassin versant de ksour

Sous bassin versant de Ksour	Altitudes caractéristiques en (m)						
	H _{max}	H _{min}	D = H _{max} - H _{min}	H _{moy}	H _{50%}	H _{5%}	H _{95%}
	1640	840	800	968,8	940	1240	842

5.2.3. Indices de pentes

L'objet de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant afin de permettre sa comparaison et sa classification. Les indices de pentes sont déterminés à partir de l'étude hypsométrique du bassin versant.

5.2.3.1. Indice de pente globale (I_g)

L'objet de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant afin de permettre sa comparaison et sa classification. Les indices de pentes sont déterminés à partir de l'étude hypsométrique du bassin versant.

$$I_g = \frac{D}{L} \text{ (m/km)} \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

Avec : D : étant la dénivelée définie sur la courbe hypsométrique ou même directement à l'œil sur la carte topographique, D=h_{5%}-h_{95%}. L: étant la longueur du rectangle équivalent (km).
Après le calcul on trouve : I_g= 2.38 m/km.

Tableau. II.4: Classification du relief selon I_g (O.R.S.T.O.M)

R1	Relief très faible	I _g <0.002 m/Km
R2	Relief faible	0.002<I _g <0.005
R3	Relief assez faible	0.005<I _g <0.01
R4	Relief modéré	0.01<I _g <0.02
R5	Relief assez fort	0.02<I _g <0.05
R6	Relief fort	0.05<I _g <0.5
R7	Relief très fort	I_g>0.5m/Km

5.2.3.2. La pente moyenne du cours d'eau principal (P_{moy})

La pente moyenne d'un cours d'eau principal détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin, donc le temps de concentration; cette variable influence donc le débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du

cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P_{\text{moy}} = \frac{\Delta H_{\text{max}}}{L} \dots\dots\dots(\text{II.7})$$

Avec : P_{moy} : pente moyenne du cours d'eau principale (m/km).

ΔH_{max} : Dénivellation maximale de la rivière (m) (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire).

L : longueur du cours d'eau principal (km).

Pour le sous bassin versant de Ksour, la longueur du cours d'eau principal est égale de 43 Km. $\Delta H_{\text{max}} = 1100 - 840 = 1016\text{m}$

Tableau. II.5: Indices de pentes et classification du relief du sous bassin versant des Ksour.

Bassin versant de ksour	Superficie (km ²)	P moy(m\km)	Ig (m\km)	Classe de relief selon Ig
	1287,67	23.62	2.38	Relief très fort

5.2.4. Temps de concentration (TC)

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire, bien que ce paramètre intervienne pour l'étude des crues. Pour son calcul, nous faisons appel à la formule de Formule de Giandotti (cas des bassins versants ruraux ou naturels) :

$$t_c = 600 \frac{0,04 \cdot \sqrt{A} + 0,0015 \cdot L}{0,8 \cdot \sqrt{I \cdot L}} \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

Avec : T_c : temps de concentration (min).

A : superficie du bassin (en hectares).

I : pente moyenne du bassin versant en (%).

L : Longueur du plus long parcours de l'eau (m).

Le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la surface mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le relief. Le temps de concentration égale 18.6 heures sur le sous bassin versant de ksour.

5.2.6. Réseau hydrographique

Le grand cours d'eau de la région prend sa source au Sud de la chaîne de Djebel Grouz et ses affluents (Fig. II.5), montre que la majorité des cours d'eau de sous bassin versant sont d'ordre 1.

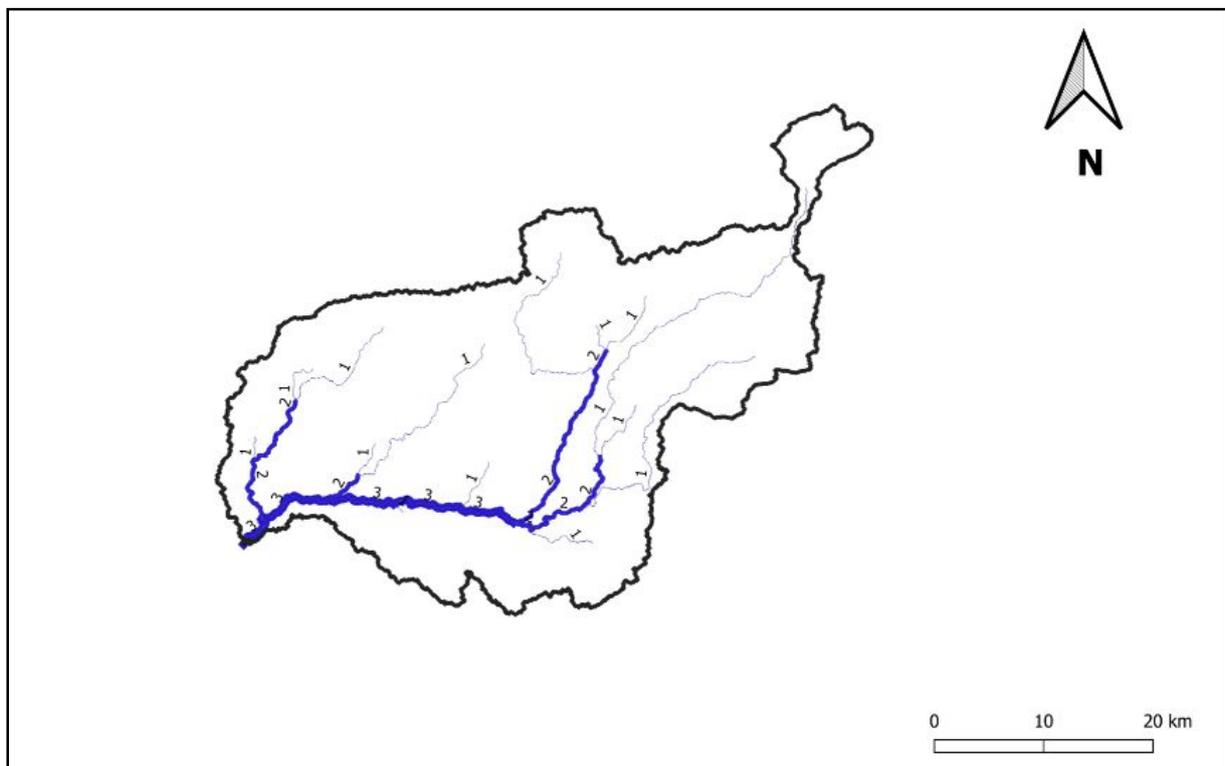


Figure II.5: Structure du réseau hydrographique et l'ordre des cours d'eau du sous bassin versant de la région d'étude

6. Cadre hydroclimatologique

Les conditions climatiques du bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau. Le bassin versant des ksour présente une faible couverture en station climatique soit une station climatique par bassin (Tableau II.6).

Tableau II.6: Caractéristiques de station climatique du bassin versant de la région d'étude (station de Mougheul).

Station	Latitudes	Longitudes	Altitudes en m	Série	Paramètre relevé
Mougheul	32°01'17''N	2°13'09''W	1045	2009-2019	Pluviométrie Température

6.1. Pluviométrie

Nous engloberons, sous le terme de « précipitation » toutes les eaux météoriques qui tombent à la surface de la terre tant sous forme liquide que sous forme solide. Ce paramètre météorologique constitue la composante fondamentale de l'hydroclimatologie. La connaissance de cet apport d'eau au sol est essentielle pour estimer les réserves en eau du sol et la recharge des nappes souterraines.

6.1.1. Précipitations mensuelles et saisonnières

La variation mensuelle et saisonnière des précipitations s'avère essentielle voire déterminante sur l'écoulement saisonnier et sur le comportement hydrologique.

Tableau II.7: Précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station du sous bassin versant de Ksour du Nord (Source ONM, 2019).

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
2009-2010	81,8	140,4	16,1	6	23,8	16,1	67,9	0,4	0	6,2	0	1
2010-2011	1	3,9	0	2,6	0	0	10,2	3,7	67,5	21,8	0	0
2011-2012	36,4	48,1	5,36	2,96	1,36	12,46	26,26	2	22,96	9,33	4,33	11,8
2012-2013	8	21	13	14	13	9	18	14	3	2	10	5
2013-2014	25	13	10,2	7	20	11,4	30	5	0	1	9	0
2014-2015	13	8	6	20	22	15	1	2	7	0	1	0
2015-2016	28	5	17	16	1	8	40	5,4	11	2,4	3	2
2016-2017	30	20	2	8	13	24	6,5	7	9,5	6,2	0	0
2017-2018	13	20	14	12	7	15	9	2	0	5	0	1
2018-2019	22	30	12	1,211	20	11,4	30	14	9,5	1	0	0

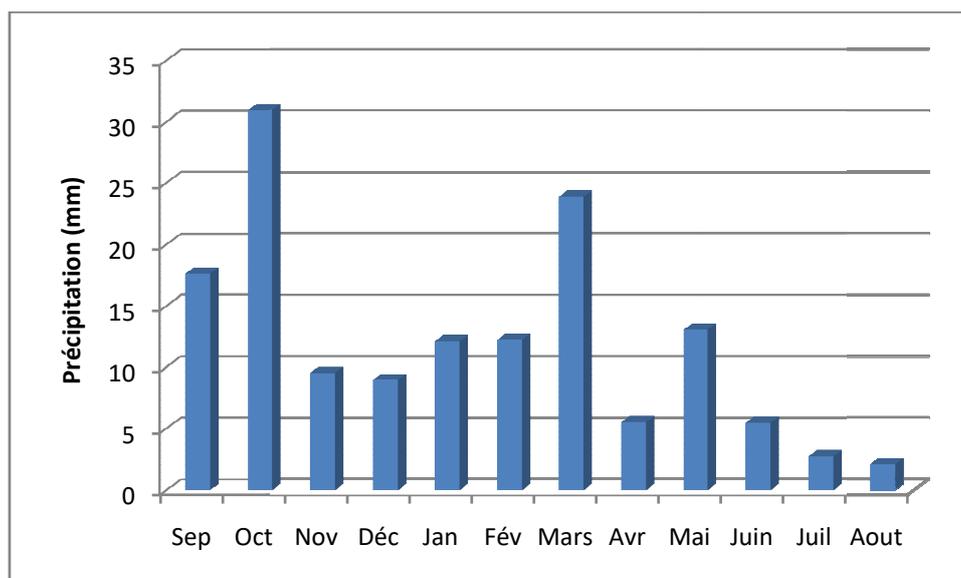


Figure II.6: Précipitations moyennes mensuelles interannuelles (2009/2019) en mm à la station du sous bassin de Mougheul.

La figure (II. 6) montre que les valeurs de précipitation enregistrées dans la station de Mougheul avoisinent un maximum de 30.94 mm au mois d'Octobre et un minimum de 2 mm au mois d'Aout.

6.2. Température

L'étude hydroclimatique d'un bassin versant devrait comporter l'analyse de son bilan thermique qui constitue un facteur climatique très important en relation avec le phénomène de l'évapotranspiration qui conditionne l'estimation du déficit d'écoulement. Pour étudier la température dans le sous bassin versant des ksour on utilisera la série de (2009 - 2019) concernant la station de Mougheul.

Tableau. II.8: Températures minimales, maximales et moyennes mensuelles interannuelles de la station de Mougheul (2009-2019).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Maximales	31	26,5	21,5	16	13,9	11,8	22,3	26,9	30,5	35	42	39,8
Minimales	12	11,5	6,9	4,5	2,89	4	10	9,68	13,8	17,5	26	24,9
Moyennes	22,5	19,8	14,8	9,8	8,98	9,8	15,8	18,5	21,8	25,9	34	31,9

(ONM Béchar, 2019)

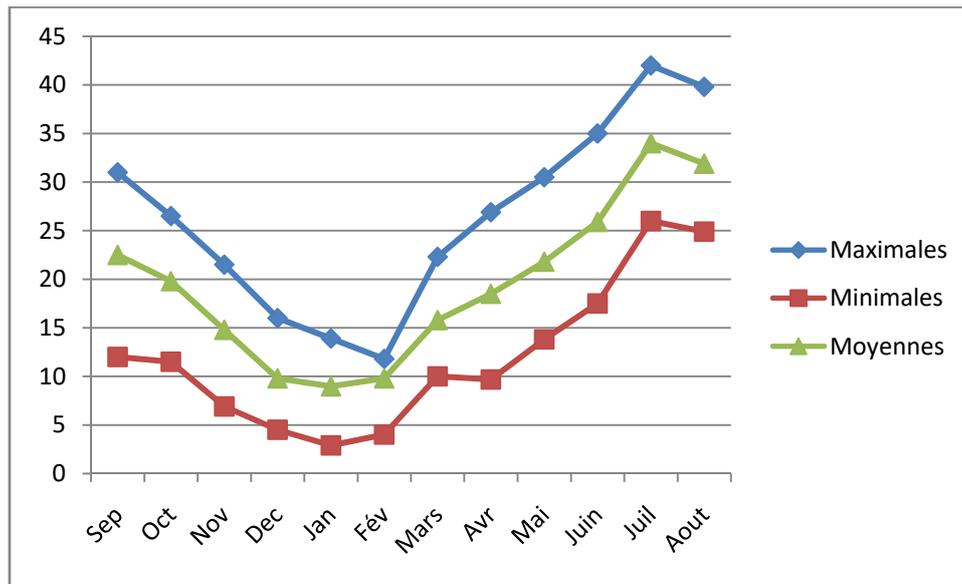


Figure II.7: Courbe des températures minimales, maximales et moyennes interannuelles du bassin des ksour (Station de Mougheul, 2009-2019).

A partir de la (Figure II.7), on remarque que :

- Les températures maximales présentent un minimum en Février ($11,8^{\circ}\text{C}$) et un maximum en Juillet (42°C).
- Les températures minimales présentent un minimum en Janvier (4°C) et un maximum en Juillet (26°C).
- Les températures moyennes présentent un minimum en Février ($9,8^{\circ}\text{C}$) et un maximum en Juillet (34°C).

6.3. Relation Température-Précipitation

La détermination des périodes sèches et humides est très importantes à cause de son influence sur les conditions d'alimentation de l'aquifère. Cette relation est déterminée par le diagramme pluvial- thermique de Gaussen et Bagnouls

6.3.1. Diagramme pluviaux - thermique de Gaussen et Bagnouls

Pour limiter les périodes sèches et humides, Gaussen et Bagnouls utilisent la température et les précipitations sur une échelle double. Ils ont défini l'année sèche par la comparaison entre le total des précipitations de cette année en mm et le double de sa température moyenne en $^{\circ}\text{C}$.

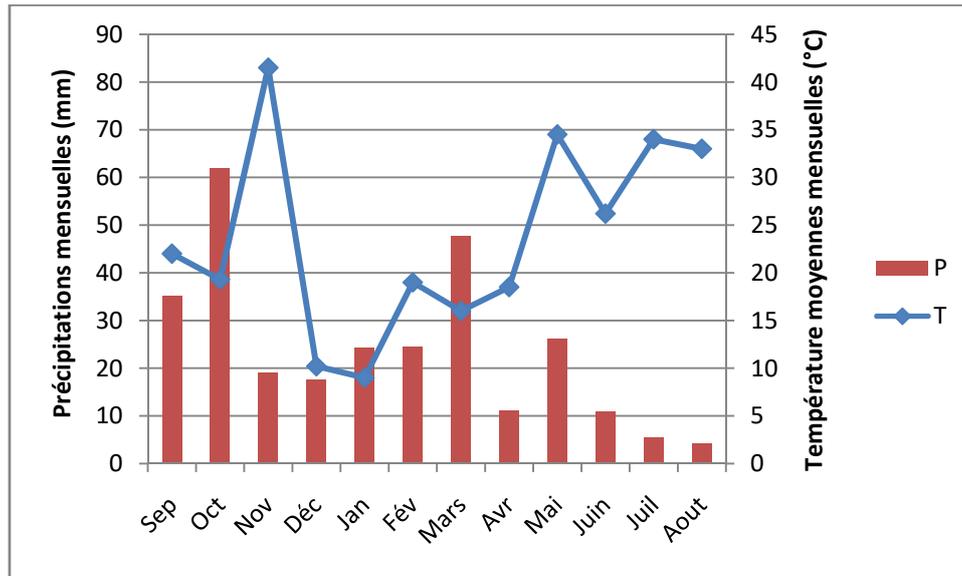


Figure II.8: Diagramme pluviométrique - thermique de Gaussen et Bagnouls du sous bassin versant de Mougheul (2009-2019)

Le diagramme de Gaussen et Bagnouls (fig. II.8) confirme que la région d'étude est caractérisée par une période sèche durant la période allant du mois d'Avril au mois de Septembre et une période humide du mois Octobre au mois Mars.

6.3.2. Indices climatiques

6.3.2.1. Indice climatique de De Martonne

En 1925, un indice d'aridité a été défini par le géographe **De Martonne**, il se base sur les températures et les précipitations selon la relation suivante:

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (II.9)$$

Avec :

P : la précipitation totale annuelle en mm.

T : la température moyenne annuelle en °C.

- On applique cette formule pour le calcul de l'indice d'aridité à ce sous bassin on trouve :

$$I = \frac{144.13}{23.6+10} = 4.29 \quad (II.10)$$

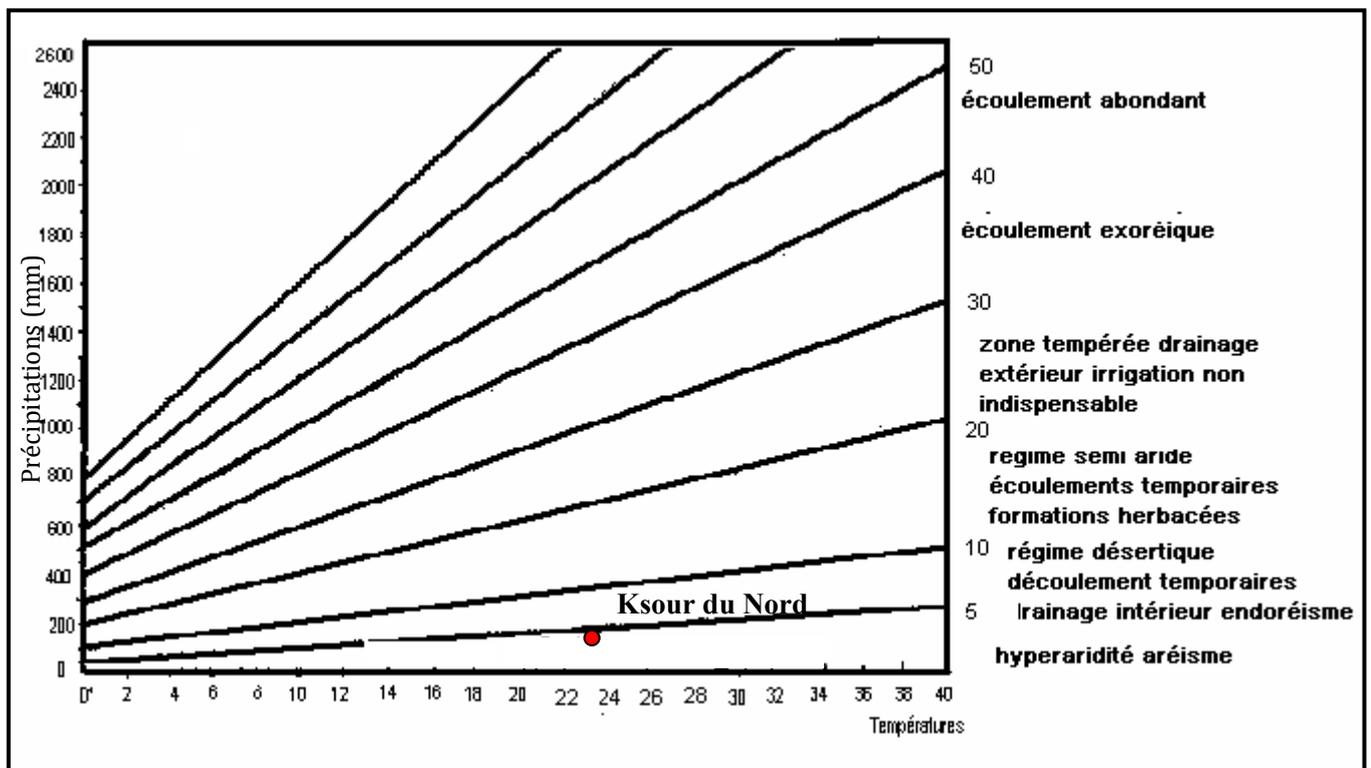


Figure II.9: Abaque de De Martonne

- La figure II.9 montre que la région d'étude est située dans l'intervalle des régions à climat hyperaride aréisme.

6.3.2.2. Climagramme de L. Emberger

En 1932, L. Emberger a proposé une formule permettant le calcul de l'indice d'aridité annuelle en tenant compte des précipitations et de la température (Fig. II.10), cette formule s'écrit :

$$Q_2 = \frac{2000.P}{M^2 - m^2} \quad (II.11)$$

Avec :

Q_2 : le quotient pluviométrique d'Emberger.

P: la précipitation moyenne interannuelle en (mm).

M : la moyenne des maxima du mois le plus chaud en degré Kelvin (K°).

m : la moyenne des minima du mois le plus froid en degré Kelvin (K°).

Pour le sous bassin versant de la région d'étude, la température moyenne des minima du mois le plus froid est de 4 C°, la moyenne des maxima du mois le plus chaud est de 42C°, D'ou les coordonnées sur l'abaque (4, 12.81).

$$P = 144.13; M = 42 + 273.15 = 315,15 \text{ K}; m = 4 + 273.15 = 277.15 \text{ K}; Q_2 = 12.81$$

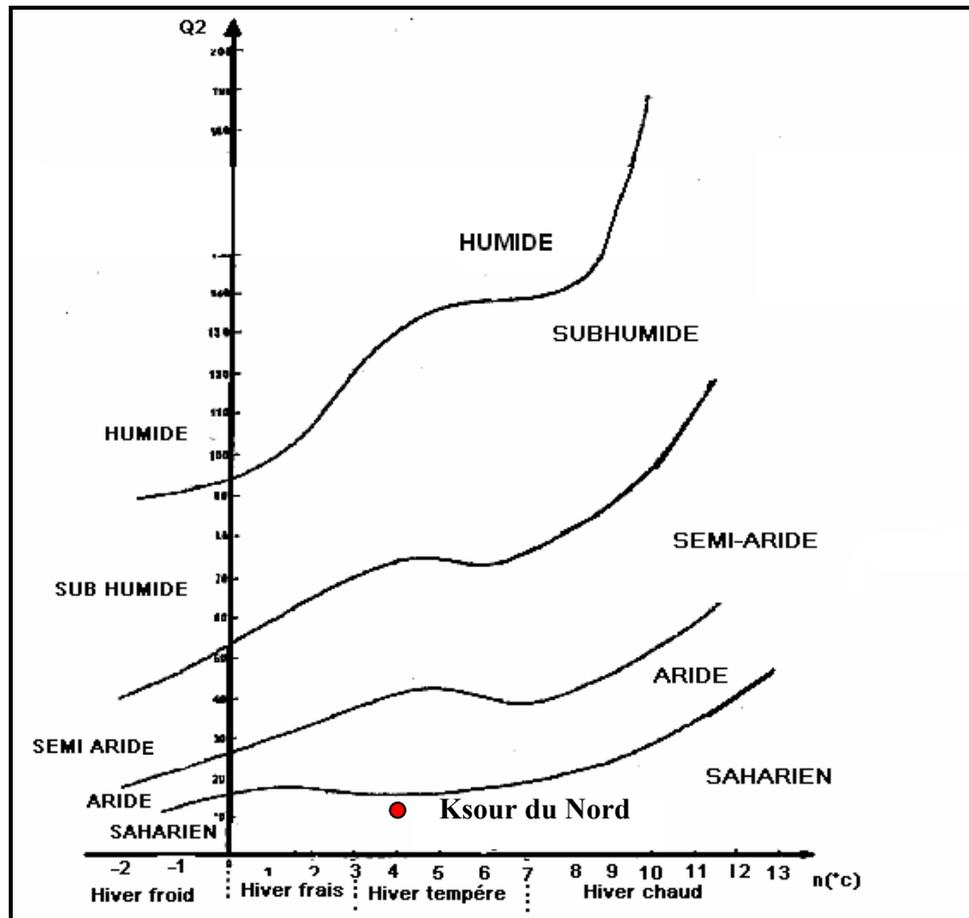


Figure II.10: Climagramme de L. Emberger

- Le sous bassin versant de Ksour du Nord est caractérisé par un climat saharien défini bien dans le Climagramme de L. Emberger (fig. II.10).

6.4. Humidité relative

L'humidité relative de l'air (ou degré d'hygrométrie) correspond au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante (ou tension de vapeur) à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions. Ce rapport changera si on change la température ou la pression.

Tableau II.9: Les humidités relatives moyennes mensuelles interannuelles en % du sous bassin de Ksour du Nord série (2009-2019).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Moy Ann.
Hr (%)	44	53	67.2	72	74	66.2	52	48	42	33	24.3	29	50.39

(ONM, Béchar, 2019)

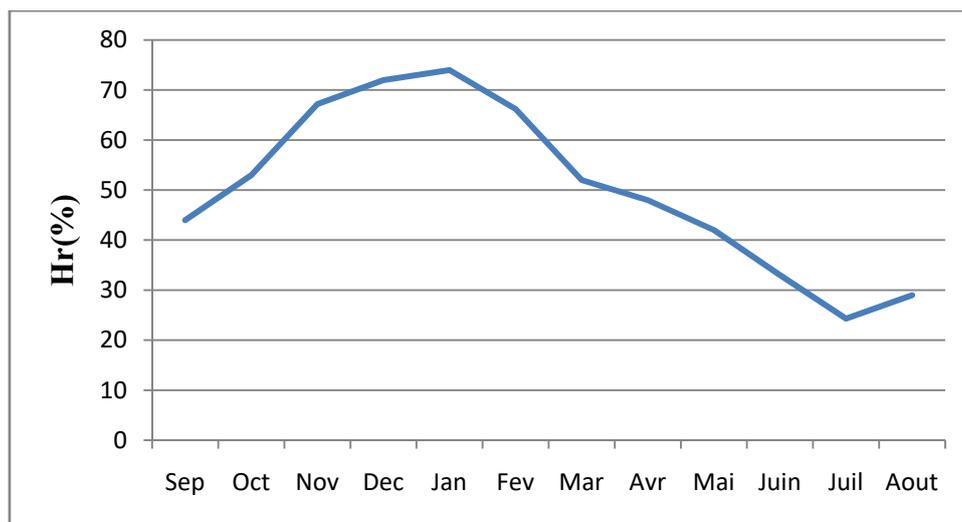


Figure II.11: Courbe des humidités relatives moyennes mensuelles interannuelles en % du sous bassin de de Ksour du Nord série (2009-2019).

D'après la figure II.11, on remarque que l'humidité relative atteint sa valeur maximale au mois de Janvier avec une moyenne de 74% et une valeur minimale de 24.3% au mois de Juillet pour le sous bassin versant des Ksour du Nord.

6.5. Evapotranspiration

Elle est la combinaison de l'évaporation physique et de la transpiration biologique. L'évaporation intervient dans l'atmosphère au cours des chutes de pluies, à la surface des lacs et des cours d'eau et sur le sol nu. La transpiration est le fait de la couverture végétale.

L'évapotranspiration a une grande importance pour les études hydrologiques car elle participe au calcul du bilan hydrologique et des réserves souterraines. Ce paramètre peut être mesuré directement sur le terrain par des appareils « évaporimètre et bac d'évaporation. » on l'estime à l'aide des formules empiriques comme celle de Turc et de Thornthwaite.

6.5.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'ETP peut se définir comme étant la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée dans des conditions climatiques données par une surface d'eau libre ou un couvert végétal.

6.5.1.1. Formule de Turc

La formule de Turc ne nécessite que la connaissance des températures de l'air et de la radiation globale ou la durée d'insolation. Cette formule est la suivante :

$$ETP = 0.40(Ig + 50) \frac{T}{T + 15} \quad (II.12)$$

Avec:

ETP : évapotranspiration potentielle mm/mois.

T : moyenne mensuelle de température en °C.

Ig : moyenne mensuelle de la radiation solaire globale exprimée en (cal/cm²/j).

K : un coefficient égal à l'unité si l'humidité relative hr est supérieure à 50%, Si non :

$$K = 1 + \frac{50 - hr}{70} \quad (II.13)$$

Si la radiation globale Ig n'est pas mesurée, on pourra l'évaluer à partir de la durée d'insolation H par la formule suivant :

$$Ig = Iga \cdot \left(0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right) \quad (II.14)$$

Avec :

Iga : rayonnement globale à la limite de l'atmosphère pour le mois considère, qui dépend de latitude, donné par l'ONM Béchar, 2019.

H : la durée moyenne d'insolation en heure.

h : duré astronomique du jour en heure, dépend de latitude.

Les valeurs de ETP trouvées par cette formule devraient être corrigées selon un facteur de corrections K : $ETP_{\text{corrigées}} = ETP.K$

- Les résultats de calcul d'ETP mensuelle sont représentées dans le tableau II.10 suivant :

Tableau II.10: Evapotranspiration potentiel moyennes mensuelles interannuelles selon Turc du sous bassin versant du Ksour du Nord, série (2009-2019).

Mois	T(°C)	Hr (%)	Iga	h	H	Ig	K	ETP corrigées (mm/mois)
Sep	22,5	17,64	6130	9,2	12,2	3969,43	1,09	1047,35
Oct	19,8	30,94	5130	9,3	11,3	3541,06	1,00	817,28
Nov	14,8	9,566	1050	8,6	10,4	727,33	1,00	154,42
Dec	9,8	8,85	1860	8,2	10	1280,42	1,00	210,29
Jan	8,98	12,116	4020	8,2	10,2	2727,29	1,00	416,02
Fév	9,8	12,23	4760	7,8	10,9	2968,67	1,00	477,14
Mar	15,8	23,886	6110	9,5	11,8	4149,62	1,00	861,74
Avr	18,5	5,55	6830	10	12,8	4537,68	1,03	1042,35
Mai	21,8	13,046	7230	10,8	13,6	4861,11	1,11	1296,72
Juin	25,9	5,493	7850	11,4	14	5376,13	1,24	1708,24
Juil	34	2,733	7440	11,2	13,8	5082,92	1,37	1947,70
Aout	31,9	2,08	6810	10.30	13.10	4545.55	1,30	1625,39
TOT								11604,63

6.5.2. L'évapotranspiration réelle (ETR) ou le déficit d'écoulement (De)

L'évapotranspiration réelle représente la perte d'eau qui se manifeste dans les conditions réelles dans un site donné, en fonction de la demande climatique de l'air et de la disponibilité en eau dans le sol. Pour l'estimation de l'ETR, il existe plusieurs formules empiriques qui permettent d'obtenir les valeurs approximatives de ce paramètre. Parmi la gamme des formules, celle de Turc et de Coutagne.

6.5.2.1. Formule de Turc

La formule de TURC est applicable à tous les climats, elle est en fonction des précipitations et de la température moyenne annuelle.

$$ETR = P / \left[\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (II.15)$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (II.16)$$

Avec :

T : température moyenne annuelle °C.

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

- Les résultats de calcul de l'ETR représenté dans le tableau II. 11.

Tableau II.11: Valeurs de l'ETR selon Turc (2009-2019).

Sous bassin versant de Ksour du Nord	T (°C)	P (mm)	L	ETR (mm)
	23.6	144,13	1547.21	151.19

6.5.2.2. Formule de Coutagne

$$ETR = P - \lambda p^2 \quad (II.17)$$

Avec :

λ : désigne un facteur dépendant de la température moyenne annuelle.

P en (m).

- La formule de Coutagne n'est valable que si la quantité des précipitations répond à la condition suivante : $1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$

$$\lambda = 1 / (0.84 + 0.14T) \quad (II.18)$$

Avec :

T : température moyenne annuelle C°.

Tableau II.12: Valeurs de l'ETR mensuelle selon Coutagne.

Sous bassin versant des Ksour du Nord	λ	Condition ($1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$)	ETR(m)
	0.24	Non vérifiée	-

- On note que cette formule n'est pas utilisable lorsque la valeur de précipitation n'appartienne pas à l'intervalle] $1/8 \lambda$, $1/2 \lambda$ [, la valeur de l'ETR ici ne peut être calculée.

6.5.2.3. Abaque de Verdeuil

Pour les régions à climats subarides et semi-arides, on dispose d'un abaque bi-logarithmique établie par (Verdeuil, 1988), dans lequel on tient compte de la température et des précipitations. Le but de cet abaque (fig. II.12) est la détermination de l'ETR ou le déficit d'écoulement (De).

- Après la projection des précipitations annuelles (144,13 mm) de la station de la région d'étude on trouve que l'ETR=142mm.

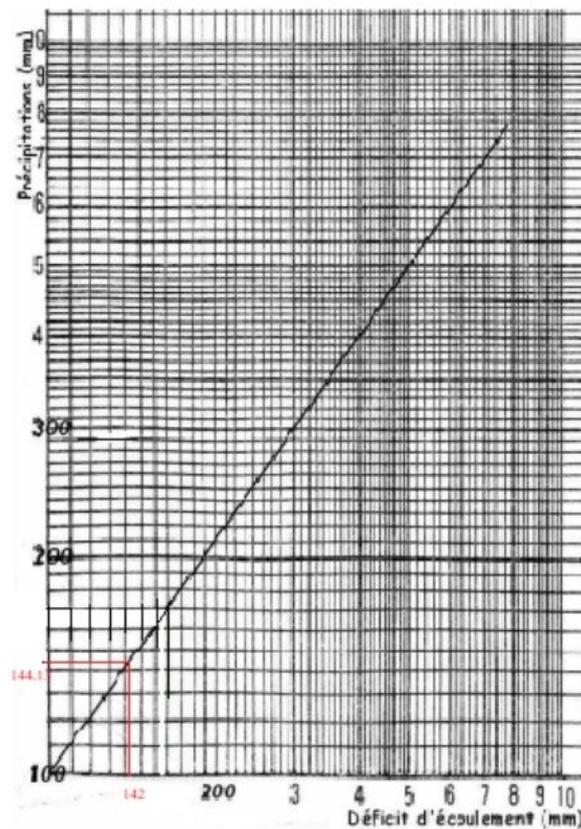


Figure II.12: Abaque de Verdeuil (calcul de l'ETR)

6.6. Calcul du bilan hydrologique

Le bilan hydrologique est estimé par une formule très simple qui permet d'évaluer le ruissellement et l'infiltration :

$$P = ETR + R + I \pm SW \quad (II.19)$$

Avec:

P : précipitation en (mm).

ETR : évapotranspiration réelle en (mm).

I : infiltration en (mm)

R : ruissellement (mm)

SW : variation des réserves en mm (cette grandeur est supposée négligeable).

6.6.1. Calcul du ruissellement théorique de surface

C'est la quantité d'eau qui, au cours d'une précipitation échappe à l'infiltration et à l'évapotranspiration. Les hydrogéologues considèrent que le ruissellement est une perte pour les réserves en eaux souterraines. Il est difficile de mesurer ce paramètre directement, mais on peut l'estimer avec la formule de Tixeront – Berkaloff :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2} \quad (II.20)$$

Avec :

R : ruissellement de surface en (mm).

P : précipitation annuelle en (mm).

ETP : évapotranspiration potentiel annuel en (mm).

6.6.2. Calcul de l'infiltration

C'est la quantité d'eau qui pénètre dans le sol et le sous-sol et alimente les eaux souterraines.

A partir de la formule du bilan hydrologique on calcule l'infiltration de la manière suivante :

$$P = ETR + R + I \Rightarrow I = P - ETR - R \quad (II.21)$$

- Le tableau suivant Tab. II.13 résume les résultats :

Tableau II.13 : Résultats des paramètres du bilan hydrologique série (2009-2019)

Sous bassin versant de Ksour du Nord	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
	144.13	11604,63	142	1	-

- Le bilan hydrologique du pas interannuel de dix ans calculé est déficitaire. La recharge des nappes souterraines s'effectue par infiltrations aux affleurements suite aux intenses crues.

7. Conclusion

Le bassin des ksour du Nord fait partie du grand bassin versant du Guir, avec une superficie de 1287.67 Km² et un périmètre d'environ 343.32 Km avec une altitude moyenne de 968,8m. Le relief est très fort, d'après la classification de l'ORSTOM, la pente assez forte du lit de l'Oued confère aux écoulements de surface un régime hydrologique particulier aux zones arides.

La région d'étude se caractérise par une faible couverture climatique (la pluviométrie, l'hydrométrie et thermométrie), la hauteur moyenne annuelle de précipitation est de l'ordre de 144.13 mm, avec une température moyenne de 23.6°C. La région d'étude se caractérise par un climat hyperaride aréisme selon De Martonne et Saharien d'après L. Emberger, confirmé par le diagramme de GAUSSEN et BAGNOULS (Ombro-thermique) et la longue période de sécheresse.

Les différentes méthodes de l'ETP et l'ETR suggèrent l'absence de tout écoulement superficiel dans le sous bassin versant de la région d'étude, le bilan hydrologique est déficitaire selon un pas interannuel (10 ans).

Une amélioration dans le réseau de couverture de station climatique permettrait une meilleure étude climatique.

Chapitre III

La géologie de la zone d'étude

1. Introduction

« L'existence des eaux souterraines est conditionnée par un critère géologique, qui comprend des conditions lithologiques et structurales, assurant un rôle décisif dans l'existence ou non de l'aquifère. Le second critère est d'ordre climatique ou paléo climatique local ou régional, qui détermine les conditions de recharge des nappes souterraines » (Castany, 1980).

La géologie permet aussi de quantifier les réservoirs aquifères et de connaître leurs types de nappes, ainsi que leurs conditions aux limites selon la distribution des faciès géologiques.

De ce qui découle, tout raisonnement hydrogéologique doit s'asseoir sur une meilleure compréhension de la géologie du site en question. Ce chapitre envisage de donner une image plus ou moins détaillée de la géologie de la région d'étude à différente échelle.

2. Aperçu géologique régional

2.1. Lithostratigraphie régionale

Beaucoup de travaux géologiques ont été consacrés à cette région de Béchar, on notera: **Menchikof, 1936, 1952; Deleau, 1951; Perrondon, 1952 ;schoeller, 1959 ; Meinder, 1955 ; Pareyn, 1961, 1975; Chavaillon, 1964 ; Weyant, 1975; Conrad, 1970 ; Roche, 1973 ; Guerre, 1974, IDROTECNECO, 1979 ; Mekkaoui, 2000** auxquels s'ajoutent les travaux de recherche sur les combustibles solides et liquides (pétrole & charbon) menés par des compagnies étrangères et nationales (les Houillères Sud Oranais, le BRMA, la SN Répal, la SONAREM et la SONATRACH, **Kabour, 2017**).

La carte géologique (fig. III.1) est ici utilisée pour l'étude du contexte géologique régional qui admet les limites conventionnelles suivantes : la région est limitée au Nord et à l'Ouest par le royaume du Maroc, à l'Est par la région de Mzarif et la haute Zouzfana, au sud par la région d'Abadla.

Cette région comprend trois domaines structuraux distincts :

- Le Djebel Grouz et ses équivalents appartenant au domaine de l'Atlas Saharien.

- Le bassin crétacé de Béchar qui se prolonge dans le territoire marocain pour former le bassin crétacé de Béchar-Errachidia, cette entité correspond à la zone de transition entre le domaine saharien et atlasique.
- Le bord septentrional de la plate-forme saharienne qui comprend le massif de l'Antar et Horreït, le Djebel Béchar et Chabket Mennouna.

2.1.1. Le Précambrien

Le principal affleurement est connu au niveau de Boukaïs, situé à environ **40km** au Nord de Béchar. Cet affleurement se présente comme un ancien massif apparaissant en boutonnière anticlinale, entouré au Nord, au Sud et à l'Ouest par des formations secondaires et à l'Est par une série assez complète du Paléozoïque.

Le massif lui-même est constitué de pelites et de Grés surmontés par des coulées basaltiques et andésitiques et des tufs volcaniques avec une épaisseur qui dépasse **1500m** (Meindre, 1955).

2.1.2. Le Paléozoïque

Il est bien répandu en affleurement, il comprend :

2.1.2.1. Le Cambro-Ordovicien (1200m à 4000m)

Il affleure largement dans le site de Talzaza (entre le village de Lahmar et celui de Boukaïs), dans ElMenabha et aux environs de Mougheul.

D'autres affleurements sont connus au niveau de Megsem el Aris et au cœur de l'anticlinal de Ben Zireg (Menchikoff, 1936 et Pareyn, 1961). Il s'agit d'une puissante formation de grés et de quartzites.

2.1.2.2. Le Silurien (200m à 400m)

Il se caractérise par des affleurements restreints vu sa nature argileuse. Il apparaît au pied du revers méridional du Djebel Grouz, au niveau de Theniat Ghannama et au cœur de la structure de Ben Zireg. Il s'agit de schistes noirs (Perrodon, 1951).

2.1.2.3. Le Dévonien (700m à 2500m)

Les formations du Dévonien sont plus amples en affleurement, ils sont identifiés au pied de la falaise de Koudiat El Haïdoura (Grouz), au niveau de Talzaza, au Maïder El Mehadjib, à Soltane El Betoum et à Ben Zireg. Il est argilo- carbonaté à la base, passant à des argiles à

son milieu et vers son sommet, les calcaires prédominent (**Menchikoff, 1936 et Perrodon, 1951**).

2.1.2.4. Le Carbonifère

Les formations du Carbonifère sont les plus répandues en affleurement et les mieux étudiés (**Deleau, 1952 et Pareyn, 1961**). Ils constituent les principaux reliefs de la région (Djebel Antar, Djebel Horreït, Djebel Béchar et Chabket Mennouna), elles constituent aussi le soubassement de la ville de Béchar. Cet étage comprend :

- Le Tournaisien (200m à 700m)

Il n'a pas été identifié avec certitude, il semble qu'il ne soit pas déposé, tout au moins au Nord de l'Antar car le Viséen supérieur repose directement sur le Faménien terminal de Theniat El Haïdoura et à Soltane El Betoum (**Menchikoff, 1936**).

- Le Viséen (300m à 1280m)

Il est connu au niveau de la structure de Ben Zireg, au Djebel Béchar et dans les massifs septentrionaux (Djebel Horreït et Djebel Antar); il est composé par des calcaires et des schistes. Au Nord de Béchar, le Carbonifère est représenté par deux faciès qui s'interpénètrent ou se superposent : l'un schisteux, l'autre récifal (**Menchikoff, 1936**). L'endroit le plus spectaculaire est entre la fosse de Ben Zireg où se sont déposés les dépôts de flysch, le Wild flysch qui passent latéralement à des constructions récifales dans le massif de L'Antar (**Pareyn, 1961**).

- Le Namurien (740m à 810m)

Il affleure au pied du Djebel El Asfer, généralement il est représenté par des alternances de calcaire, des marnes et quelques niveaux de grès dans la plaine de Guelb El Harkat et au Sud de Hassi Diab. Il est composé de marnes brunes entrecoupées de calcaires noirs et des phtanites, mais au niveau de Djebel Béchar et à Chabket Mennouna, le Namurien comprend des assises calcaréo-dolomitiques.

- Le Westphalien (700m à 1600m)

On connaît le Westphalien entre Djebel Horreït et Kenadsa. Il est composé de marnes verdâtres et de grès à plantes à patine noire.

- Le Stéphalien (1000m à 1250m)

Il affleure dans la plaine d'Abadla, il s'agit d'une alternance de marnes, de grès et de marnes rouges gypsifères.

2.1.3. Le Mésozoïque

Au Nord du Djebel Antar, le Mésozoïque constitue d'importants reliefs formant le Grouz méridional, au Sud il forme de modestes reliefs sous forme de cuestras (Ras Smar, Chabket Charef, Chabket Fendi, les Bezazil El Kelba et la première Barga de Kenadsa).

2.1.3.1. Le Trias (4m à 64m)

Formant une semelle argilo-conglomératique le long du revers méridional du Djebel Grouz, et même au niveau de Chabket Fendi et Charef, l'endroit le plus célèbre est celui du conglomérat du Ksar Azoudj (**Mekkaoui, 2000**).

2.1.3.2. Le Jurassique (70m à 300m)

Il forme la principale masse du Djebel Grouz et les reliefs de Hassi Charef et Fendi (Chabka). Il est calcaréo-dolomitique passant latéralement à des calcaires et argiles-évaporitiques vers le Sud au niveau de Fendi- Charef, (**Mekkaoui, 2000**).

2.1.3.3. Le Crétacé

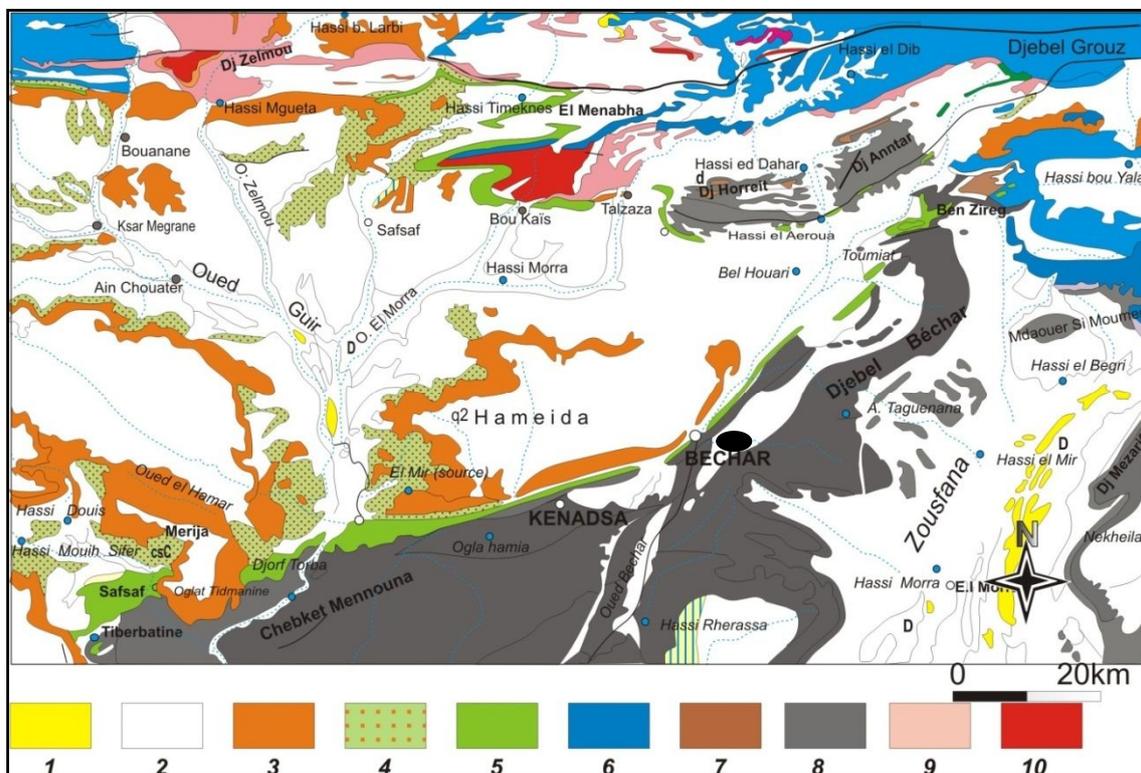
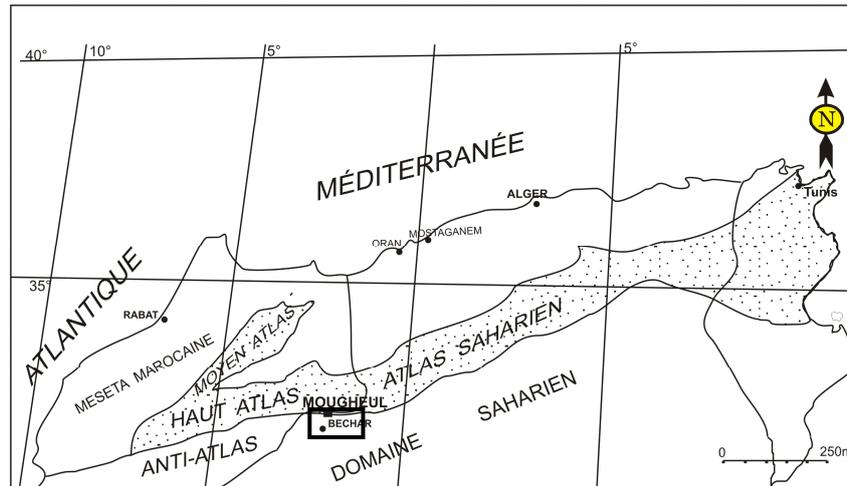
Les terrains du crétacé affleurent généralement sous forme de cuesta (cuesta de Ras Smar, Bezazil El Kelba et la cuesta de Barrage Djorf Torba). Ces formations reposent tantôt en discordance angulaire sur le Carbonifère, tantôt en concordance sur le Jurassique. Ce sont des terrains grés-argileux à gypse, évoluant vers des marnes et des calcaires massifs. Le Crétacé supérieur est représenté par des argiles à évaporite (sel et gypse) ; ces formations du Crétacé cumulent une épaisseur qui dépasse **1000m** (**Mekkaoui, 2000**).

2.1.4. Le Tertiaire (25m à 52m)

Ces terrains sont tabulaires et discordants en ravinant la série sous-jacente (Crétacé). Ils constituent les corniches de la 2^{ème} Barga et le plateau d'Oum Es Seba, sur lequel se tiennent quelques buttes témoins (Gour), dont celle d'Oum Es Seba est la plus célèbre. Le tertiaire comprend des argiles conglomératiques, des grés et des calcaires lacustres (**Mekkaoui, 2000**).

2.1.5. Le Quaternaire

Les terrains quaternaires sont assez limités dans l'espace, ce sont principalement les alluvions des oueds, les évaporites de sebkhas et les dunes de sables.



1: Dunes de sable; 2: Reg; 3: Eocène supérieur; 4: Crétacé supérieur; 5: Crétacé inférieur; 6: Jurassique; 7: Dévonien; 8: Carbonifère; 9: Paléozoïque inférieur; 10: Précambrien.

Figure III.1 : Carte géologique provisoire de la région de Béchar (Deleau, 1951)

2.2. Cadre structural régional

Sur le plan structural, cette région est complexe car ayant subi deux orogénèses (hercynienne et alpine) responsables de deux discordances angulaires. Le premier est

hercynien séparant le Primaire du Secondaire, la deuxième est celle entre le Crétacé et le Tertiaire.

La région est structurée en une succession d'anticlinaux et synclinaux de direction Est – Ouest. Le djebel Béchar est affecté de nombreuses torsions, engendrant des pli-failles et des plans de chevauchement. En ce qui concerne la tectonique cassante, des failles E – W et ENE – WSW affectent essentiellement le Paléozoïque et sont mieux exprimées dans l'anticlinal de Mennouna, certaines se prolonge dans le Crétacé (**Idrotechneco, 1979**). Les systèmes des failles les mieux exprimés sont :

- **Un système Est-Ouest** : Sont les mieux visibles dans le domaine du Djebel Grouz au niveau de Figuig (Maroc), la faille Sud Atlasique s'ouvre en queue de cheval pour former le système de faille Sud Antar, Nord Antar, Sud Grouz et Nord Grouz.
- **Un système Nord Est-Sud Ouest** : Est bien visible dans le Chabket Mennouna.
- **Un système Nord Ouest-Sud Est** : Ce système est moins visible apparaissant dans les distorsions.
- **Sub-Méridien** : Ce système est très discret toutefois en peut le citer au niveau du secteur d'étude.

3. Etude géologique locale

3.1. La lithostratigraphie de la région de l'Ahmar et Boukaïs

Cette zone est située à la frontière nord du bassin paléozoïque de Béchar (sud-ouest de l'Algérie) (fig. III.2) (**Chabane, 2019**), elle est correspond à la jonction de la zone panafricaine (**Duée et al.1992; Zerrouki 1993**), hercynienne (**Deleau 1951; Pareyn 1961; Kazi-Tani 1986; Nedjari 1991**) et alpin domaines (**Zerrouki 2000b**) (Fig.III.2.a). La zone d'étude est bordée par l'Atlas occidental (Maroc) au Nord-Est, les Horreït et Les monts Antar constituent la limite orientale (Fig. III.2.b). Les formations géologiques s'étendent du Protérozoïque au Quaternaire, où les plus anciennes sont datées du Précambrien et affleurent à l'intérieur de Boukaïs. Ces roches précambriennes sont représentées par le complexe en lier formé par un empilement de porphyre andésitique avec des feldspaths, des dolérites aux intercalations du Labrador et de l'olivine (**Zerrouki 2000b; Seddiki et al. 2004**). La figure III.2.c montre les différentes séries lithologiques observées dans la zone de L'Ahmar et Boukaïs qui comprend de bas (Tibalicine) en haut (Talza) (**Chabane, 2019**).

3.1.1. Paléozoïque

Le sous-sol précambrien est recouvert dans le Jebel Tibalicine et au sud-ouest de Boukaïs par la Formation cambro-ordovicienne (Fig.III.2.a), correspondant à des couches de conglomérat à la base, des grès et quartzites avec des niveaux de schistes intercalés de niveaux de calcaire fossilifère datés du Cambro-Ordovicien **(Du Dresnay et Hupée, 1953)**.

L'affleurement silurien dans le Ben Zireg commence par des schistes psammites verdâtres contenant des trilobites au sommet. La série se termine par du quartzite blanc, schiste vert avec des niveaux de psammite, des nodules avec lingules et les schistes blancs à *Monograptus*.

La série dévonienne est principalement connue dans la région de Ben Zireg et se subdivise en quatre formations sédimentaires qui commencent par une argile calcaire inférieure d'âge emsien et une formation du Frasnien- Famennien (calcaire morello) au sommet **(Fellah 2009; Massa et Combaz 1965; Chabane, 2019)**.

La formation carbonifère se termine par une sédimentation détritique strunienne qui se poursuit pendant le Tournaisien et le Viséen inférieur. Du Viséen supérieure au Bachkirien supérieur une plate-forme carbonatée typique s'installe et s'accompagne d'une diversification de plates-formes stables et une tendance récifale dans la partie orientale du bassin de Béchar **(Conrad et Lemosquet 1984; Conrad 1984)**,

3.1.2. Mésozoïque

Dans la zone de Béchar, les affleurements du Cénomaniens et du Turonien forment des repères géomorphologiques. Ils se composent des murs verticaux de Bezazil-el-Kelba, du mont Asfar, de Chebket Berridel, d'El Megsem et celle d'El Menaguir. Ils sont divisés en trois unités:

- L'unité du Cénomaniens inférieur représentée par le Marnes de gypse soufflantes,
- La Formation de calcaire de Sidi Mohamed Ben Bouziane considérée comme du Cénomaniens supérieur-Turonien inférieur,
- L'unité de marnes de gypse supérieures **(Benyoucef et al.2012, 2016, Chikhi-Aouimeur et al.,2006; Chikhi-Aouimeur 2010, Andreu et al., 2013, Chabane, 2019)**.

3.1.3. Tertiaire

L'unité tertiaire commence par les conglomérats et le calcaire faciès recouvert de schistes rouges d'âge Eocène inférieur et moyen formation et la barre de calcaire (**Hamdidouche 1997**). Le l'âge de l'oligocène est représenté par une formation de mélasse puis un grès grossier alternant avec des niveaux de conglomérats. Trente mètres d'épaisseur de grès calcaire correspondant à le pliocène de Guir Hammada indique la fin du tertiaire (**Chabane, 2019**).

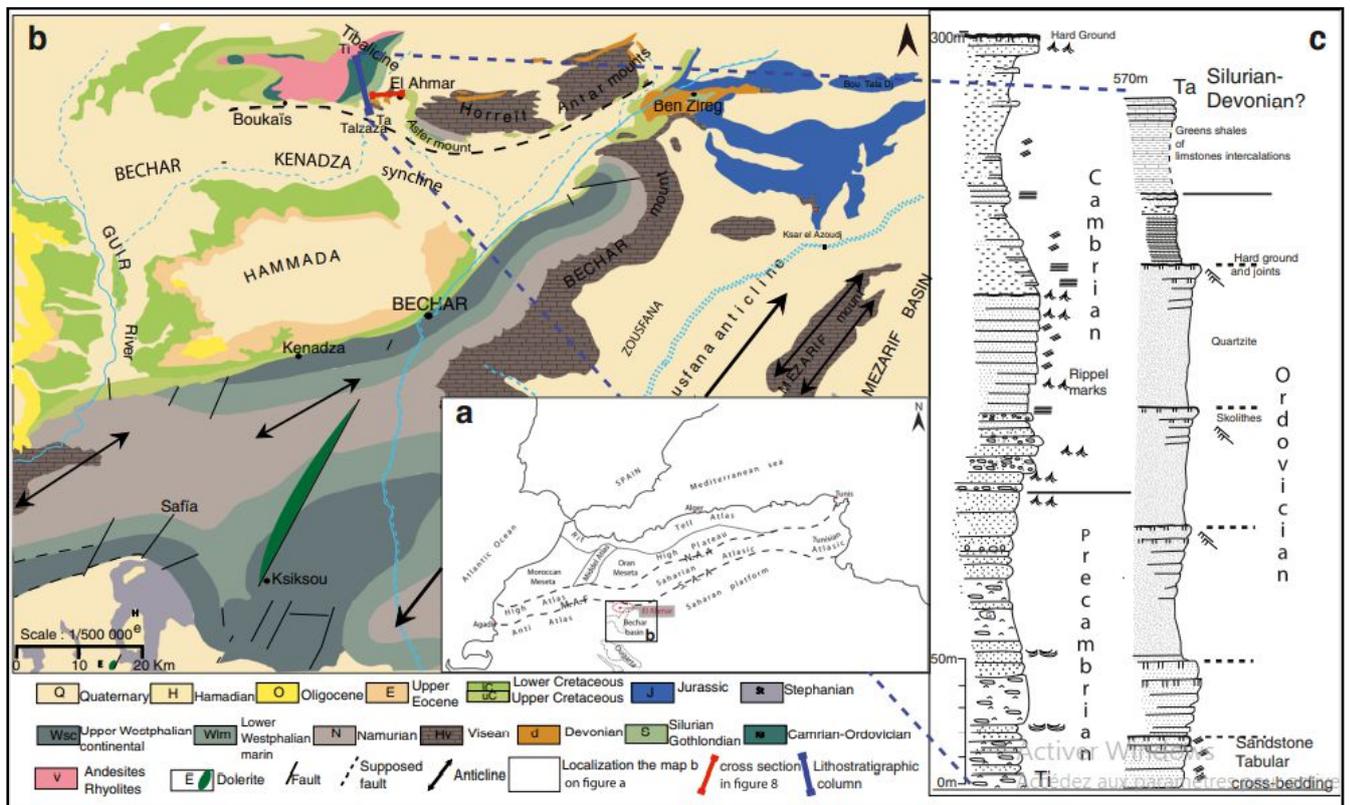


Figure III.2 : Présentation générale de la zone d'étude l'Ahmar et Boukaïs . (a) Localisation de la plateforme saharienne en Afrique du Nord. (b) Carte géologique du bassin de Béchar et de la zone étudiée. (c) Colonne lithostratigraphique synthétique des formations Tibalicine (Ti) et Talzaza (Ta) (**Chabane, 2019**).

3.2. Phases tectoniques de la région de l'Ahmar et Boukaïs

De la période panafricaine à la période alpine, l'évolution dynamique du bassin de Béchar a été affectée par plusieurs événements (**Zerrouki 2004**). Cette mobilité tectonique permanente est liée à trois périodes principales:

3.2.1. Période panafricaine

Dans la région de l'Ahmar et Boukaïs, la période panafricaine se caractérise par une déformation continuellement remodelée, les empreintes de ce stade de déformation sont encore visibles. Une direction de pliage E-W accompagnée de la direction de clivage N090 à N100 est observée et mesurée. On remarque que les formations cambriennes du Djebel Tibalicine ne sont pas affectées par ce clivage, il en est de même de ceux de l'affleurement situé dans la partie sud (**Duée et al., 1992; Chabane, 2019**).

3.2.2. Période hercynienne

Selon **Kazi-Tani (1986)**, le bassin d'Ougarta, le Bechar Bassin et l'Anti-Atlas (sud marocain) montrent les mêmes caractéristiques structurales qui sont représentées par le même pli directions NW-SE (**Hamdidouche, 2009**). Leur évolution est caractérisée par des déformations polyphasées responsables de la géométrie actuelle. Parmi ces phases, un affaissement important et l'écoulement gravitaire synsédimentaire à l'Ougarta avec une direction NE-SW (**Hamdidouche, 2009**) représentent le Dévonien tardif (phase hercynienne précoce) tel que décrit en utilisant le paléomagnétique données (**Lamali et al., 2013**). La grande période tectonique hercynienne est définie par les structures compressives importantes. À Sfaïa région (à l'est d'Abadla) apparaissent de petits plis anticlinal, déchargée vers le NE dans la direction N140, parallèlement à la tendance générale de la chaîne Ougarta (**Zerrouki, 2004**). Le NW-SE Tendance du bassin du Carbonifère au début du Permien Béchar ont été inversés pendant la fin du Carbonifère au début Permien (**Fabre, 1976**). Le raccourcissement était direction NE-SW perpendiculaire à la ceinture d'Ougarta, et tournant vers le Nord N-S dans la région de Béchar. A l'Ouest, la ceinture plissée hercynienne s'étend à travers l'Anti-Atlas. Le long de l'Anti-Atlas oriental, les déformations sont restées faibles et ont entraîné une grande série de pli anticlinal (**Chabane, 2019**).

3.2.3. Phase alpine

La phase alpine caractérisée par transgression, zone de cisaillement du Sud Atlasique est l'un de ces systèmes de failles. Il est connu dans la région ouest par une ligne d'accidents NE-SW à ENE-WSW dans l'Atlas du Sahara occidental avec une forte inclinaison vers le Nord (**Zerrouki, 2004**). Il montre les deux mouvements: Une dextre mouvement de faute de glissement de frappe et un autre chevauchement inverse. Par emplacement, la direction devient E-W avec un fort pendage vers le Nord, sur un recouvrement avec une composante

dextre horizontale (**Hachour, 2012**). Cette structure tectonique observée dans la région sud du Massif de Boukaïs est également reconnue dans la zone de cisaillement du mont Horreït (**Weyant et Pareyn, 1975**); elle marque une frontière naturelle entre le bassin paléozoïque de Béchar et le domaine de l'Atlas le long de la branche sud de la zone de cisaillement de l'Atlas Sud. Selon **Zerrouki, 2004 et Chabane, 2019**. Le mont Horreït peut être interprété comme une zone de décrochement.

3.3. Lithostratigraphie de la région Mougheul

La région de Mougheul est enclavée dans l'extrême sud-ouest du Djebel Grouz. Ce dernier se caractérise par la présence d'un soubassement paléozoïque plissé et une puissante couverture jurassique de nature calcaréo-dolomitique (fig. III.3).

Notre site d'étude comprend terrains suivants (fig. III.3, 4 et 5) :

3.3.1. Substratum paléozoïque

Il constitue le revers méridional des petites cuestas de Mougheul, (**Zerrouki, 1993**). Il s'agit d'une alternance inégale de grès schisteux et de quartzites. Ces terrains sont attribués au Cambro-Ordovicien (**Perrodon, 1952**).

3.3.2. Couverture Triaso-Jurassique

Cinq formations définies par leur contenu lithologique ont été reconnues sur le site d'étude. Ces formations couvrent un interval qui s'étend du trias à l'Aaléno-Bajocien.

L'âge des formations est déterminé par leur contenu en Brachiopodes et par analogie aux régions limitrophes (**Mekkaoui, 2000; Nedjari et al., 2002**).

3.3.2.1. Formation d'Aïn Ben Serhane (4m)

Elle affleure représente les reliefs méridionaux de la région de Mougheul. Cette formation est discordante sur le Cambro-ordovicien (fig. III.5), elle est attribuée par analogie au Trias (**Mekkaoui, 2000; Mebarki, 2013**) et admet les subdivisions suivantes :

1/ Membre inférieur (3m) :

Il est composé de conglomérats hétérogènes, à galets moyens, anguleux, rarement arrondis. Ils sont composés essentiellement de galets de quartzites, de grès et d'andésites.

2/ Membre supérieur (1m)

A/ Terme inférieur (0.5m) : Il comprend des grés argileux rougeâtres en petits bancs réguliers.

B/ Terme supérieur (0.5m) : Correspond à des argiles silteuses rougeâtres.

3.3.2.2. Formation de Koudiat El Haïdoura (64m)

Elle constitue les cuestas Méridionaux de la région de Mougheul. Il s'agit essentiellement d'une formation calcairéo-dolomitique (**figure III.5**) (**Nedjari et al., 2002**). Par sa position entre le Domérien et le Trias, cette formation est attribuée au Sinemurien (**Deleau, 1952**). Elle est subdivisée de bas en haut:

1/ Membre inférieur (29m)

A/ Terme 1(6m) : Ce terme débute par des argiles versicolores gypsifères, admettant des intercalations dolomitiques en plaquettes, elle est coiffée par une barre grisâtre de dolomie vacuolaire.

B/ Terme 2 (15m) : Il s'agit de marnes gypsifères, admettant des bancs de gypse massif et des bancs de dolomie argileuse.

C/ Terme 3(8m) : Il représente les premiers carbonates qui succèdent aux marnes gypsifères sous-jacentes. Le premier banc ravine les marnes, il est constitué de calcaires dolomitiques argileux passant vers le haut à des calcaires dolomités à patine beige et à cassure blanchâtre. Ce terme se termine par des dolomies.

2/ Membre supérieur (35m)

A/ Terme 1(7.5m) : Il s'agit de calcaires argileux dolomitiques en petits bancs suivis de barres dolomitiques et des calcaires dolomitiques.

B/ Terme 2 (3m) : Il débute par des barres dolomitiques.

C/ Terme 3 (21m) : Ce terme comprend des dolomies en barres métriques vacuolaires surmontées par des calcaires dolomitiques.

Dans sa partie supérieure, on observe des dolomies, des calcaires dolomitiques qui se terminent par un calcaire.

D/ Terme 4 (8m) : Des dolomies en petits bancs, et des barres de dolomies.

3.3.2.3. Formation de l'Oued Mennat (5m)

De petits affleurements épars apparaissent à la faveur des échancrures des oueds. Tenant compte de la qualité d'affleurement on ne voit que la partie supérieure de cette formation représentée par des calcaires dolomitiques bioclastiques de couleur beige à rougeâtre, cette formation renferme des brachiopodes permettant de fixer son âge au Domérien (Alméras et al., 1994 ; Nedjari et al., 2002).

3.3.2.4. Formation de l'Oued ElAbiod (120m)

Les argiles rouges forment la plaine de Mougheul, sa limite inférieure est masquée par des dépôts récents. En général, on observe des formations argilo-gypsifère rougeâtre (Mekkaoui, 2000; Mebarki, 2013).

Par comparaison et analogie cette formation à caractère de sebkha est attribuée au Toarcien régressif du domaine atlasique.

1/ Membre Supérieur (80m)

A/Terme 1 (50m) : Il est représenté par des argiles silteuses rougeâtres admettant de petits bancs dolomitiques. Dans la partie supérieure on signale l'apparition progressive de gypse au détriment des bancs dolomitiques. A la base l'apparition du gypse est timide sous forme de lamelles en fer de lance dans les argiles rouges. Vers le sommet, le gypse apparaît en bancs massifs parfois métriques. Ce terme porte en son milieu un petit banc de dolomie fossilifère.

B/Terme 2 (30m): Il débute par des conglomérats polygéniques, les éléments sont arrondis de nature diverse. Ces conglomérats ravinent les argiles gypsifères admettant quelques bancs dolomitiques.

3.3.2.5. Formation de Hassi Laâma (34m)

Cette formation constitue les reliefs septentrionaux de Mougheul. Par les brachiopodes qu'elle contient cette formation est attribuée au l'Aaléno-Bajocien (Alméras, 1994 ; Nedjari et al., 2002). Elle se compose de :

1/ Membre inférieur (18.5m)

A/Terme 1 (3m) : Il est représenté par des calcaires dolomitiques argileux, ravinant les argiles gypsifères sous-jacentes. Ils sont surmontés de grès argileux rouges.

B/Terme 2 (15.5m) : Ce terme commence par un banc moyen de calcaires bleuâtres suivi de calcaires dolomitiques en petits bancs beiges à la patine et blanchâtres à la cassure. L'ensemble est surmonté par des dolomies en banc métriques.

2/ Membre supérieur (15.5m)

A/Terme 1 (2.5m) : Il s'agit de marnes beiges.

B/Terme 2 (8m) : Il s'agit de calcaires dolomitiques.

C/Terme 3 (5m): Il est représenté par des calcaires dolomitiques.

3.3.2.6. Le Quaternaire

Le Quaternaire peut être subdivisé en :

1/ Alluvions anciennes : Ils sont représentées par des dépôts limoneux ou sablo-limoneux a graviers ou galets émoussés de calcaires quaternaires. Elles sont consolidées et liées étroitement aux anciennes terrasses des oueds.

2/ Alluvions récentes : Elles sont étroitement liées aux principaux oueds de la région, ils s'agissent des sables, de graviers et des blocs noirs consolidés, par endroit elles sont tourbeuses et argileuses (**Mekkaoui, 2000; Mebarki, 2013**).

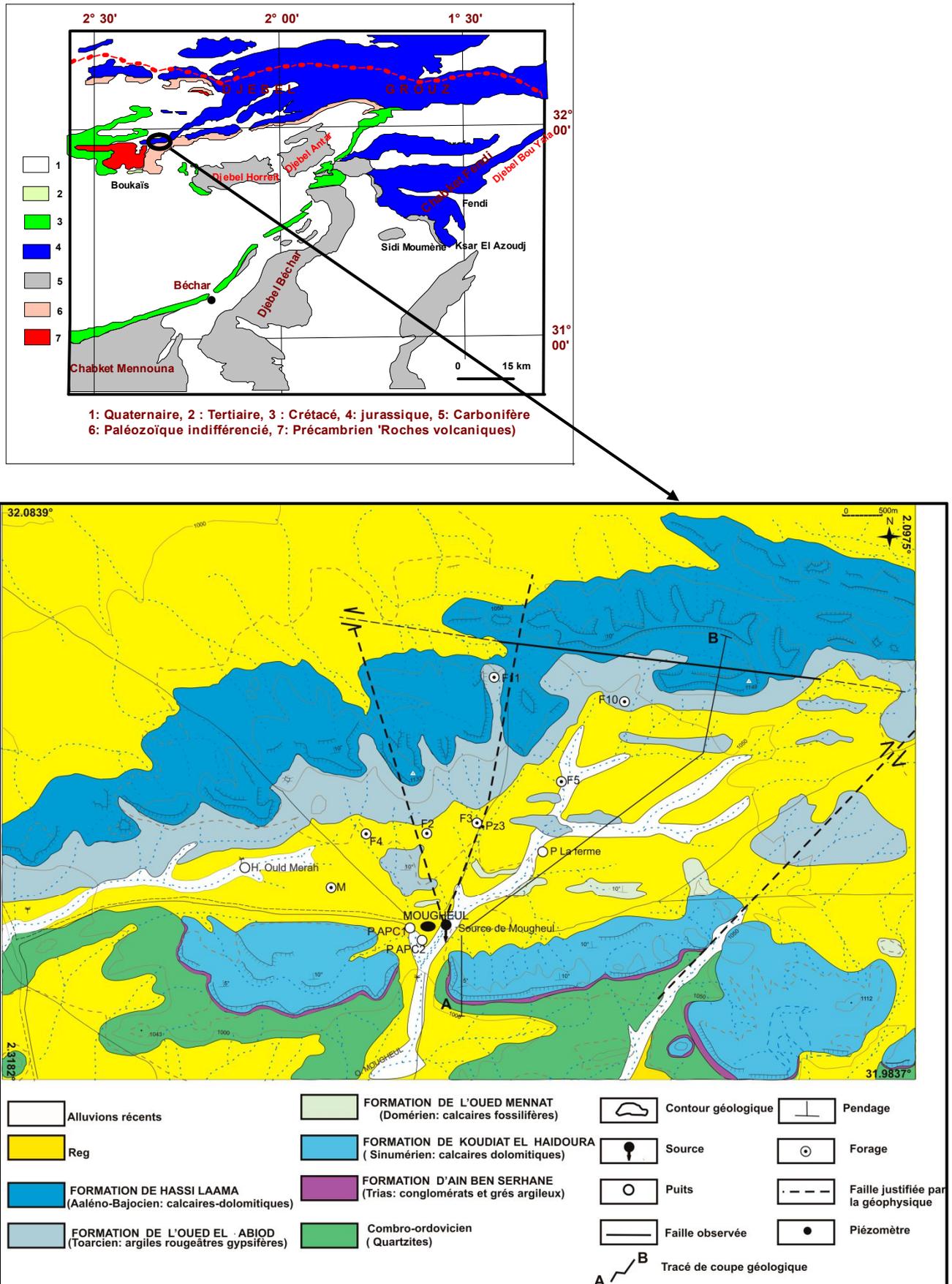


Figure III.2: Carte géologique de la région de Mougheul (Mekkaoui, 2000)

Formation	Membre	Lithologie	Description sommaire	AGE
Formation de Hassi Laâma	Supérieur		Calcaires dolomitiques bioclastiques et marnes	AALENO-BAJOCIEN
	Inférieur		Calcaires dolomitiques argileux, argiles gypsifères et grès argileux	
Formation de l'Oued ElAbiod	Supérieur		Argiles gypsifères armées de bancs calcaires	TOARCIEEN
	Inférieur		Argiles silteuses rougeâtres armées de bancs de dolomies	
Formation de l'Oued Mennat			Calcaires bioclastiques	DOMERIEEN
Formation de Koudiat El Haidoura	Supérieur		Calcaires argileux dolomitiques	LIAS-INFERIEUR – CARIXIEN (SINEMURIEN)
	Inférieur		Argiles gypsifères et calcaires dolomitiques	
Formation d'Ain Ben Serhane	Supérieur Inférieur		Conglomérats Grès et argiles	TRIAS
PALEOZOIQUE			Quartzites	CAMBRO-ORDOVICIEN

Figure. III.4: Coupe sans échelle lithologique de la région de Mougheul (Mekkaoui, 2000)

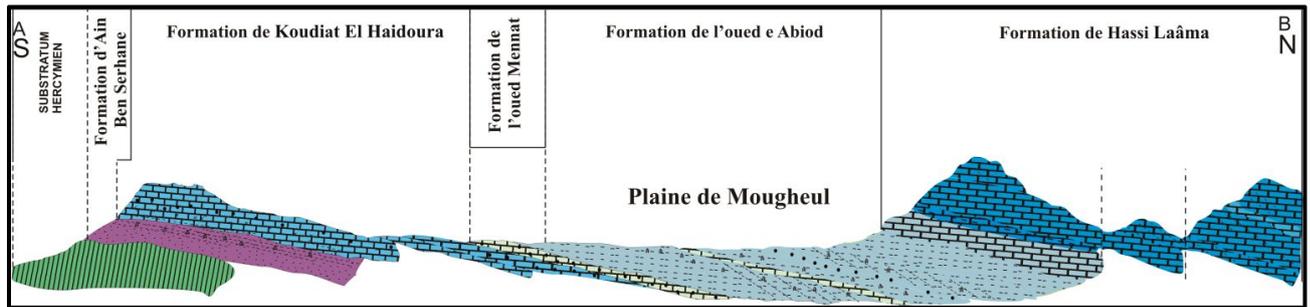


Figure III.5: Coupe schématique de la région de Mougheul (Mekkaoui, 2000)

3.4. Tectonique de la région de Mougheul

Les différentes formations sont constituées par des couches tendres et des bancs indurés dits compétents tels les grès, les calcaires, les dolomites de pente faible de 05° à 15° vers le Nord; ces formations ont une allure monoclinale. Ces allures sont perturbées localement par des phénomènes tectoniques (Mekkaoui, 2000). A cette perturbation s'ajoute un réseau de failles et de diaclases d'autant plus visibles et nombreuses que la roche devient endurée.

1/ Failles

Les failles sont agencées selon deux orientations distinctes :

A/Est-Ouest : Ce système est bien développé dans le domaine atlasique, une faille est bien visible affectant les formations de Koudiat El Haïdoura et de l'Oued Mennat.

B/Sub- méridiennes : Deux failles jalonnent le secteur d'étude du Nord vers le Sud qui se rencontre au niveau de Mougheul avec l'émergence de la célèbre source de Mougheul.

4. Conclusion

La géologie des ksour du Nord est formée essentiellement d'un Substratum constitué de grès paléozoïques d'âge cambro-ordoviciens. La région de Mougheul comportent cinq formations, les formations de Hassi Laâma, l'Oued Mennat et Koudiat El Haïdoura sont perméables; leurs épaisseurs, leurs structures et leurs surfaces d'affleurement constituent une configuration géologique favorable pour l'emmagasinement et la circulation des eaux souterraines, contrairement aux formations de l'Oued El Abiod et d'Aïn Ben Serhane qui sont des formations imperméables.

La région de l'Ahmar et Boukaïs est constituée de terrains très variés appartenant à des époques géologiques différentes. Les formations géologiques s'étendent du Protérozoïque au

Quaternaire, où les plus anciennes sont datées du Précambrien et affleurent à l'intérieur de Boukaïs.

Sur le plan structural, la zone d'étude est située sur le flanc d'une structure monoclinale dont tous les massifs présentent une grande densité de fracturation qui joue probablement un grand rôle dans la porosité des roches et contribue aussi à une rapide infiltration des eaux de pluie qui tombent directement sur les affleurements. Ainsi tous les affleurements fracturés constituent vraisemblablement des zones d'alimentation (l'impluvium) directes des nappes aquifères existantes.

Chapitre IV

L'hydrogéologie de la zone d'étude

1. Introduction

L'objectif de l'étude hydrogéologique est basée sur la détermination des caractéristiques et des propriétés de l'aquifère. Notre travail est basé sur l'observation et la récolte de toutes les informations possibles. Ces informations se basent surtout sur les mesures des niveaux d'eau (statiques et dynamiques) et les jaugeages des débits des ouvrages et sources.

2. Hydrogéologie régionale

La synthèse des travaux de **Deleau (1952)**, **Roche (1973)**, l'étude de la **SONAREM-IDROTECHNECO (1995)** et celle de l'**A.N.R.H de Béchar (1995)** confirment la présence de nappes aquifères d'importance variable dans le sous-sol de la région de Béchar (figure VI.1).

2.1. Aquifère des calcaire du Carbonifère

Les forages exécutés par la **SONAREM (1995)** ont permis de mettre en évidence la superposition de deux nappes ; la première est contenue dans la partie fissurée (fractures et joints de stratifications) des calcaires dolomitiques du Djénine. La deuxième est celle d'El Guelmouna se trouvant à une profondeur comprise entre 200 et 250 m.

La structure anticlinale de ces calcaires n'est pas favorable à l'emmagasinement de réserves d'eau ce qui explique les faibles potentialités en eau de la région de Chebket Mennouna.

2.2. Aquifère des grés du Carbonifère

Ces terrains affleurent sur une grande partie de l'anticlinal de Chebket Mennouna, sur le flanc Ouest de l'anticlinal de la Zousfana et au Djebel Arhlal. Les études précédentes ont montré que les grés sont le siège de nappes libres ; la porosité est due à la dissolution du ciment. L'écoulement des eaux se fait du Nord-Est au Sud- Ouest avec une alimentation dans les affleurements du Djebel Béchar.

La nappe du westphalien- Stephanien se rencontre à une profondeur inférieure à 10m et devient Sub- affleurant au Nord dans la zone de Kenadsa.

2.3. Aquifère des calcaires du Turonien

Les calcaires fissurés formant la première Barga de Béchar constituent un repère morphologique régional, cette formation carbonatée fissurée constitue un très bon aquifère mais de faible (25 à 40m).

Ces calcaires fissurés se trouvent essentiellement dans la bordure sud du bassin de subsidence de Béchar- Kenadsa qui représente le secteur oriental du grand bassin créacé d'Errachidia – Boudnibe.

L'aquifère du turonien contient la principale nappe de la région de Béchar, elle est libre en bordure et captive vers le centre du bassin.

Cette nappe est alimentée par les eaux de pluie ou encore à partir de nappes superficielles.

Les réserves de cette nappe sont certainement considérables et l'importance de son débit se traduit par le fait qu'elle alimente les sources les plus importantes du bassin :

- La source de Boukaïs, constitue un exutoire des calcaires turoniens par l'intermédiaire d'une faille correspondant à la flexure Saharienne.
- Les eaux de la source des calcaires de Djorf Torba se déversent directement dans l'Oued Guir.

Il est malheureusement impossible en l'état actuel d'évaluer la part du débit qui revient à chacune de ces sources ainsi une estimation des ressources s'avère nécessaire vu l'importance de cette nappe. Les forages implantés dans les calcaires turoniens de la région d'Ouakda se sont révélés dans la totalité des cas productifs, la profondeur du niveau piézométrique est comprise entre 22 et 36.5 m correspondant à des profondeurs totales allant de 75 à 190m.

2.4. Aquifère des calcaires lacustres de l'Eocène supérieur

L'Eocène supérieur est constitué à la base par une vingtaine de mètres de conglomérats, de marnes et marno- calcaires, au sommet par une dalle de calcaires lacustres de 20 à 40 m qui forment la deuxième Barga de Béchar presque tabulaire qui constitue l'aquifère.

La plupart des Oueds contournent le plateau éocène et ne participent pas à son alimentation. Cette dernière semble se faire uniquement par infiltration directe au niveau des affleurements. Les seuls exutoires naturels visibles sont quelques sources dont le débit est insignifiant.

2.5. Aquifère des formations du Quaternaire

Les formations quaternaires constituent principalement le sommet de la petite Hamada, des terrasses alluviales, des Ergs, des alluvions récentes d'Oueds, des Sebkhas et des dépôts de pentes.

A/ Inféroflux de l'oued Guir et la nappe de la plaine d'Abadla : L'Inféroflux de l'oued Guir offre une ressource possible en eau souterraine.

B/ Inféroflux de l'oued Zousfana : Il s'agit d'une nappe à faible profondeur qui affleure en amont de Taghit. Elle est contenue dans un terrain à lithologie variable (argiles, sables, grés et conglomérats).

C/ Inféroflux de l'oued Béchar : Cette nappe est alimentée par les eaux de pluie.

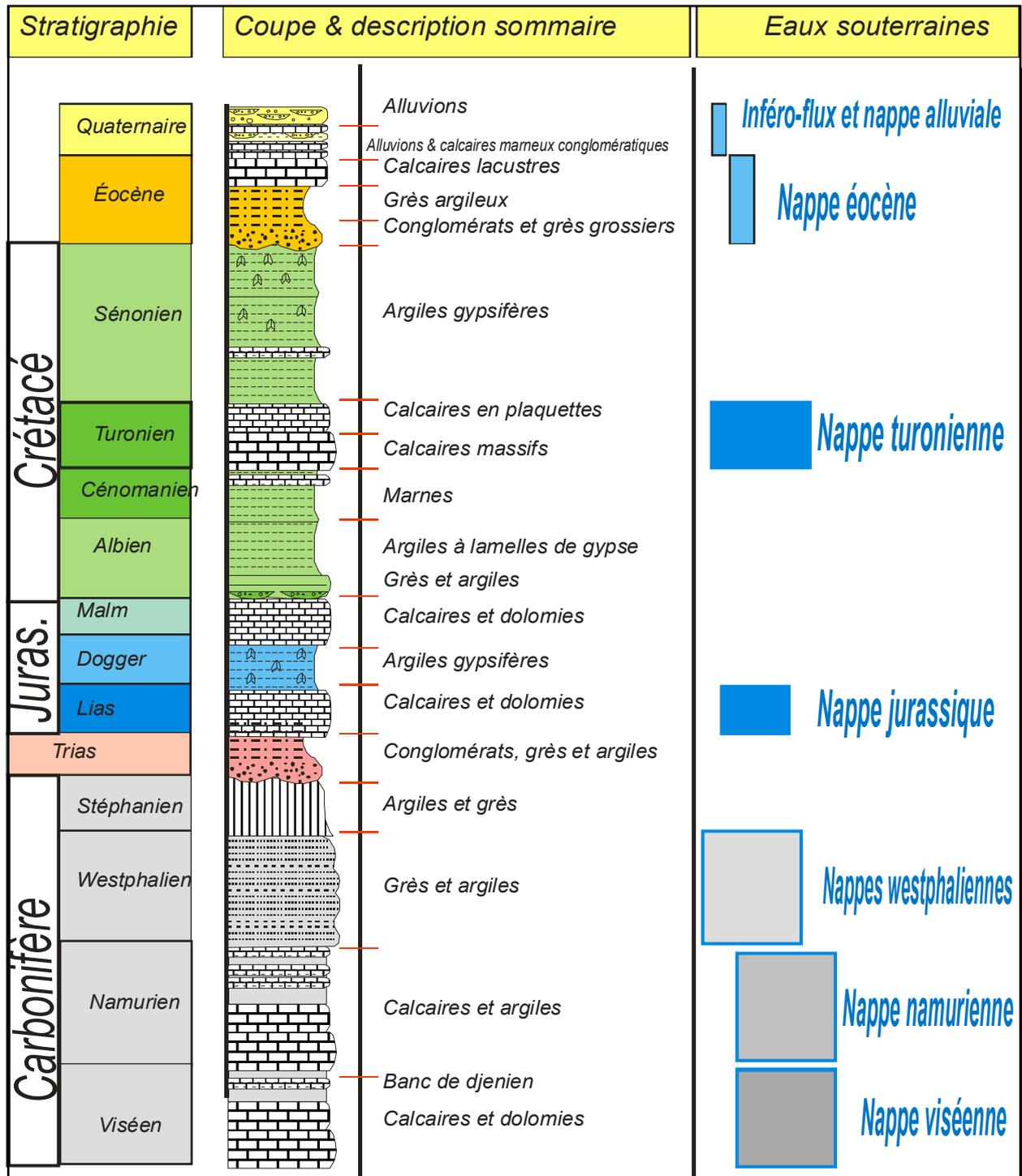


Figure VI.1 : Différentes unités aquifères dans la région de Béchar (A.N.R.H, 2008).

3. Les nappes aquifères de la région de Mougheul

L'élément essentiel de l'unité hydrogéologique du bassin de Mougheul est l'aquifère des calcaires dolomitiques du jurassique inférieur dont les formations affleurent largement au

Nord au niveau du Djebel Grouz. A la base des informations existantes on a essayé d'élaborer une ébauche sur l'hydrogéologie de cette formation géologique.

Les calcaires dolomitiques du Jurassique constituent l'aquifère principal de la région, ils affleurent largement au Nord et au Nord-Ouest sur les flancs du Djebel Grouz et s'étendent jusqu'à la région de Ben Zireg. C'est l'assise perméable la plus importante de tout le système de la partie Nord de Béchar. Ces affleurements très étendus confèrent à ce système aquifère un vaste impluvium impliquant une recharge importante de la ressource souterraine (Mebarki, 2013).

L'alimentation directe se fait par son impluvium dont la superficie d'affleurement est très étendue dans l'espace (Deleau 1952; Roche 1973; Idrotecneco, 1979).

Par leur lithologie ces calcaires dolomitiques et fissurés se caractérisent par une transmissivité importante (A.N.R.H, 2008). Tous les forages réalisés dans la région captent cette formation sur une épaisseur supérieure à 80 m.

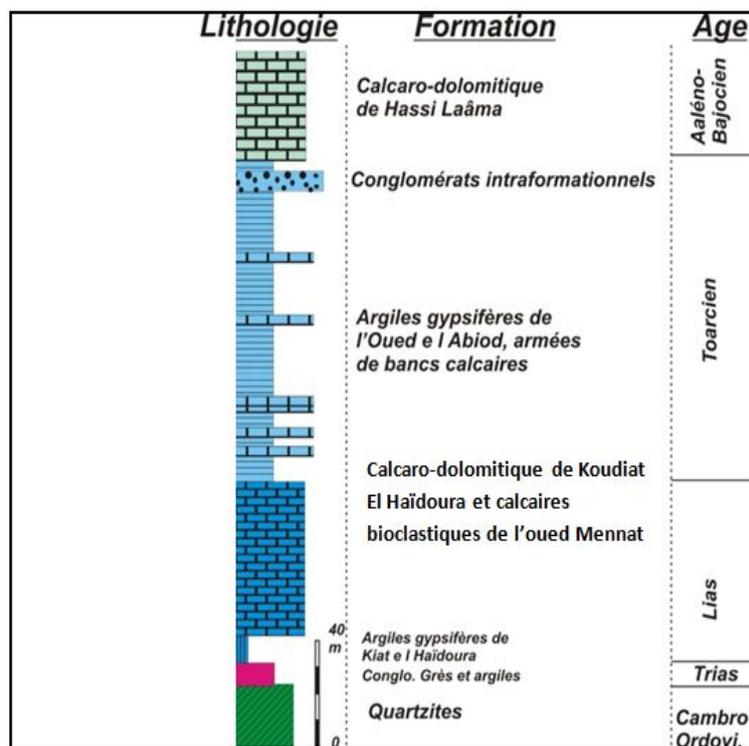


Figure IV.2: Système aquifère dans la région de Mougheul.

4. Les nappes aquifères de la région de Boukaïs

Dans cette Oasis on peut inventorier trois nappes souterraines (nappe de paléozoïque, nappe du turonien, nappe alluviale des Oueds). La nappe du Turonien constitue le principal

aquifère qui alimente l'Oasis de Boukaïs, la source de Boukaïs avec un débit de 20l/s irrigue cette palmeraie et participe au 1/3 de son alimentation en eau potable, les deux tiers de l'alimentation en eau potable est assurés par le puits du parc APC et les forages de la nappe paléozoïque. Tandis que les exploitations agricoles hors la palmeraie sont irriguées par les nappes alluviales des Oueds Boukaïs et Oued El Hassra .

Le sous sol de Boukaïs renferme plusieurs nappes souterraines, qui sont (A.N.R.H, 2008):

- **Nappe de paléozoïque** : dans laquelle sont implantés quelques forages destinés pour l'alimentation en eau potable (P1, P2, P3 et P4).
- **Nappe de Turonien** : la principale nappe qui de l'oasis de Boukaïs, au sein du quel, existe la source de Boukaïs.
- **Nappe des terrasses** : alluviales des Oueds exploitées par les agriculteurs hors de l'Oasis (Hassi Ameur et les puits aux alentours de la digue).

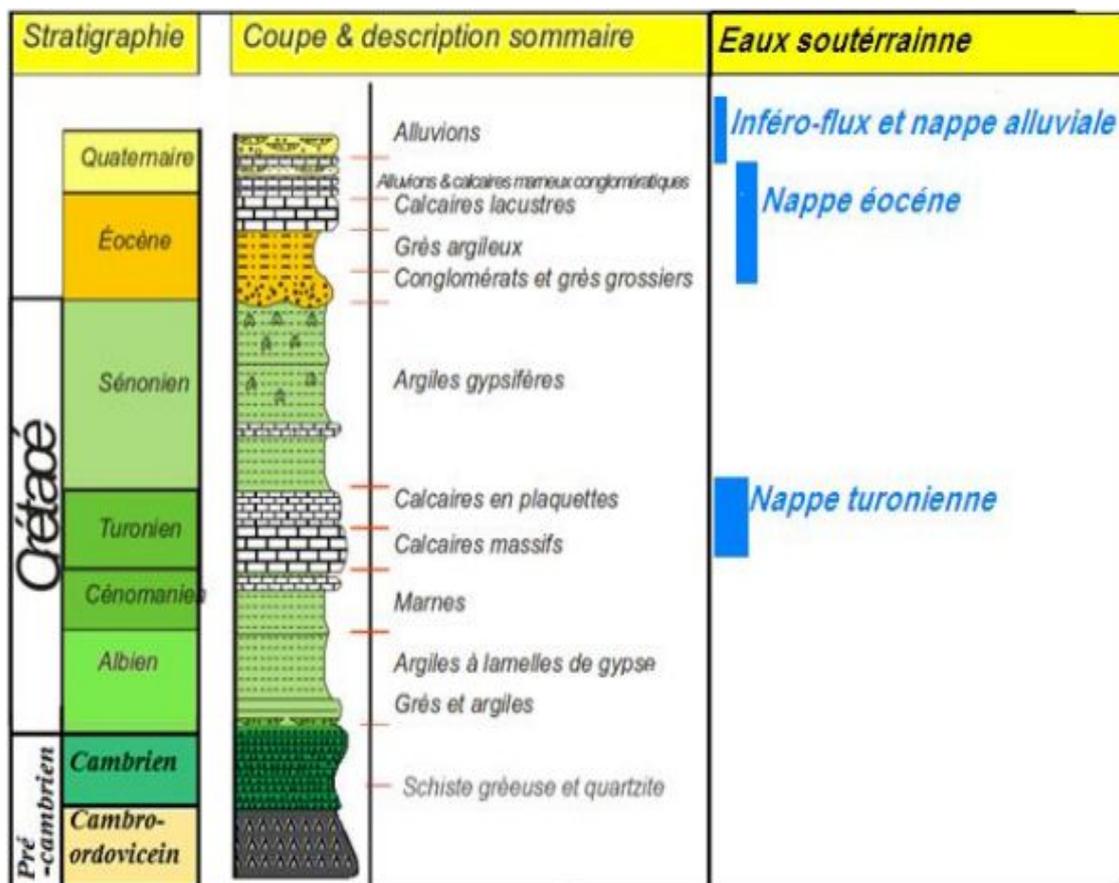


Figure IV.3: Système aquifère dans la région de Boukaïs (A.N.R.H, 2008).

5. La piézométrie

Du fait de la forte hétérogénéité de la formation, les niveaux d'eau relevés dans une nappe fracturée ne sont pas représentatifs de l'ensemble de l'aquifère. Les cartes produites restent cependant valables à l'échelle régionale (nappe du Jurassique inférieur de Mougheul).

5.1. La piézométrie durant l'année 2001

Au cours de l'opération de pompage (descente) et la remontée effectuées du 22/10/2001 au 07/11/2001, les observations ont essentiellement porté sur les niveaux du plan d'eau dans la formation aquifère (Jurassique inférieur) captée par les forages: M, F2, F3, F4, F5, F6, APC1, puits de la ferme et la source de Mougheul.

Tableau IV.1: Mesures de la piézométrie année 2001 des forages captant le Jurassique Inférieur.

Forages	Latitudes	Longitudes	Coordonnées Z(m)	Profondeurs(m)	Niveau Statique 10/2001(m)	Niveau piézométrique 2001(m)
M	32°01'38"N	02°13'57"W	1026	150	10,6	1015,4
F2	32°01'51"N	02°12'53"W	1032	152	23,6	1008,4
F3	32°01'59"N	02°12'26"W	1034	175	23,4	1010,6
F4	32°01'57"N	02°13'29"W	1033	200	18,1	1014,9
F5	32°02'12"N	02°11'32" W	1044	150	28,08	1015,92
F6	32°02'12"N	02°11'52"W	1037	180	24.6	1012,4
APC1	32°01'16"N	02°13'13"W	1023	15.6	11.8	1011.2
Puits de la ferme	32°01'54"N	02°11'46"W	1033	20	15,45	1017.55
Source	32°01'12"N	02°12'55"W	1000	//	0	1000

(A.N.R.H. de Béchar, 2011)

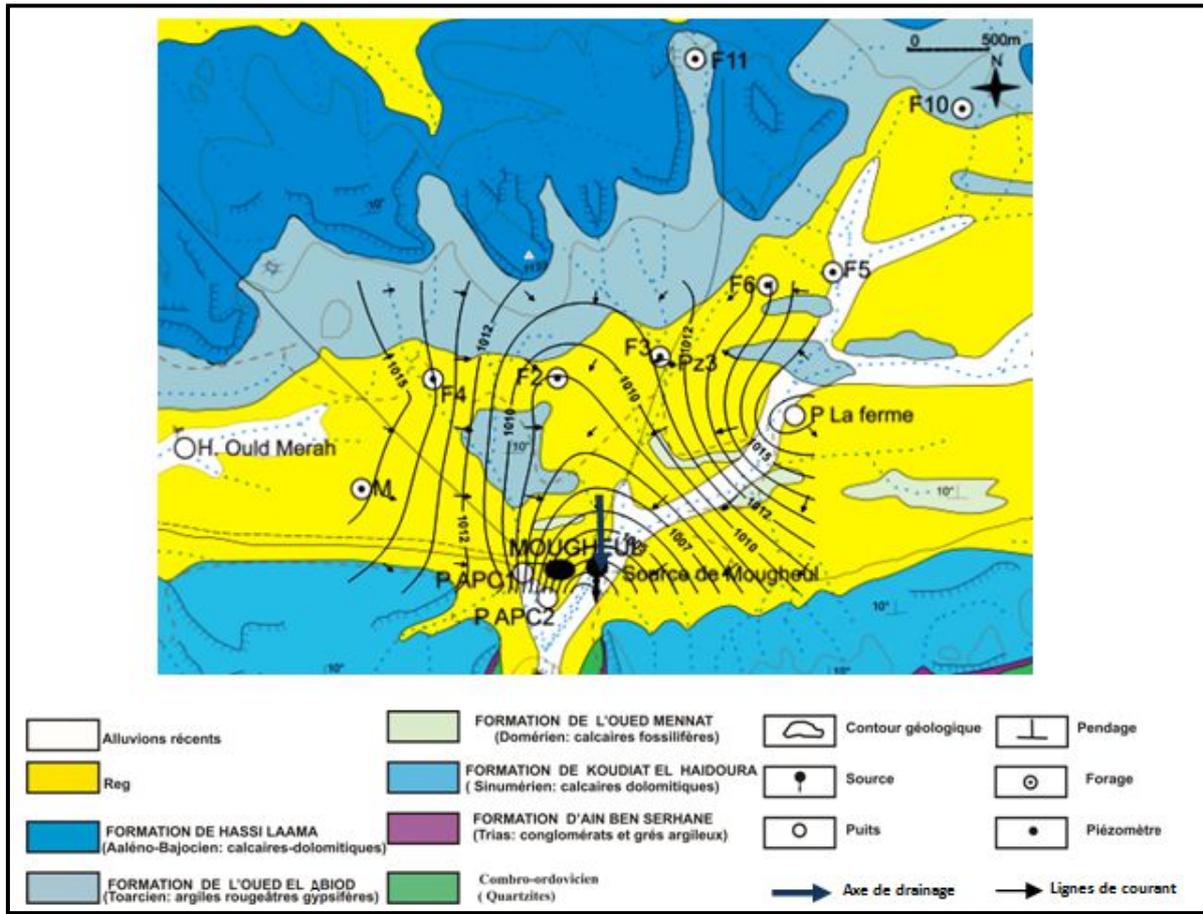


Figure IV.4: Carte piézométrique de la nappe du Jurassique inférieur de Mougheul octobre 2001 (A.N.R.H. de Béchar, 2011).

La carte obtenue (fig.IV.4), montre que toutes les lignes de courant des eaux convergent vers un axe de drainage de direction N-S, avec un gradient hydraulique de l'ordre de 0.015. On remarque que la source de Mougheul se trouve exactement en aval de cet axe de drainage, elle présente l'exutoire de la nappe jurassique inférieure de Mougheul.

5.2. La piézométrie durant l'année 2009

Les observations ont essentiellement porté sur les niveaux du plan d'eau dans la formation aquifère de la nappe jurassique inférieure de Mougheul, captée par les forages F3, F4, F10, F11, APC1, APC2 et puits de la ferme.

Tableau IV.2: Mesures de la piézométrie année 2009 des forages captant le Jurassique inférieur.

Forages	Latitudes	Longitudes	Altitudes en m	Profondeurs(m)	Niveau Statique 12/2009 (m)	Niveau piézométrique 2009 (m)
F3	32°01'59"N	02°12'26"W	1034	175	26,538	1007,462
F4	32°01'59"N	02°13'29"W	1033	200	24.756	1008.244
F10	32°01'59"N	02°10'43,1"w	1070	181	40.25	1029.75
F11	32°01'59"N	02°12'1,6"w	1060	200	29	1031
Puits APC1	32°01'59"N	02°13'13"w	1023	15.6	10,91	1012.09
Puits APC2	32°01'59"N	02°13'09"w	1021	8	13,84	1007.16
Puits de la ferme	32°01'59"N	02°11'46"w	1033	20	20,3	1012.7

(A.N.R.H. de Béchar, 2011)

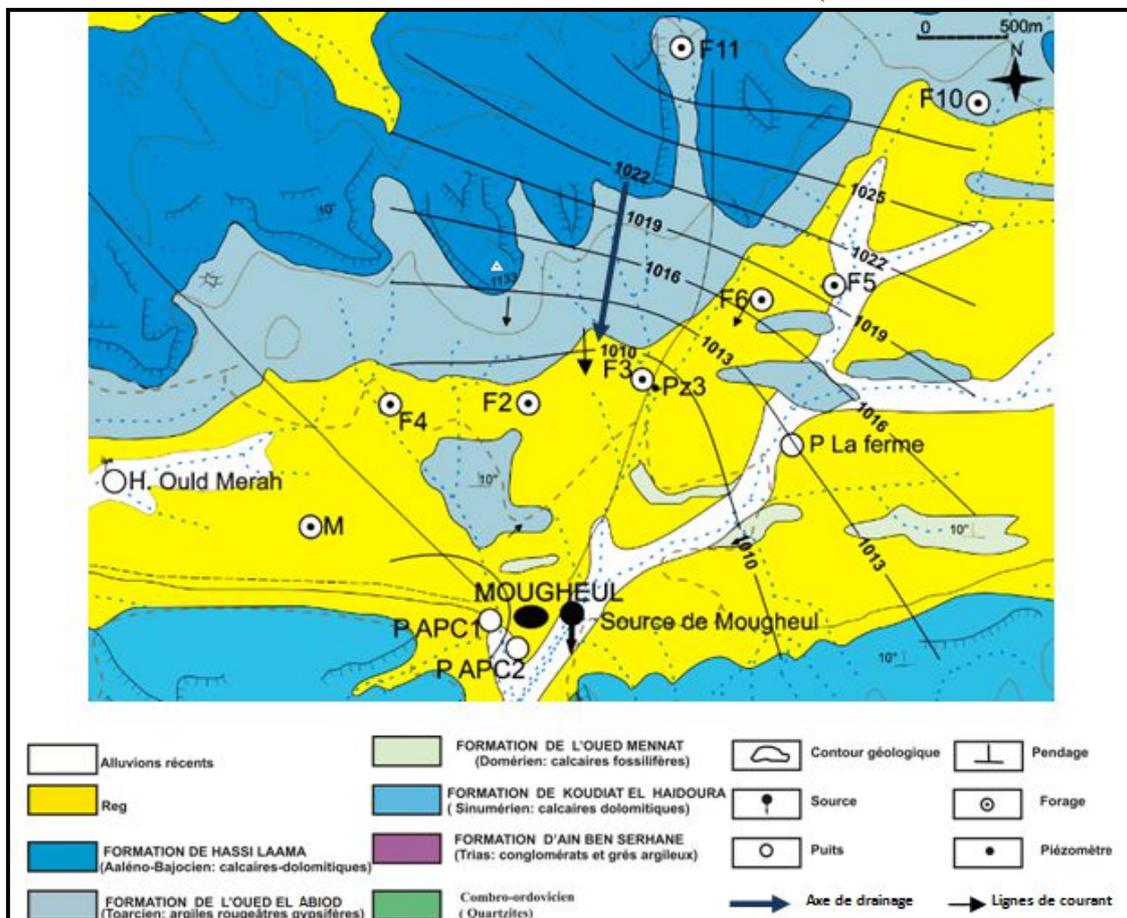


Figure IV.5: Carte piézométrique de la nappe de Mougheul (décembre 2009).

(A.N.R.H. de Béchar, 2011)

La carte piézométrique (fig. IV .5), montre que l'écoulement principal des eaux se fait du Nord vers le Sud, avec un gradient hydraulique de l'ordre de 0.010. Cette piézométrie

a mis en évidence une dépression supérieure à 3 m qui fut observée aux niveaux des points d'eau suivants : F3, F4 et puits de la ferme. Le tarissement de la source de Mougheul commence à s'observer dès le mois de décembre 2009, l'assèchement de la source peut être attribué à la dépression.

5.3. La piézométrie durant l'année 2016

La carte piézométrique de la nappe de Mougheul, dans la période de décembre, 2016 (Fig. IV.6), montre que le sens d'écoulement reste du Nord vers le sud, avec un gradient hydraulique de l'ordre de 0.005 et des dépressions remarquable au niveau des forages (tab.IV.3).

Tableau IV.3: Mesures de la piézométrie année 2009 des forages captant le Jurassique inférieur campagne Décembre 2016 (Aloui et al., 2018).

Forages	Latitudes	Longitudes	Altitudes en m	Profondeurs(m)	Niveau Statique 12/2009 (m)	Niveau piézométrique 2009 (m)
F3	32°01'59"N	02°12'26"W	1034	175	28.4	1005.6
F4	32°01'59"N	02°13'29"W	1033	200	23.2	1009.8
F10	32°01'59"N	02°10'43,1"w	1070	181	45.3	1024.7
F11	32°01'59"N	02°12'1,6"w	1060	200	34	1026
Puits APC1	32°01'59"N	02°13'13"w	1023	15.6	13.8	1009.2
Puits APC2	32°01'59"N	02°13'09"w	1021	8	6.4	1014.6
Puits de la ferme	32°01'59"N	02°11'46"w	1033	20	17.5	1015.5

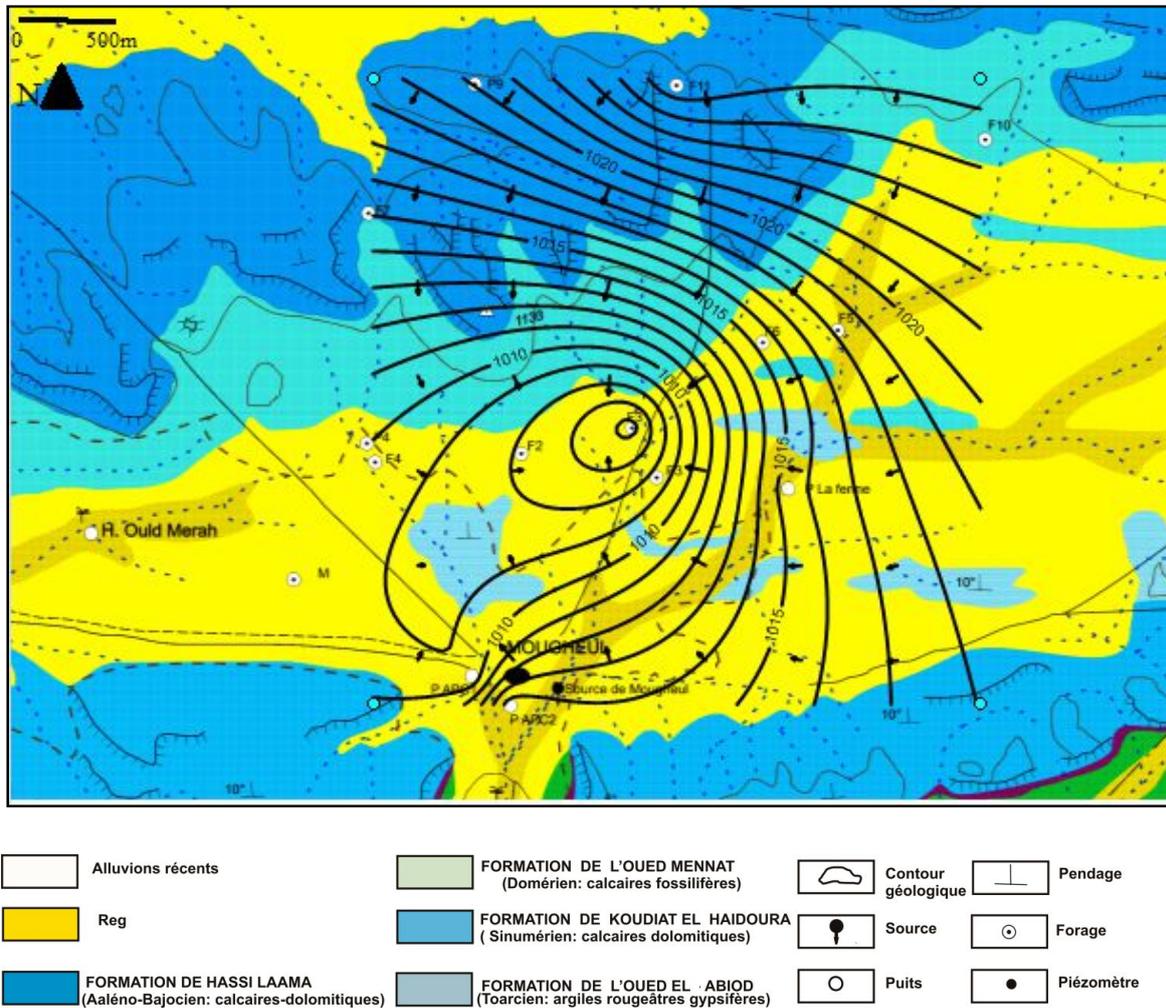


Figure IV.6: Carte piézométrique de la nappe jurassique inférieure de Mougheul (décembre 2016) (Aloui et al., 2018).

6. Calcul des paramètres hydrodynamiques

6.1. Etude de la descente

6.1.1. Essai de pompage au niveau du forage de Menabha (M)

Le forage est situé dans la région de Mougheul, l'essai de pompage est réalisé du 22/10/2001 au 03/11/2001; les données des mesures figurent en annexe N°08.

- Coordonnées géographiques du forage : X = 32°01'38" N, Y= 02°13'57" W, Z= 1026m ;
- Débit de pompage : 6 l/s = 0.006 m³/s ;
- Niveau statique : 10.6 m ;
- Profondeur du forage : 150m ;

La durée de pompage est de 288 heures (12 jours).

Les données d'essai de pompage ont permis de tracer le droit rabattement/ temps du pompage, sur papier semi logarithmique (fig. IV.7).

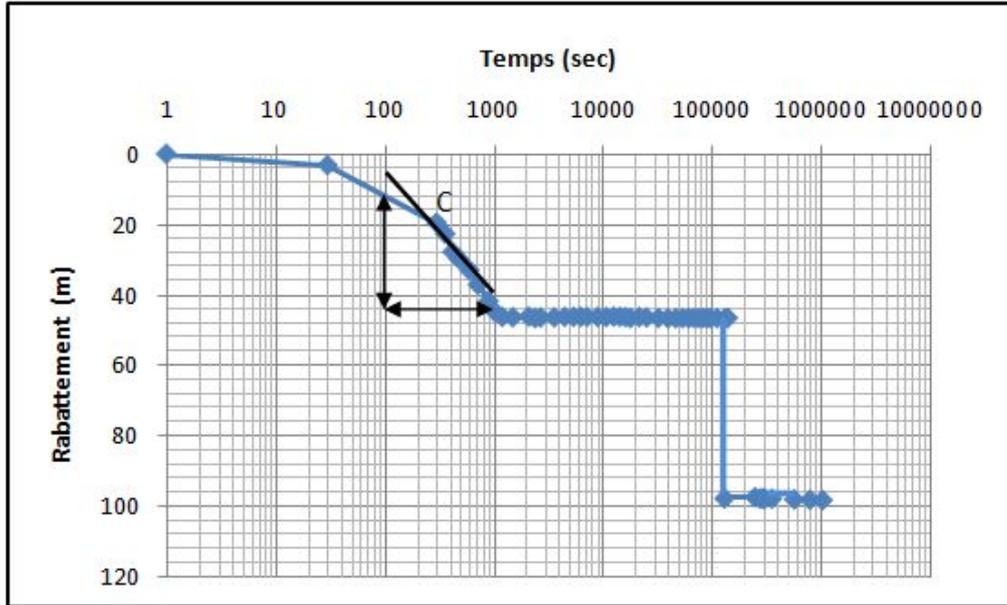


Figure IV.7 : Courbe de la descente (pompage d'essai longue durée) du forage Menabha M.

D'après la figure IV.7, on remarque que cette courbe n'est pas conforme au cas général qui présente une droite à pente constante. Dans ce cas, la portion qu'on peut considérer comme courbe caractéristique correspond à la pente de la courbe qui apparaît à partir du temps $t=30$ sec et qui s'achève au temps $t=1000$ sec (16.66 min). Cette courbe caractéristique nous permet de calculer la pente $c=34$ m, elle sera utilisée dans le calcul de la transmissivité n'a duré que 16.66min ≈ 17 min. Cette courbe elle-même est en réalité divisée en deux petites pentes distinctes qu'on a confondue en une seule.

Sur le deuxième tronçon du graphique, la courbe prend une allure horizontale à l'axe des temps, on est alors en présence d'un régime quasi-permanent qui correspond à une recharge importante de la nappe représentée par une zone d'alimentation qui peut être une faille perméable ou bien un oued. Cette limite apparaît après 1000 sec. (16.66min) au pompage et disparaît à partir du 150 sec (2.5min), le phénomène de la recharge est plus au moins long ($T \approx 27.5$ heures). Une troisième partie de la courbe qui commence après 150000 sec (41.66 heures) de pompage est représentée par une droite parallèle à l'axe des rabattements. Elle correspond à une chute très brusque des rabattements par rapport au temps, cette anomalie de l'essais de pompage peut correspondre à une faille, un biseutage de la formation aquifère ou encore une différence importante dans l'épaisseur de l'aquifère; ces limites peuvent être associées (le rabattement devient constant et correspond à une possibilité de recharge de la nappe).

On peut donc considérer que la première phase du pompage a été déroulée en aquifère illimité d'où l'application de l'expression d'approximation logarithmique de C.Jacob.

$$T = \frac{0.183 \times Q}{C} \quad (IV.1)$$

Avec :

T : la transmissivité en m^2/s .

Q : débit de pompage en m^3/s .

C : la pente sur le graphe.

➤ $T = 0.183 \times 0.006 / 34 = 3.22 \times 10^{-5} m^2/s$.

On note que le forage de Menabha capte toute la formation aquifère, d'où le coefficient de perméabilité (K) est calculé d'après la relation suivante :

$$T = K \times e \quad (IV.2)$$

Où :

e : l'épaisseur de la couche mouillée.

➤ $e = 88 \text{ m}$ donc, $K = T/e = 3.65 \times 10^{-7} m/s$.

6.1.2. Essai de pompage au niveau du forage F2

Ce forage est le plus exploité pour l'alimentation en eau potable de la ville de Béchar et la région de Mougheul, il est actuellement utilisé en plus pour l'irrigation des palmeraies de Mougheul.

Les données d'essais de pompage (22/10/2001 à 03/11/2001) figurent en annexe N°09.

- Les coordonnées géographiques du forage : X = 32°01'51"N, Y = 02°12'53"W, Z = 1032m ;
- Débit de pompage : 30l/s = 0.030 m^3/s ;
- Niveau statique : 23.6 m ;
- Profondeur du forage : 152m ;
- La durée de pompage est de 288 heures.

Les données de l'essai de pompage ont permis de tracer la courbe rabattement/ temps du pompage, sur papier semi logarithmique (Fig. IV.8).

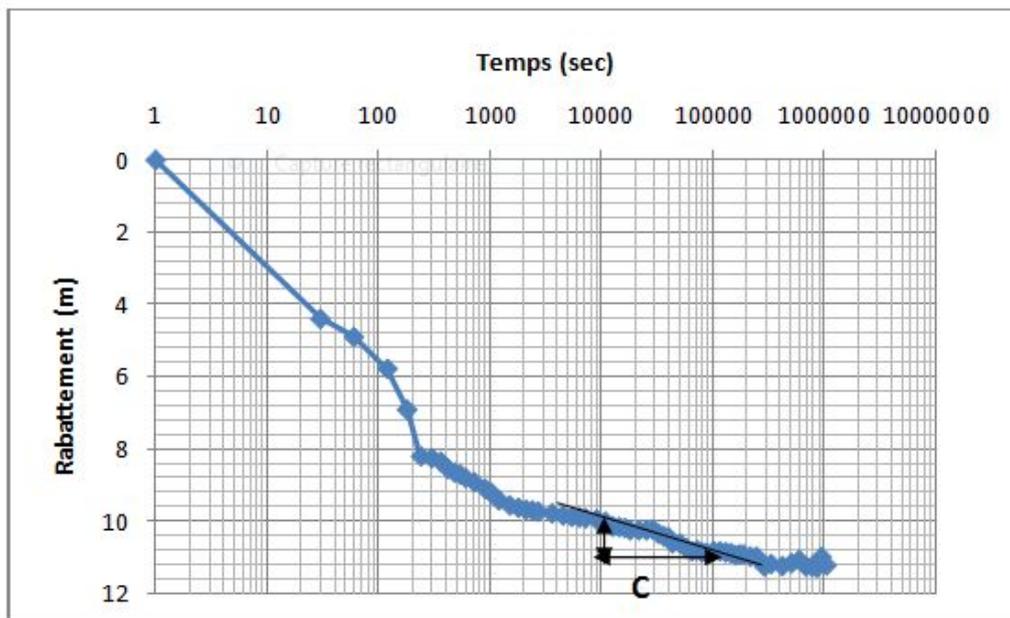


Figure IV.8 : Courbe de la descente (pompage d'essai longue durée) du forage F2.

La courbe de descente peut être divisée en deux tronçons :

- Le premier tronçon correspond à la courbe obtenue juste après le démarrage du pompage jusqu'au temps ($t=200\text{sec}$). Cette première partie de la courbe montre des rabattements importants en fonction du temps, elle annonce la présence d'un régime transitoire.
- La deuxième partie de la courbe commence après 200 sec (3.33min) du pompage, cette courbe a mis en évidence des rabattements très faibles, d'après l'allure de cette courbe on peut dire qu'il s'agit d'une pseudo-stabilisation qui évolue vers une stabilisation. On est au seuil du régime d'équilibre cette diminution du rabattement peut s'expliquer par une bonne alimentation de la nappe qui peut être causée probablement par une limite de recharge environnante. Cette courbe est considérée comme courbe caractéristique :

$$T = \frac{0.183 \times Q}{C} = \frac{0.183 \times 0.03}{1} = 5.49 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

6.1.3. Essai de pompage au niveau du forage F3

Ce forage est également utilisé pour l'alimentation en eau potable de la ville de Béchar, il présente des caractéristiques suivantes:

- Les coordonnées géographiques : $X = 32^{\circ}01'59''\text{N}$, $Y = 02^{\circ}12'26''\text{W}$, $Z = 1034\text{m}$;
- Débit de pompage : $20\text{l/s} = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Niveau statique : 23.4 m ;

- Profondeur du forage : 175 m.

Le piézomètre Pz3 se caractérise par les coordonnées géographiques $X = 32^{\circ}02'00''N$, $Y = 02^{\circ}12'27''W$, $Z = 1034.5m$; La distance entre le forage F3 et Pz3 est de 22m.

-Le temps du pompage n'a duré que 172 heures (le 22/10/2001).

Les données des mesures figurent en annexe N°10 et les résultats ont permis de tracer une droite rabattements- temps (Fig. IV.9).

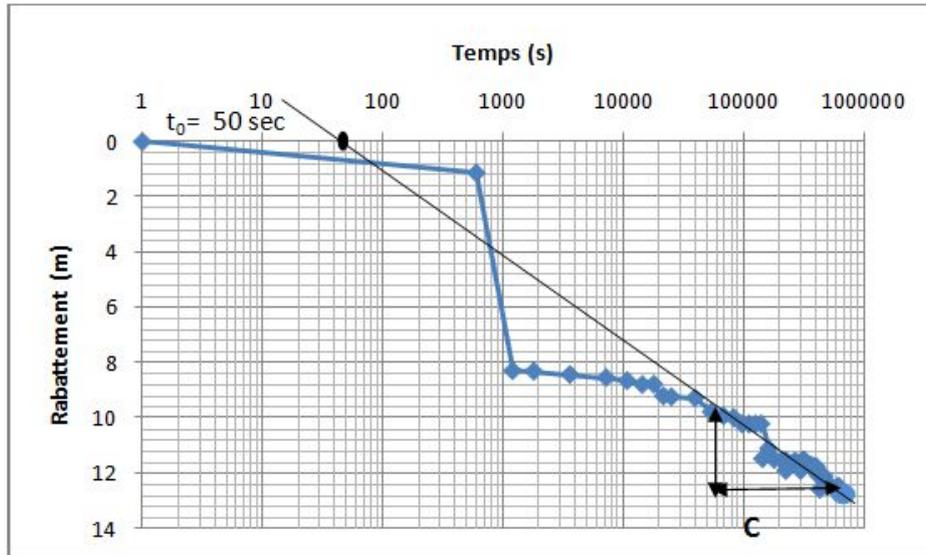


Figure IV.9 : Courbe de la descente (pompage d'essai longue durée) du forage F3.

La courbe de descente (fig.IV.9) présente une chute importante de rabattement après $t=600\text{sec}$ (10min) du pompage, cette descente du niveau d'eau nous laisse supposer qu'on se trouve à la présence d'une limite étanche correspondant probablement dans notre cas à une faille identifiée auparavant dans l'étude de la tectonique locale du site d'étude (fig. IV.9).

Le deuxième tronçon de la courbe débute de 1300 sec. (21.66min) à 20000 sec. (5.55heures) ici la courbe montre une recharge de la nappe justifiée par une nette diminution des rabattements, cette recharge qui n'est pas assez importante dans le temps peut être favorisée par une structure hydrogéologique qui n'est pas identifiée; de 20000sec (5.55 heures) jusqu'à la fin du pompage la courbe montre de nouveau une chute de rabattement moins importante que la première qui s'aligne suivant une droite qu'a été prise dans ce cas comme courbe caractéristique. Toujours selon l'approximation logarithmique de C. Jacob on a :

$$T = \frac{0.183 \times Q}{C} = \frac{0.183 \times 0.02}{2.8} = 1.30 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Ce forage nous offre la possibilité de calculer le coefficient d'emmagasinement (S) qui est donné par la relation suivante :

$$S = \frac{2.25 T \times t_0}{r^2} \quad (IV.3)$$

Avec :

r^2 : la distance entre le puits et le piézomètre PZ3.

T : la transmissivité en m^2/s .

t_0 : on le détermine à partir le graphe $t_0 = 50$ sec.

Le piézomètre Pz3 se caractérise par les coordonnées suivantes :

X = 32°02'00"N, Y = 02°12'27"W, Z = 1034.5m ; la distance entre le forage F3 et Pz3 est de 22m.

Donc le coefficient d'emmagasinement sera de : 3.03×10^{-4}

6.1.4. Essai de pompage au niveau du forage F5

Le forage F5 de 150 m de profondeur, caractérise par:

- Les coordonnées géographique : X = 32°02'12"N, Y = 02°11'32" W, Z = 1044m ;
- Débit de pompage : $11l/s = 0.011 m^3/s$;
- Niveau statique : 28.08 m ;
- La durée de pompage est de 288 heures.

Les mesures figurent en annexe N°11.

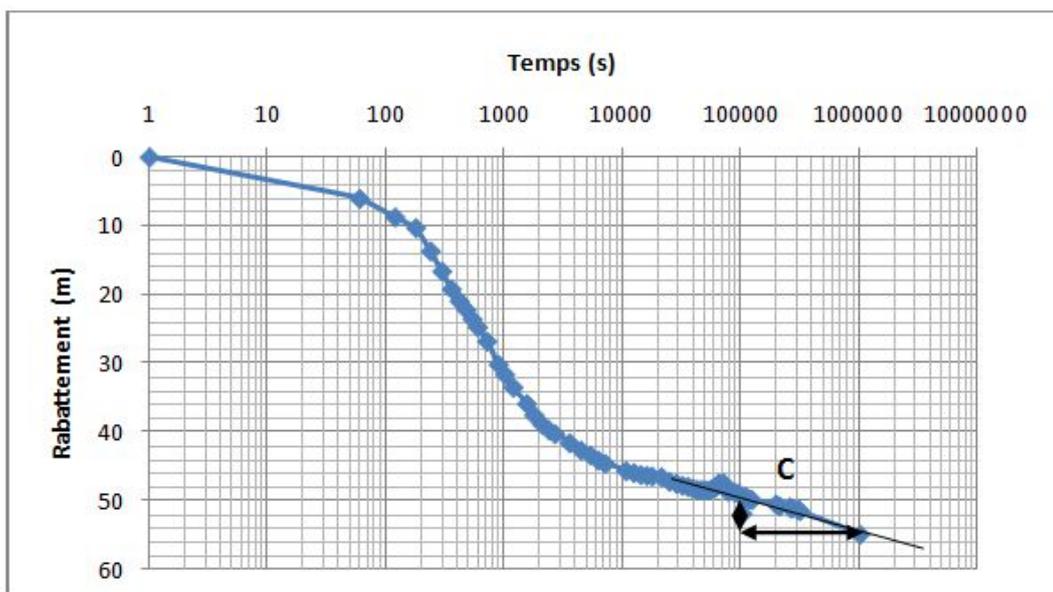


Figure IV.10 : Courbe de la descente (pompage d'essai longue durée) du forage F5

La courbe de la descente (fig.IV.10) peut être interprétée comme suite :

A 2.5min soit $t=150\text{sec}$ du début du pompage une chute brusque des rabattements apparait sur la courbe, cette anomalie de l'essai du pompage est probablement due à la même limite imperméable qui s'est manifestée dans le pompage du forage F3, les deux forages se trouvent non loin de la faille qui jalonne le secteur Nord-Est et Sud-Ouest. A la fin de la manifestation de la limite étanche, à partir du temps $t= 300\text{sec}$ (5min) et jusqu'à la fin du pompage les rabattements décroissent au fur et mesure pour s'organiser suivant une courbe à pente faible, c'est la courbe caractéristique du pompage.

➤ $C= 4\text{m}$, donc $T= 5.03 \times 10^4 \text{m}^2/\text{s}$.

6.1.5. Essai de pompage au niveau du forage F10

Ce forage a été réalisé en 2009, le pompage d'essai a été fait au mois d'Aout pendant une durée de 72 heures, les caractéristiques de ce forage sont:

- Les coordonnées géographiques : $X = 32^\circ 02' 40,5''\text{N}$, $Y = 02^\circ 10' 43,1''\text{W}$, $Z=1070\text{m}$;
- Débit de pompage : $18\text{l/s} = 0.018 \text{m}^3/\text{s}$;
- Niveau statique : 40.25m ;
- Profondeur du forage ; 181m .

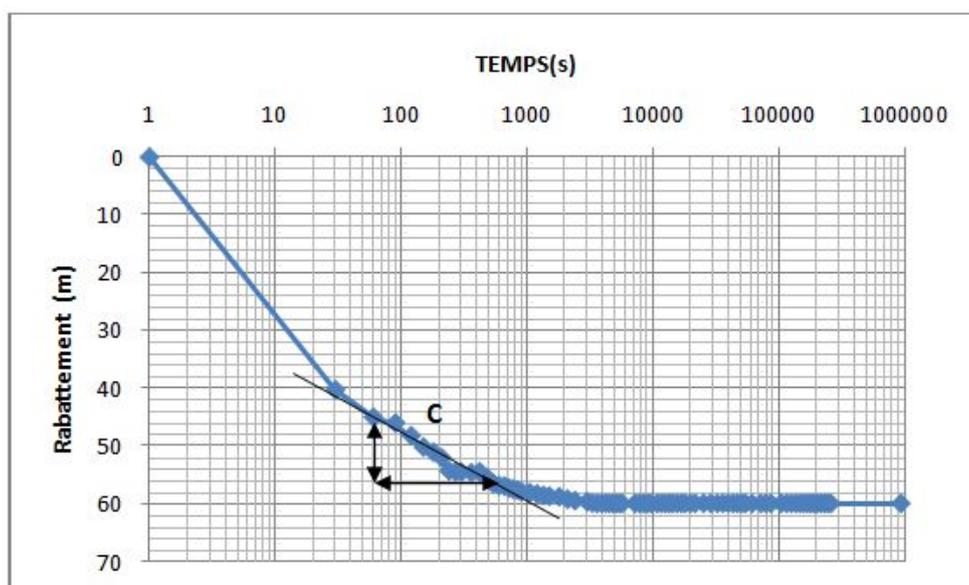


Figure IV.11 : Courbe de la descente (pompage d'essai longue durée) du forage F10.

Les mesures figurent en annexe N°12. La droite rabattement/ temps du pompage (fig.IV.11) montre deux tronçons :

- Le premier tronçon correspond à la droite comprise entre le début du pompage et le temps $t = 80$ sec :
 - Le deuxième tronçon de la courbe qui est important donne des indications très importantes sur l'alimentation de la nappe, nous sommes en régime permanent ou d'équilibre obtenu par l'action d'une limite d'alimentation qui reste non identifiée. C'est au niveau de cette stabilisation du niveau d'eau que la courbe a été choisie :
- La pente $C = 10$ m permet de calculer la valeur de la transmissivité :

$$T = 3.29 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}.$$

6.1.6. Essai de pompage au niveau du forage F11

Ce forage a été réalisé en 2009, il présente les caractéristiques suivantes :

- Les coordonnées géographiques : $X = 32^{\circ}03'01''\text{N}$, $Y = 02^{\circ}12'1,6''\text{W}$, $Z = 1060\text{m}$;
- Débit de pompage : $13.5\text{l/s} = 0.0135 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Niveau statique : 29 m ;
- La durée de pompage est de 72 heures ;
- Profondeur du forage : 200 m .

Les données des mesures figurent en annexe N°18, les résultats ont permis de tracer une droite rabattements / temps du pompage (Fig.IV.13).

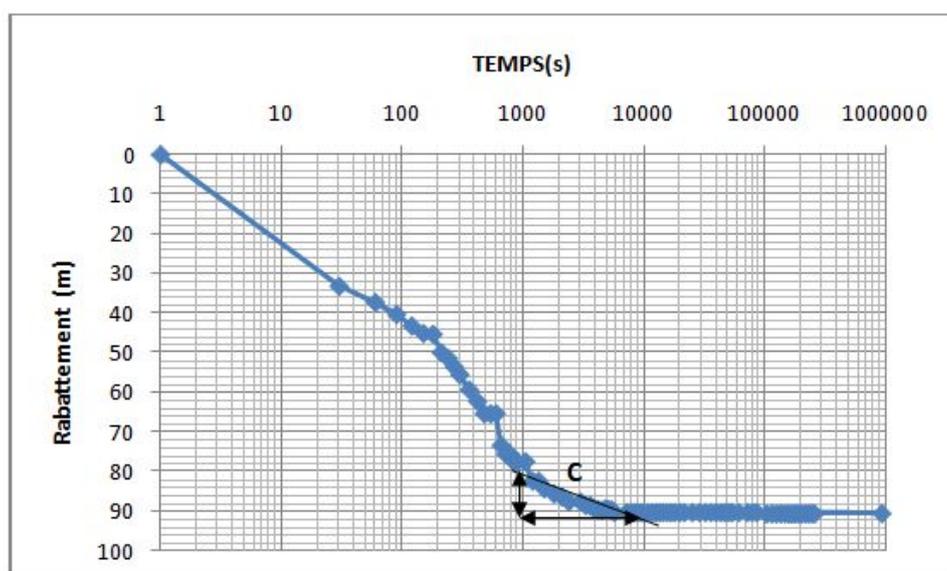


Figure IV.12 : Courbe de la descente (pompage d'essai longue durée) du forage F11.

Cette courbe ressemble beaucoup à celle obtenue sur le forage F10, et nous laisse interpréter cette courbe de la même façon qu'auparavant (F10).

La stabilisation du niveau d'eau est provoquée par une limite de recharge qui peut être la même que celle présente sur la descente du forage F10.

On remarque que la droite de la descente de ce forage (Figure IV.12) présente presque les mêmes caractéristiques que celles du forage F10, ainsi la pente est égale à 11 m et :

$$T = 2.24 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s},$$

L'épaisseur de l'aquifère est de l'ordre 127m et

Le coefficient de perméabilité $K = 1.76 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

6.2. Etude de la remontée

La remontée a été étudiée sur cinq forages au niveau de la région de Mogheul : (Menabha) M, F2, F3, F4, F5, les données des mesures figurent en annexe N°14, 15,16 ,17 et 18 et les résultats ont permis de tracer des droites qui représentent les rabattements résiduels-temps (Figure III.13, 12,.. et17).

6.2.1. La remontée dans le forage M (Menabha)

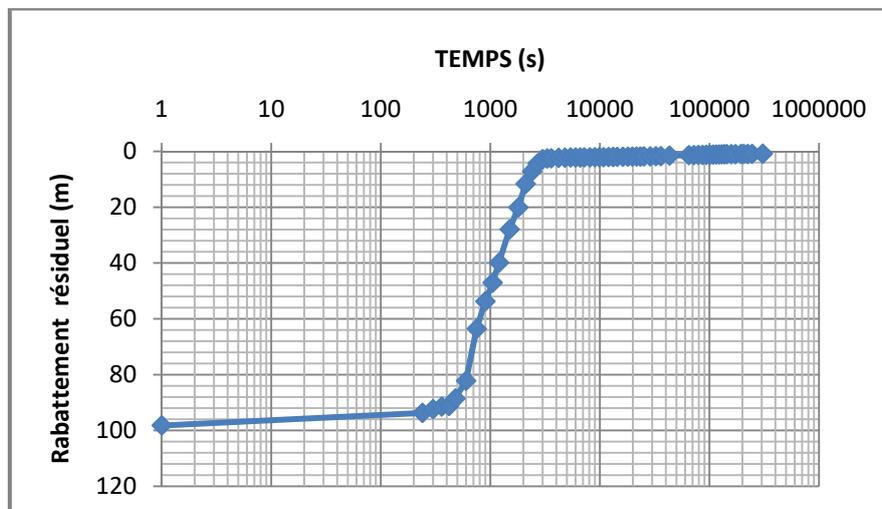


Figure IV.13 : Courbe de la remontée dans le forage Menabha M.

L'étude de la courbe de la remontée (fig.IV. 13) permet de distinguer deux droites distinctes avant d'atteindre une stabilisation; la première droite correspond à une remontée très lente du niveau d'eau, cette phase commence dès l'arrêt du pompage jusqu'au temps $t = 300 \text{ sec}$ (5min). Au delà la courbe montre une deuxième droite témoignant d'une remontée très rapide du niveau d'eau dans le forage, cette droite se termine au temps $t = 3000 \text{ sec}$ (50min), ensuite on observe une stabilisation.

La droite de remontée très rapide est provoquée très probablement par une limite très perméable qui malheureusement reste inconnue mais qui a été décelée auparavant par la descente ce qui a entraîné une très bonne recharge de la nappe aquifère.

6.2.2. La remontée dans le forage F2

Les données de la remontée au niveau du forage F2 ont permis de tracer la courbe de remontée (rabattement résiduel/ temps) (fig.IV.14).

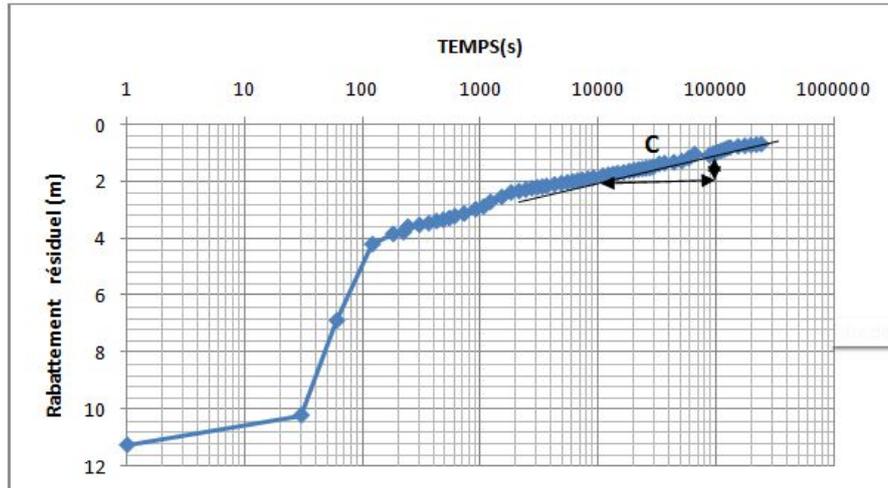


Figure IV.14 : Courbe de la remontée dans le forage F2.

L'interprétation de cette courbe montre qu'à partir du temps $t=30$ sec les points des rabattements résiduels s'alignent suivant deux droites à pentes différentes. La première droite du $t=30$ sec à $t=150$ sec (2.5min) montre une remontée très importante, cette partie de la courbe laisse supposer une limite de recharge (faille), qui est masquée ou discrète sur la courbe de descente qui ne dure 120sec (2min). Au delà on observe une remontée lente se traduisant par une droite à pente faible correspondant à une pseudo-stabilisation. Cette courbe nous permet de calculer la transmissivité :

$$T = \frac{0.183 \times Q}{C} = \frac{0.183 \times 0.03}{1} = 5.49 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

On remarque que les valeurs de la transmissivité calculées à partir de la descente et de la remontée sont égales.

6.2.3. La remontée dans le forage F3

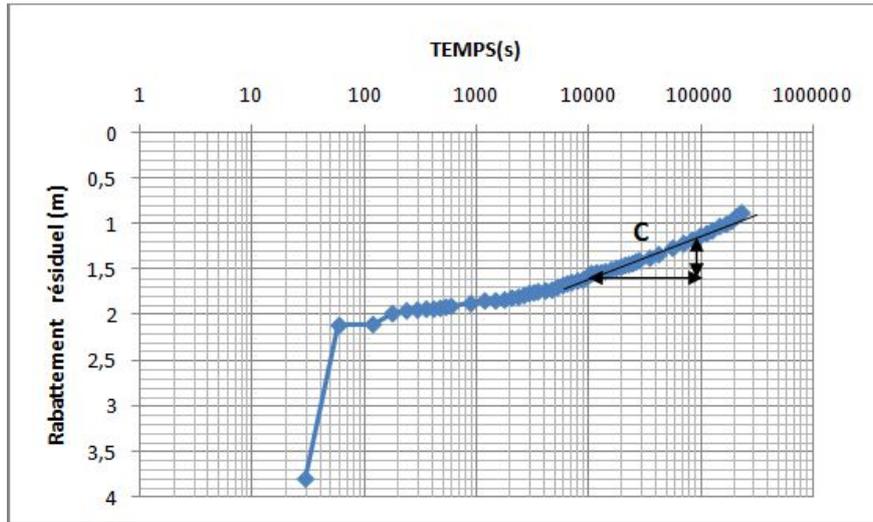


Figure IV.15 : Courbe de la remontée dans le forage F3.

La courbe de remontée (fig.IV.15) a mis en évidence deux droites à pentes différentes. La première droite correspondant à une remontée très rapide qui s'explique par la présence d'une limite d'alimentation perméable dans les environs. Après cette remontée rapide, et juste au temps du 60sec, une deuxième droite se dessine qui correspond à une remontée moins importante que la première, la stabilisation du niveau d'eau n'est pas atteinte. Cette droite permet de calculer la transmissivité :

$$T = \frac{0.183 \times Q}{C} = \frac{0.183 \times 0.02}{0.5} = 7.32 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

6.2.4. La remontée dans le forage F5

La courbe de la remontée (fig. IV.16), obtenue à partir de l'essai de la remontée montre deux droites, et peut être interpréter comme celle du forage F3, sauf que cette courbe (deuxième droite) mis en évidence une stabilisation au niveau d'eau, on peut dire que le régime d'équilibre a été atteint dès le temps 800 sec (13.33min). La première droite qui précède la stabilisation correspond à une rapide remontée due à une limite de recharge qui n'est pas identifiée.

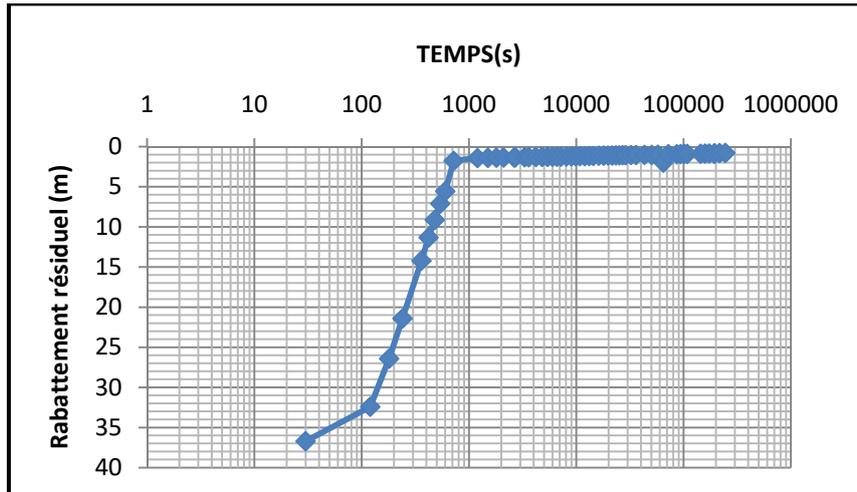


Figure IV.16: Courbe de la remontée dans le forage F5.

6.2.5. La remontée dans le forage F4

Pour le forage F4, il est noté qu'au cours de premières heures les niveaux dynamiques de la descente n'ont pu être mesurés avec exactitude à cause d'une sonde qui s'est avérée défectueuse.

Les calculs de la transmissivité sont réalisés à partir du graphe de la remontée représenté dans la figure IV.15.

Ce forage est caractérisé par:

- Les coordonnées géographiques : X = 32°01'57"N, Y= 02°13'29"W, Z=1033m ;
- Débit de pompage : 12l/s = 0.012 m³/s (pompage d'essai le 22/10/2001) ;
- Niveau statique : 18.1 m ;
- Profondeur du forage : 200m.

La pente égale de 58m et la transmissivité (T) = 3.79×10^{-5} m²/s.

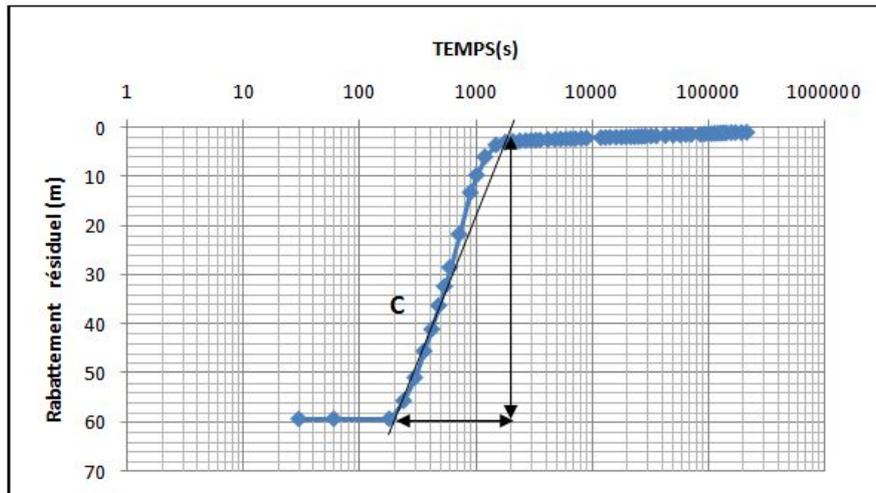


Figure IV.17 : Courbe de la remontée dans le forage F4

En résumé les résultats de calcul dans le tableau IV.4 ci-dessous.

Tableau IV. 4: Les résultats de calcul des caractéristiques hydrodynamiques (T.K.S) de l'aquifère de la plaine de Mougheul.

Nom du forage	Transmissivité (descente) (m ² /s)	Transmissivité (remonté) (m ² /s)	Perméabilité (m/s)	Coefficient d'emmagasinement
M	$3,22 \times 10^{-5}$	*	$3,65 \times 10^{-7}$	-
F2	$5,49 \times 10^{-3}$	$5,49 \times 10^{-3}$	+	-
F3	$1,30 \times 10^{-3}$	$7,32 \times 10^{-3}$	+	$3,03 \times 10^{-4}$
F4	/	$3,79 \times 10^{-5}$	+	-
F5	$2,87 \times 10^{-4}$	*	+	-
F10	$3,29 \times 10^{-4}$	*	+	-
F11	$2,24 \times 10^{-4}$	*	$1,76 \times 10^{-6}$	-

* : La courbe obtenue ne permet pas de calculer la transmissivité.

+ : Forage incomplet.

- : Le manque de données ne permet pas de calculer cette caractéristique hydrogéologique.

La transmissivité est un paramètre hydrodynamique essentiel dans l'étude des nappes aquifères, les résultats des essais de pompage ont permis de tracer une carte d'égal transmissivité (figure IV.18).

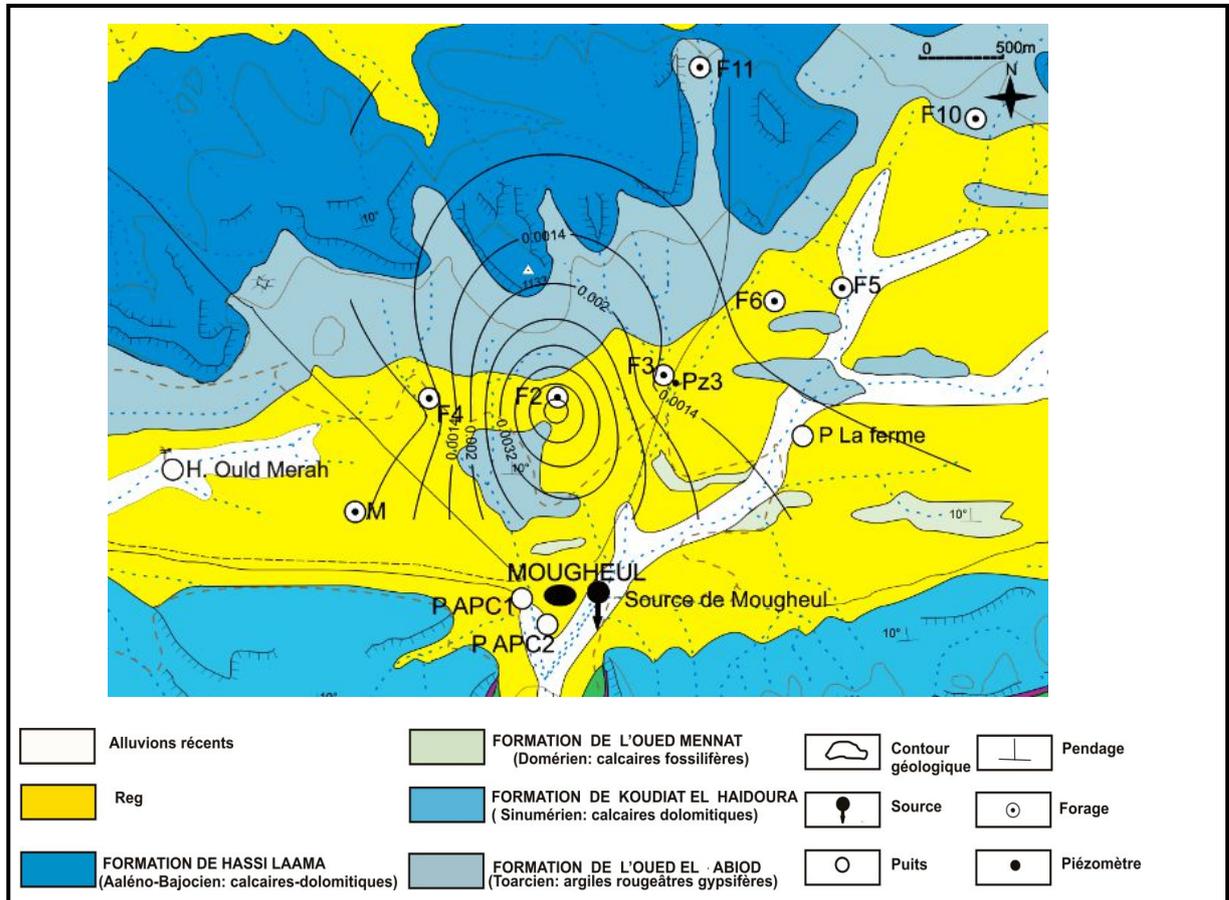


Figure IV.18 : Carte d'égal transmissivité de la nappe de Mougheul.

La figure IV.18, montre que les valeurs de la transmissivité augmentent en allant vers le forage F2, sachant que ce dernier est exploité avec un plus grand débit par rapport aux autres forages existants dans la région.

6.3. Essais de puits par paliers de débits de courtes durées

Les essais de puits par paliers de débits de courtes durées (1 heure pour chaque palier suivi d'une observation de la remontée pendant une durée égale à 1 heure) ont fait l'objet d'une opération en date du 28/01/1998. Les mesures sont portées au tableau IV.5.

Tableau IV. 5: Essais du pompage de courte durée du forage F4.

Palier	Débits (m ³ /h)	Rabattement (m)	Débits spécifiques (m ³ /h.m)	Rabattement spécifiques (m/m ³ /h)
1	0	0	0	0
2	28.8	18.3	1.57	0.63
3	37.48	26.7	1.40	0.71
4	43.63	31.7	1.37	0.72

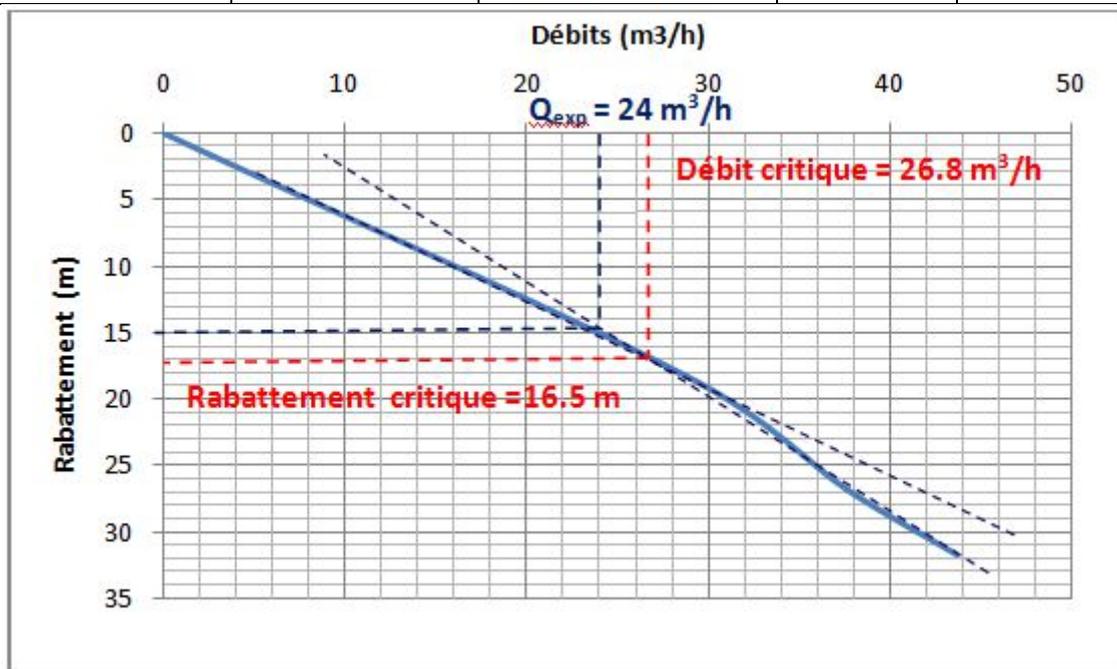


Figure IV.19 : Courbe caractéristique (Débits/Rabattements) du forage F4.

Selon la courbe caractéristique ci-dessus (fig. IV.19) du forage F4, le débit critique est de $26.8 \text{ m}^3/\text{h}$ soit environs 7.33 l/s , le rabattement critique est de 16.5 m . Pour le débit d'exploitation on choisira un débit inférieur au débit critique qui est de l'ordre de $Q_{exp} = 24 \text{ m}^3/\text{h}$ d'où un rabattement de 15 m .

Pour la courbe caractéristique du forage F5 (fig. IV.20) qui représente un essai de puits de courte durée (1 heure) a été réalisé le 20/09/2000 (tab. IV.6).

Tableau IV. 6: Essais du pompage de courte durée du forage F5.

Palier	Débits (m ³ /h)	Rabattement (m)	Débits spécifiques (m ³ /h. m)	Rabattement spécifiques (m/m ³ /h)
1	0	0	0	0
2	11	28	0.39	2.54
3	28	72	0.38	2.57
4	36	96	0.37	2.66

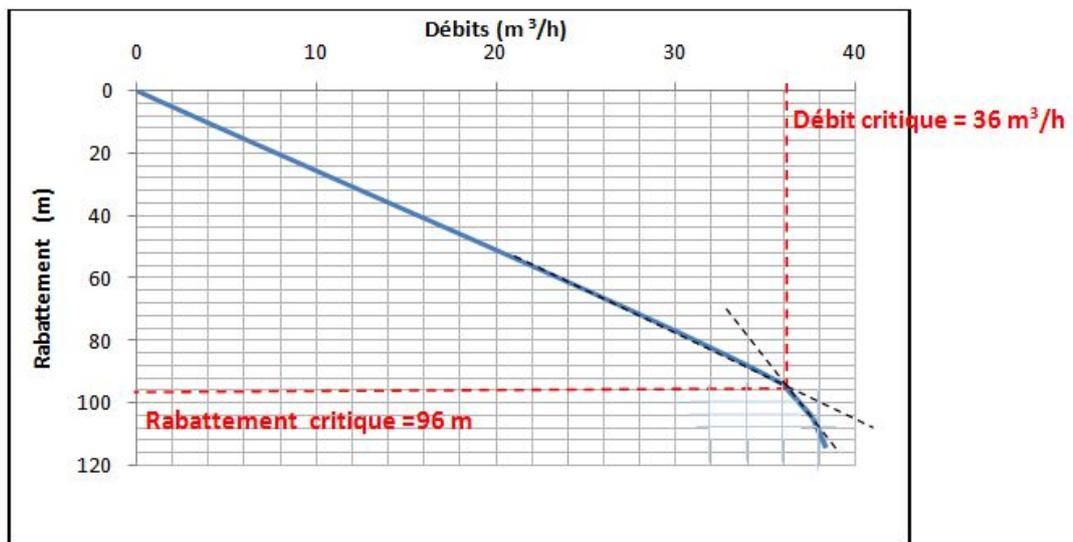


Figure IV.20: Courbe caractéristique (Débits/Rabattements) du forage F5.

Le débit critique est de 36 m³/h, soit environ 10 l/s. le rabattement critique est de 96 m. le débit d'exploitation doit être inférieur au débit critique.

7. Calcul du rayon fictif (R_f) du forage (F3)

On appelle rayon fictif (R_f) d'un forage la distance à laquelle le rabattement calculé par l'expression de C.E. Jacob est nul ou négligeable ; le rayon est fonction de la transmissivité et du coefficient d'emménagement, on note que seul le forage F3 offre la possibilité de calculer ce rayon.

R_f : est donné par la relation suivante :

$$R_f = 1.5 \times \frac{\sqrt{T \times t_p}}{\sqrt{S}} \quad (IV.4)$$

Avec :

R_f : le rayon fictif en m.

T : la transmissivité en m^2/s .

t_p : la durée totale de pompage en s.

S : coefficient d'emmagasinement.

Une fois le rayon fictif calculé, il sera utilisé par la suite dans la délimitation de la zone d'influence du forage considéré qui est la zone d'appel des eaux pompées vers le forage.

➤ Dans notre cas $t_p = 619200s \Rightarrow R_f = 2445m = 2.445Km$.

Cette valeur nous a permis de tracer approximativement le cercle d'influence du forage F3 (fig. IV.21).

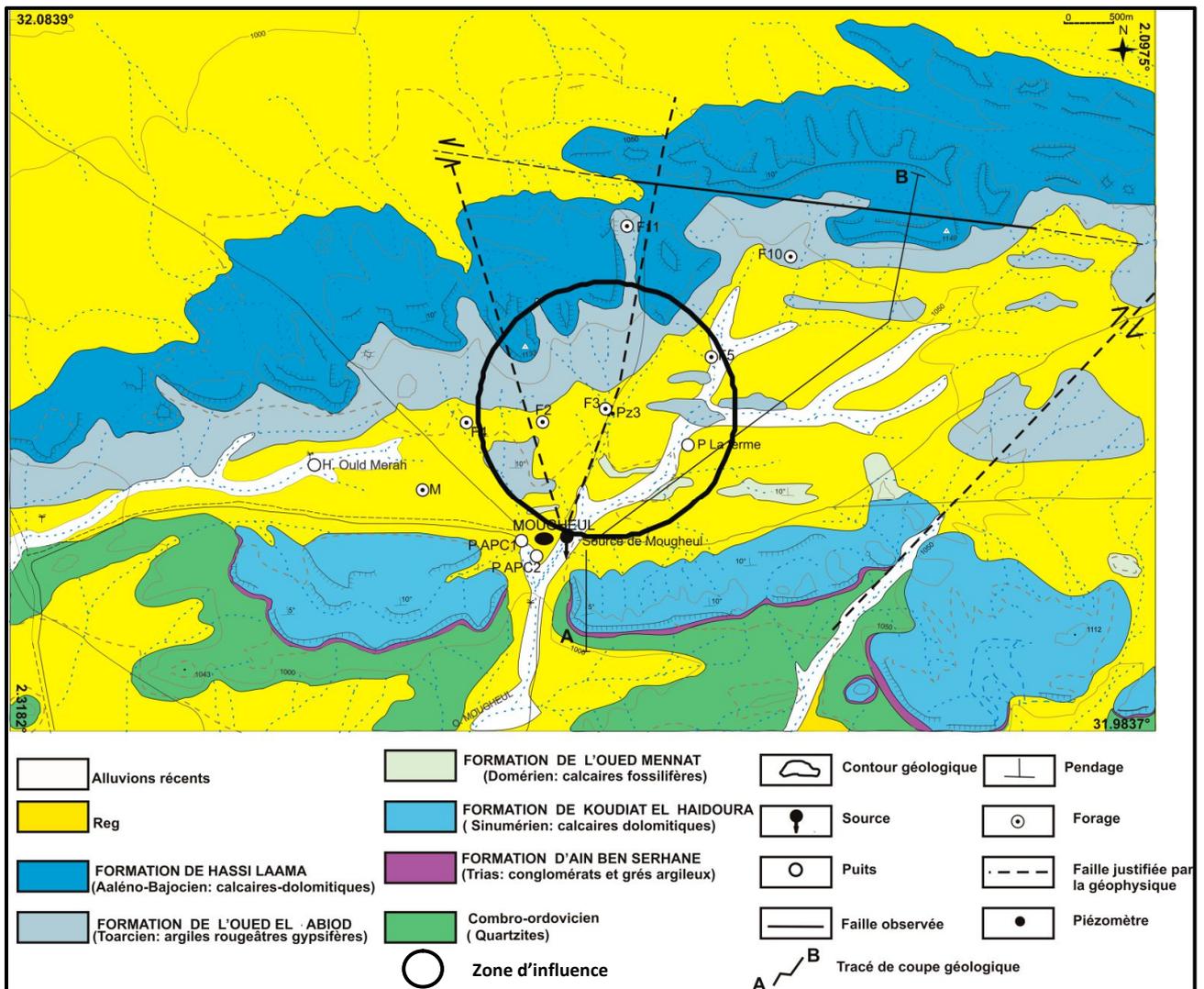


Figure IV.21 : Zone d'influence du forage F3.

On remarque que cette zone comprend aussi les forages F2, F5, le puits de la ferme et la source de Mougheul qui se positionne juste à la limite de ce cercle.

Cette zone est le siège d'un pompage simultané de tous les forages se trouvant à l'intérieur, qui au cours du temps à provoquer sans doute une intense interférence traduisant une nette augmentation des rabattements au niveau des forages. Cette interférence constitue très probablement la cause principale de l'assèchement de la source de Mougheul qui se trouve en aval de l'axe de drainage des eaux de la nappe faisant l'objet de cette approche hydrogéologique.

8. Conclusion

La nappe de la région de Mougheul est une nappe semi captive d'une épaisseur moyenne de 64m contenue dans les calcaires dolomitiques très fissurés du Jurassique inférieur de la formation de Koudiat El Haïdoura.

La piézométrie a montré que l'écoulement principal des eaux se fait du Nord vers le Sud, exactement vers la source de Mougheul.

Le calcul de la transmissivité à partir des essais de pompage a donné des valeurs faibles variant entre 3.22×10^{-5} m²/s pour le forage Menabha, 5.49×10^{-3} m²/s pour le forage F2 ; les rabattements sont considérables dans presque tous les forages et atteignent 98.2m dans le forage Menabha se situant à l'Ouest du secteur d'étude.

Donc, dans l'absence d'une étude bien détaillée du bilan des nappes dans la région des Ksour du Nord, on peut considérer que la partie de la nappe de jurassique inférieur (Mougheul) étudiée est surexploitée, d'où l'assèchement de la source de Mougheul.

Chapitre V

L'hydrochimie de la région d'étude

1. Introduction

La qualité des eaux souterraines a des facettes multidimensionnelles qui sont des éléments très importants des ressources en eau (**Srivastava et al. 2008, 2012; Singh et al. 2012**). Par conséquent, la surveillance et la conservation des ressources en eaux de surface et souterraines sont très nécessaires pour un environnement durable et pour satisfaire la demande en eau douce (**Sun et al. 1992**).

Dans les zones arides, la pression sur les ressources en eau et en particulier sur les ressources en eaux souterraines est en augmentation constante, principalement en raison de l'augmentation de la demande et de la détérioration de la qualité de l'eau. Dans ce contexte, le présent travail vise à suivre l'évolution annuelle, entre 2009 et 2019 des paramètres physico-chimiques, à identifier les faciès chimiques des eaux et à évaluer la qualité des eaux souterraines de la région des Ksour du Nord (cas de la nappe de Mougheul).

2. Échantillonnage et méthodes d'analyse

Afin de mettre en évidence et d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région d'étude, un réseau d'échantillonnage de 07 points d'eau au niveau de Mougheul (fig.V.1) a été mis en place pour permettre la collecte de données. Les analyses physico-chimiques ont été réalisées au cours des années 2009-2019. Les méthodes décrites par **Rodier, 1996** ont été suivies lors des travaux sur le terrain et en laboratoire. Le but était de s'assurer que les échantillons d'eau représentaient vraiment les liens et les conditions appropriés de l'environnement souterrain. De l'eau a été pompée du puits jusqu'à ce que la température, la CE et le pH deviennent constants. Les échantillons collectés ont été analysés pour les éléments majeurs (cations, anions) et TDS. Les concentrations de Na^+ et K^+ ont été déterminées à l'aide d'un photomètre, les concentrations de Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- et Cl^- par la méthode de titrage volumétrique et les anions SO_4^{2-} et NO_3^- par spectrophotométrie (**kendouci et al.2016**). Le calcul de l'erreur d'équilibre ionique est évalué en prenant la relation entre les cations totaux et les anions totaux pour chaque échantillon d'eau. Il est admis que l'équilibre anion-cation peut être inférieur à $\pm 5\%$ (**Domenico et al, 1997**).

Le logiciel: «Diagram Software of the Avignon Hydrogeology Laboratory (Roland Simler 2003-2019) version 6.6.» est utilisé pour établir les différents diagrammes tels que, Piper, SchöellerBerkaloff, et Wilcox, le logiciel « Surfer version 9 » est utilisé pour réaliser la carte de vulnérabilité.

Les coordonnées géographiques (X, Y, Z) de chaque point ont été déterminées à l'aide d'un GPS (Global Positioning System) (tab.V.1).

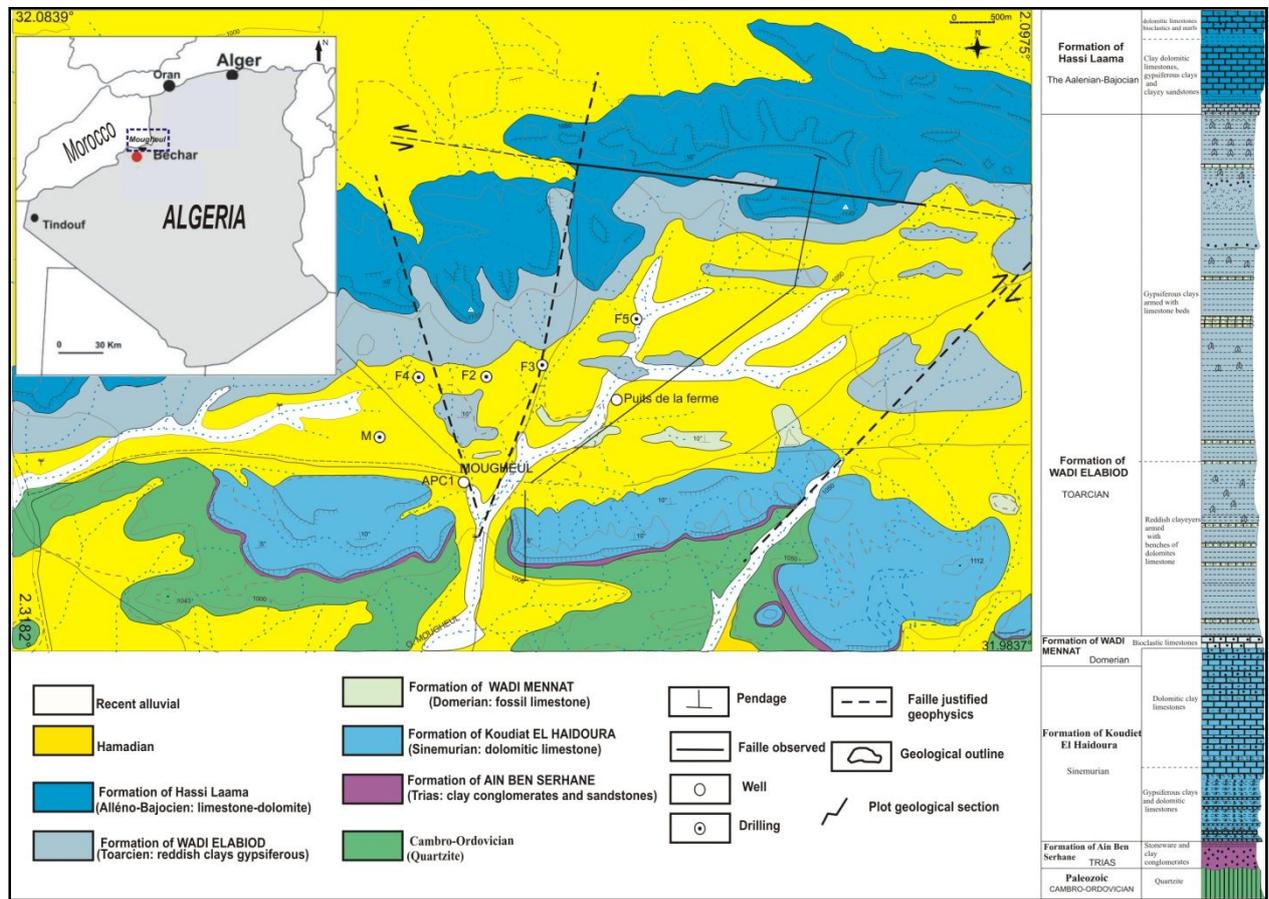


Figure V.1 : Carte de localisation de la nappe de Mougheul montrant les sites d'échantillonnage.

Tableau V.1 : Caractérisation des points d'eau.

Points d'eau	latitudes	Longitude	Altitude (m)	profondeur (m)
M	32°01'38"N	02°13'57"W	1026	150
F2	32°01'51"N	02°12'53"W	1032	152
F3	32°01'59"N	02°12'26"W	1034	175
F4	32°01'57"N	02°13'29"W	1033	200
F5	32°02'12"N	02°11'32" W	1044	150
APC1	32°01'16"N	02°13'13"W	1023	15.6
Puits de la ferme	32°01'54"N	02°11'46"W	1033	20

3. Résultats et discussion

3.1. Faciès chimiques des eaux souterraines

L'interprétation des résultats des analyses a pour but de déterminer les faciès chimiques et d'effectuer une comparaison spatio-temporelle. La méthode de Schöeller et Berkalof (1935–1938) est ici utilisée pour déterminer le chimisme des eaux des échantillons prélevés. Se référant au schéma de Schöeller et Berkalof (Fig. V.2a) nous avons constaté que les eaux du forage F5 ont un faciès bicarbonaté-calcique. Les autres points d'eau ont un faciès bicarbonaté- magnésien. Pour les échantillons des campagnes 2009 et 2019 (Fig.V.2b), il existe une variation notable dans le forage F5 qui prend le faciès bicarbonaté- magnésien.

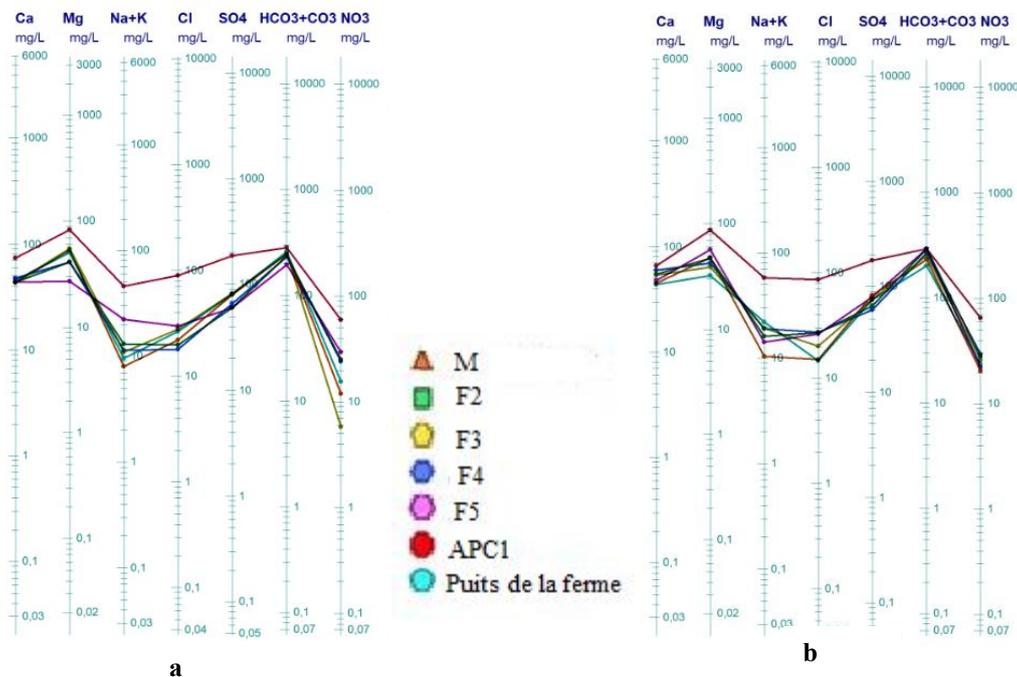


Figure V.2 : Diagramme d'analyse Schöeller-Berkaloff campagnes 2009 et 2019

Le diagramme triangulaire de Piper comprend trois triangles (**Back et Hanshaw, 1965**) qui définissent les subdivisions du champ de dominance et qui représentent le type ou les catégories d'eau qui forment la base d'un système de classification commun pour les eaux naturelles.

La représentation des données sur le diagramme triangulaire des compagnes 2009 et 2019 (Fig.V.3) montre que l'eau du puits APC1 a un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, les autres points d'eau ont un faciès bicarbonaté calcique et magnésien.

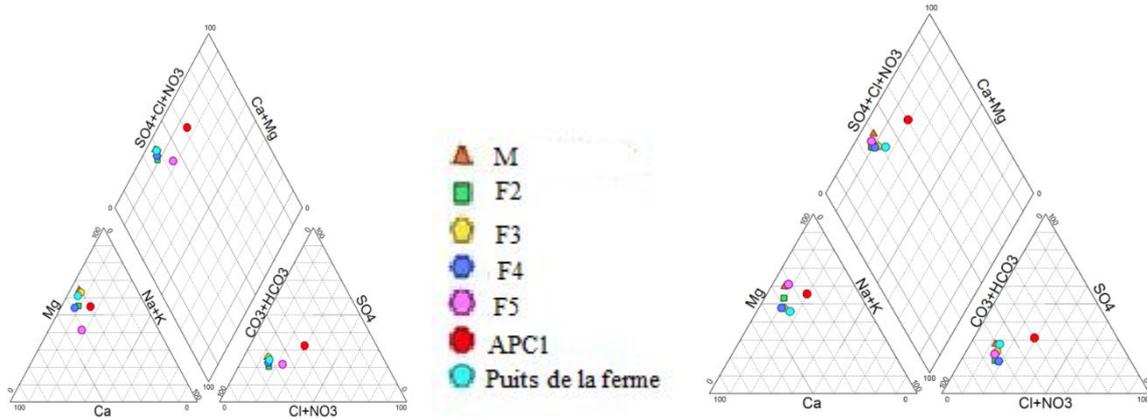


Figure V. 3: Diagramme triangulaire de Piper compagnes 2009 et 2019

3.2. Qualité de l'eau d'irrigation

Les eaux souterraines sont devenues la principale source d'utilisation dans le secteur agricole dans de nombreux pays où les systèmes fluviaux et de drainage sont insuffisants. La mauvaise qualité des eaux souterraines (pollution des nappes) constitue une source de préoccupation dans d'irrigation ces dernières années (Rawat et al., 2018).

La zone d'étude est caractérisée par un climat sec où la salinisation et l'alcalinisation des eaux sont les principaux risques pour d'irrigation. La classification des eaux d'irrigation sera utilisée à partir du SAR.

3.2.1. Classification en fonction du Sodium absorbé par le sol « SAR »

Cette classification nécessite une évaluation de la concentration des ions Na^+ dans le sol qui remplace le calcium ou le magnésium dans le complexe en suivant la relation (Eq. V.1) (Appelo et al., 1993; Batram et al.,1999).

$$SAR = Na^+ / [(Ca^{+2} + Mg^{+2})/2]^{1/2} \dots\dots\dots (Eq.V.1)$$

Où les concentrations d'ions Na^+ , Ca^{+2} et Mg^{+2} sont exprimées en meq / l.

Sur la base de la plage de SAR, l'eau d'irrigation peut être classée en quatre classes : ainsi un SAR inférieur à 10 détermine une eau idéale ou excellente, un SAR compris entre 10–18 donne une bonne eau, un SAR compris entre 18–26 une eau convenable enfin un SAR supérieur 26 témoigne d'une eau médiocre.

Les valeurs de SAR pour les eaux de la nappe étudiée sont inférieures à 10, la qualité de l'eau destinée à l'irrigation est excellente (tab.V.2).

La qualité de l'eau d'irrigation n'est pas uniquement déterminée par le SAR de l'eau mais aussi par les effets de l'évapotranspiration sur l'augmentation de la concentration d'ions et les phénomènes de précipitation de la calcite (**Appelo et al., 1993**).

Tableau V.2: Classes de danger d'alcalinité des eaux souterraines de la nappe de Mougheul.

SAR	M	F2	F3	F4	F5	APC1	Puits de la ferme
Max (année)	2,88 (2015)	1,99 (2019)	2,56 (2018)	2,24 (2018)	3,35 (2009)	6,42 (2019)	3,45 (2019)
Min (année)	1,00 (2009)	1,50 (2011)	1,42 (2009)	1,15 (2010)	1,26 (2014)	4,83 (2009)	1,00 (2013)
class. De l'eau	Excellente						

3.2.2. Le pourcentage de sodium échangeable (ESP)

Le pourcentage de Na a été calculé à l'aide de l'Equation (V.2).

$$ESP = \frac{[Na^+]}{[Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na^+ + K^+]} \times 100 \dots \dots \dots (V.2)$$

Toutes les unités de concentration sont en meq / l. Le sodium en réagissant avec le sol réduit sa perméabilité, un taux plus élevé en sodium dans l'eau réduit le rendement des cultures. **Wilcox, 1955** a utilisé ESP et EC pour classer les eaux souterraines en cinq catégories, il recommande que l'ESP ne dépasse pas 60% dans l'eau utilisée à des fins d'irrigation (**Nemčić-Juree et al., 2017**).

Tous les échantillons d'eau de la nappe de Mougheul ont une faible concentration de Na % et correspondent à la catégorie excellente à bonne, l'eau du puits APC1 appartient à la

catégorie bonne à admissible (Fig. V.4). En conséquence l'eau de la nappe de Mougheul peut être utilisée dans le domaine de l'irrigation.

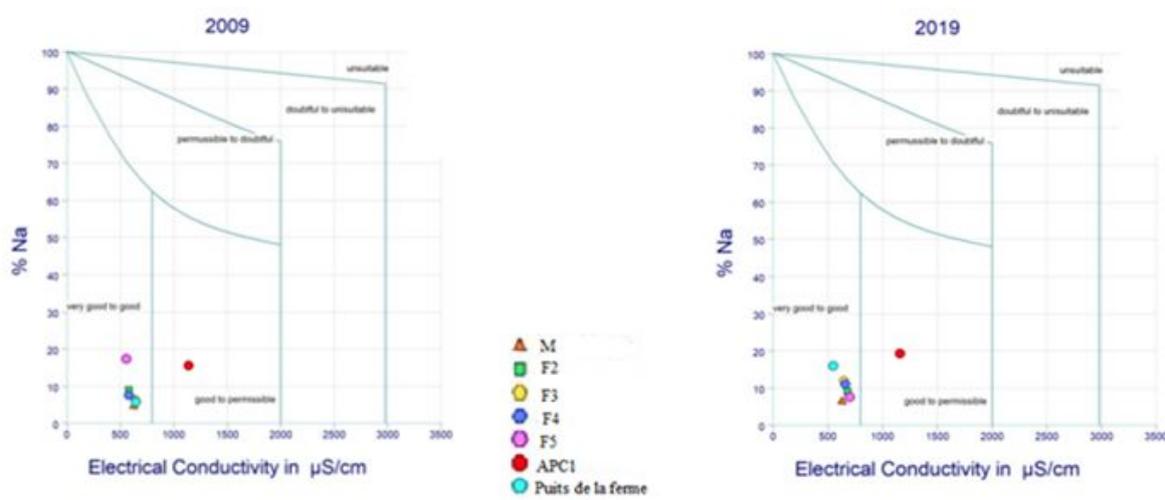


Figure V.4: Illustration de l'ESP des échantillons d'eaux souterraines de la nappe de Mougheul. (2009-2019),

3.3. Paramètres physiques

3.3.1. Température

La température joue un rôle majeur dans la solubilité des sels et gaz et influence conductibilité. Il fait la différence entre l'eau qui circule en profondeur et l'eau qui circule en subsurface, c'est un des facteurs qui affectent la vitesse du produit chimique des réactions. La température moyenne de l'eau en toutes saisons varie de 24°C à 25°C ; la variation thermique des eaux souterraines est liée à la profondeur de l'aquifère et aux différentes saisons. Par exemple, les anciennes directives du Conseil des Communautés européennes fixaient 12°C comme niveau de référence pour la température de l'eau prévue pour la consommation humaine et 25°C une température à ne pas dépasser (Rodier, 2009).

3.3.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH de l'eau est défini en fonction de sa concentration d'ions H^+ contenus dans la solution. Le pH est un paramètre important qui détermine son aptitude à un usage humain, agricole, aux utilisations industrielles et au fonctionnement des écosystèmes aquatiques (Sharma et al., 2018).

Le potentiel hydrogène de l'eau représente son acidité ou son alcalinité liée à la nature du terrain traversé (Rodier, 2009). Bien qu'il n'y ait pas de directives sanitaires pour le pH, il est essentiel pour déterminer le pouvoir corrosif de l'eau (Thakur et al., 2015). Les valeurs obtenues pour chaque échantillon se situent dans la plage optimale de 6,98 à 7,8 (tab.V.3).

Tableau V.3 : Valeurs des pH des points d'eau de la nappe de Mougheul (2009-2019).

Années	M	F2	F3	F4	F5	APC1	Puits de la ferme
2009	7,49	7,49	7,17	7,06	7,12	7,50	6,98
2010	7,45	7,20	7,18	7,10	7,20	7,62	7,00
2011	7,44	7,03	7,20	7,50	7,36	7,48	7,30
2012	7,40	7,02	7,30	7,50	7,30	7,48	7,00
2013	7,35	7,01	7,80	7,64	7,28	7,45	6,92
2014	7,35	7,01	7,50	7,50	7,30	7,50	6,95
2015	7,20	7,02	7,50	7,40	7,35	7,55	6,95
2016	7,01	7,03	7,60	7,30	7,40	7,62	6,94
2017	7,15	7,10	7,50	7,40	7,38	7,60	6,98
2018	7,20	7,20	7,60	7,45	7,36	7,60	7,00
2019	7,36	7,38	7,70	7,45	7,30	7,59	7,10

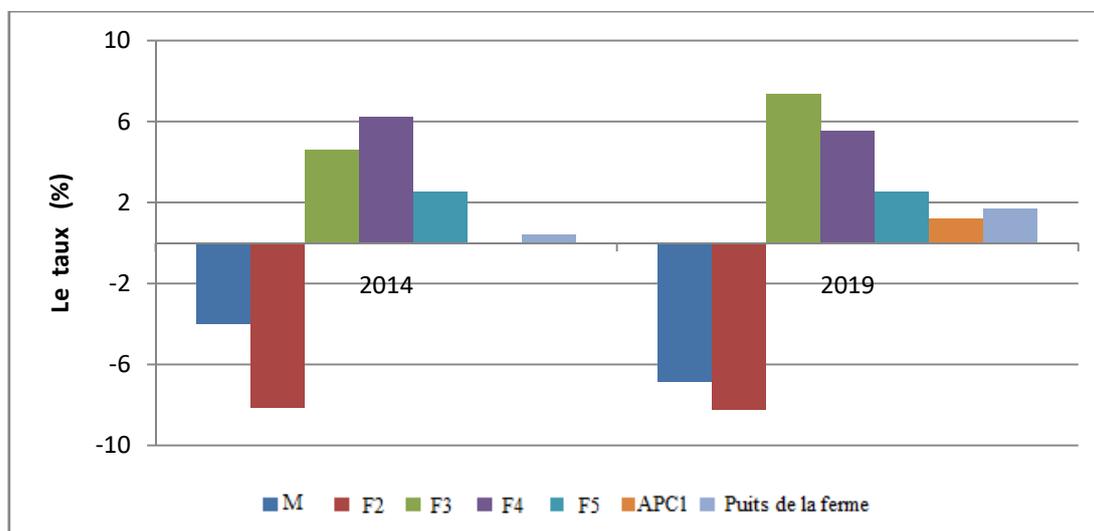


Figure V.5 : Le taux de variation du pH entre 2014 et 2019.

D'après la figure V.5, on remarque les taux de diminution par rapport l'année 2009, atteint 8% dans les forages M et F2, et les taux d'augmentation dépassent le 0,5 % dans l'APC1, puits de la ferme et les autres forages. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) spécifie une valeur de 6,5 à 8,5, donc nos échantillons sont en accord avec la qualité de l'approvisionnement en eau et de l'agriculture.

3.3.3. Conductivité électrique (CE)

C'est la capacité de l'eau qui permet la circulation du courant électrique (**Rawat et al.2012, 2013**). Elle est utilisée pour estimer la quantité de solides dissous. Elle augmente avec la quantité de minéraux dissous (ions). La Conductivité électrique est utilisée comme indicateur de base pour la sélection d'une eau à des fins agricoles (**Jacintha et al., 2017**). Dans tous les échantillons la conductivité est comprise entre 522 et 1198 $\mu\text{S} / \text{cm}$ (tab.V.4). La norme OMS prévoit des valeurs inférieures à 2700 $\mu\text{S} / \text{cm}$ pour une eau à consommation domestique.

Tableau V.4 : Valeurs CE ($\mu\text{S} / \text{cm}$) des points d'eau de la nappe de Mougheul (2009-2019).

Années	M	F2	F3	F4	F5	APC1	Puits de la ferme
2009	624	578	641	582	553	1142	643
2010	621	579	649	592	550	1151	645
2011	610	587	683	615	620	1163	658
2012	604	612	679	620	631	1176	646
2013	598	663	687	637	633	1187	624
2014	588	645	651	642	644	1169	621
2015	566	628	606	646	666	1182	584
2016	534	607	561	655	683	1198	543
2017	550	640	593	652	691	1187	544
2018	586	661	611	658	696	1158	522
2019	630	682	647	662	700	1160	552

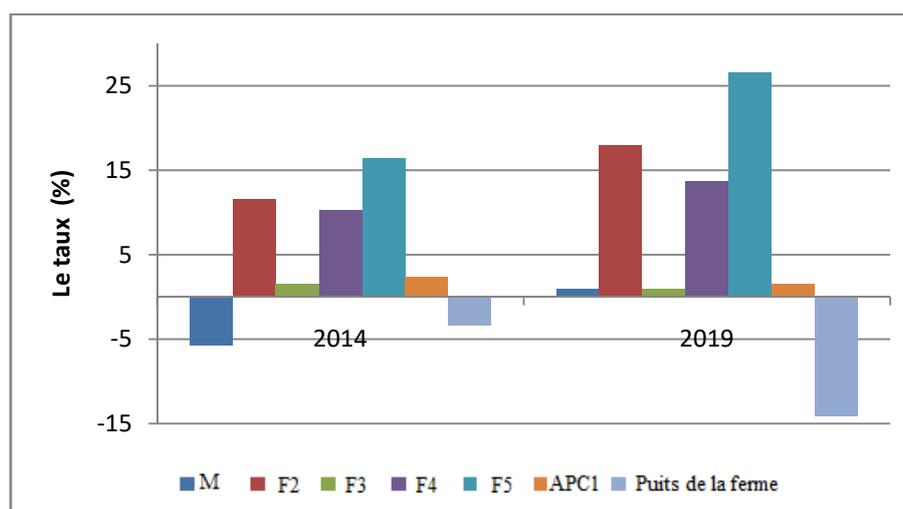


Figure V.6 : Le taux de variation de conductivité entre 2014 et 2019

La figure V.6 montre que le taux d'augmentation de la conductivité a atteint 16,45% dans le forage F5, et une diminution remarquable de 5.76% notée dans le forage M en 2014.

En 2019, le taux maximum d'augmentation enregistré dans le forage F5 (26,58%) et une forte baisse dans le puits de la ferme (14,15%).

3.3.4. Teneur totale en sel dissous (TDS)

La teneur totale en sels dissous est un paramètre important pour évaluer la qualité des eaux souterraines, ce terme est utilisé pour décrire la présence de sels inorganiques et de petites quantités de matière organique en solution dans l'eau. Les principaux constituants sont généralement les cations de calcium, de magnésium, de sodium et de potassium et les anions de carbonate, de bicarbonate, de chlorure, de sulfate et de nitrate (**Jacintha et al., 2017**). Des niveaux élevés de TDS indiquent généralement une eau dure et peuvent entraîner une accumulation de tartre dans les tuyaux, une efficacité réduite des filtres à eau et des problèmes esthétiques tels qu'un goût amer ou salé (**WHO, 1993**).

D'autres paramètres (tels que l'évaporation et l'évapotranspiration) peuvent augmenter ces concentrations. "Le TDS est égal à la somme des principaux ions contenus dans un litre d'eau (**Drever, 2001**).

Selon le tableau V.5 (classification de **Drever, 2001**), on peut dire que tous les échantillons prélevés au niveau des différents forages et puits présentent une eau douce.

Tableau V.5 : Valeurs TDS (mg / l) des points d'eau de la nappe de Mougheul (2009-2019).

Années	M	F2	F3	F4	F5	APC1	Puits de la ferme
2009	466,00	438,00	472,80	440,50	408,00	819,56	487,53
2010	463,00	438,40	489,00	452,00	409,00	826,80	485,00
2011	461,92	444,00	517,29	469,80	465,00	838,66	491,00
2012	459,20	466,00	517,80	473,80	471,50	849,50	481,00
2013	457,80	517,20	525,00	483,70	469,30	858,80	466,00
2014	447,00	502,00	492,90	488,50	481,00	846,00	462,50
2015	435,40	482,50	454,00	495,80	504,00	865,50	435,00
2016	402,53	450,46	418,30	504,40	518,50	885,00	404,00
2017	423,00	481,00	449,10	497,90	527,50	86,00	406,30
2018	441,50	504,60	464,09	500,40	531,70	834,00	410,50
2019	469,85	528,70	483,24	502,37	536,80	831,02	410,90

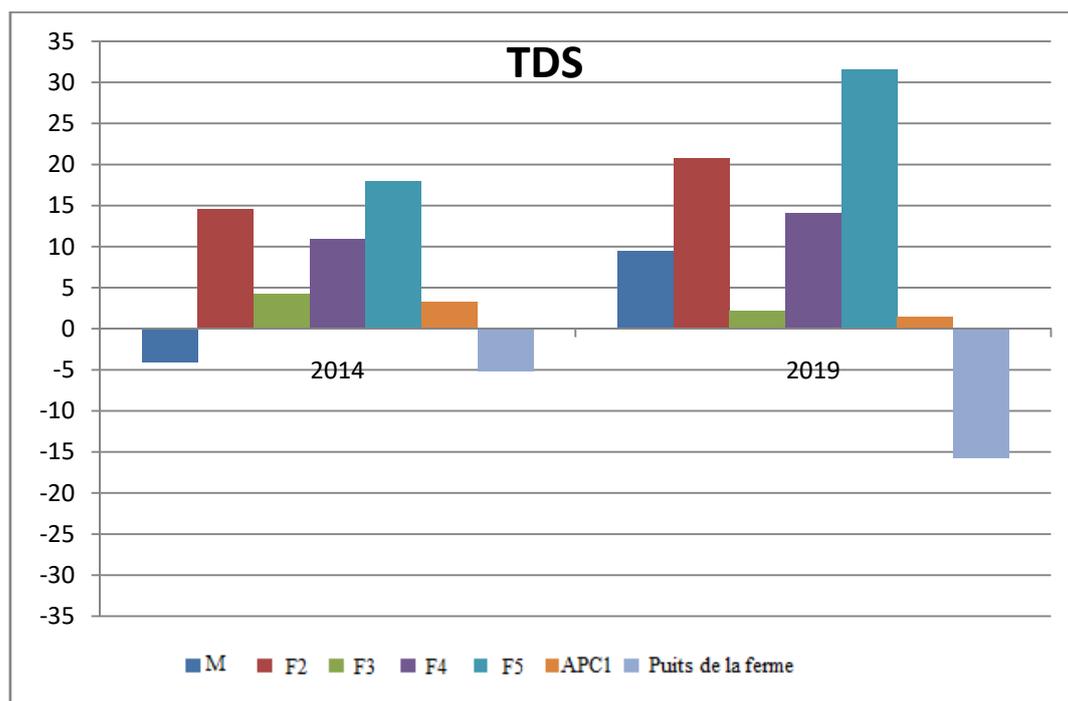


Figure V.7 : Le taux de variation du TDS entre 2014 et 2019.

La figure V. 7 montre qu'en 2014, le taux d'augmentation du TDS atteint 17.89% dans le forage F5 et une baisse de 5,13% dans le puits de la ferme. En 2019, le taux d'augmentation le plus élevé est enregistré dans le forage F5 (31,56%) et une forte diminution dans le puits de la ferme (15,71%).

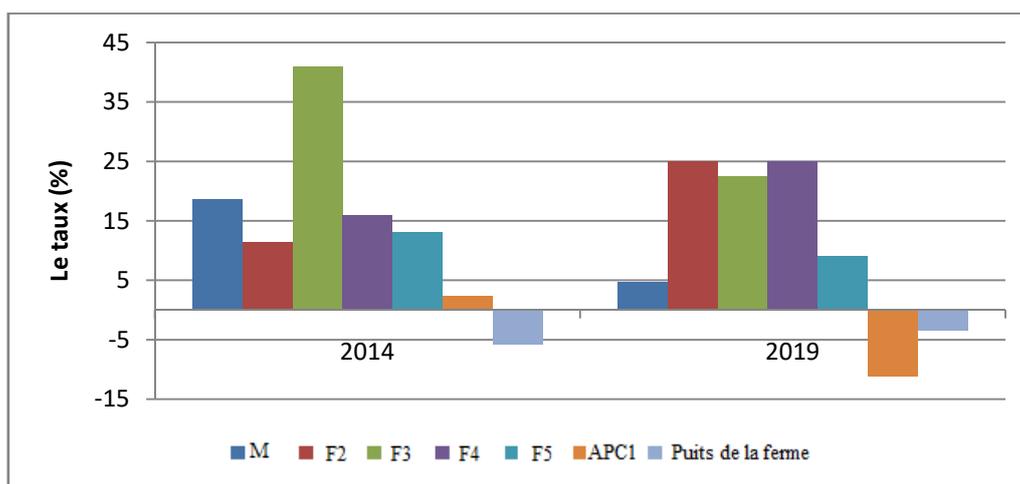
3.3.5. Les éléments majeurs

3.3.5.1. Calcium (Ca^{+2})

Le calcium est généralement l'élément dominant de l'eau potable et sa teneur varie principalement en fonction de la nature du terrain traversé (sol calcaire ou gypseux) (BRGM, 2006). La teneur en calcium des eaux contrôlées rapporte que les valeurs obtenues varient de 42 mg / l à 77 mg / l dans la nappe du Mougheul (tab. V.6). Par rapport à la norme de l'OMS, nous avons constaté que les échantillons respectent cette norme (100 mg / l) pour l'eau potable et celles destinées aux activités agricoles.

Tableau V.6 : Valeurs calcium (mg / l) des points d'eau de la nappe de Mougheul (2009-2019).

Année	M	F2	F3	F4	F5	APC1	Puits de la ferme
2009	43,00	44,00	44,00	48,00	44,00	74,30	45,60
2010	43,00	42,00	48,00	50,00	45,00	75,00	48,00
2011	48,00	43,00	53,00	51,00	47,00	76,50	50,20
2012	49,00	45,00	58,00	52,00	51,00	76,00	50,00
2013	50,00	48,60	66,30	53,00	50,00	75,60	43,00
2014	51,00	49,00	62,00	56,00	50,00	76,00	43,00
2015	48,00	49,00	59,00	62,00	51,00	56,00	42,00
2016	44,00	50,00	44,00	66,00	52,00	77,00	43,00
2017	46,00	51,00	50,00	61,00	51,00	76,00	44,00
2018	49,00	53,00	51,00	60,00	50,00	74,00	45,00
2019	45,00	55,00	53,90	60,00	48,00	65,96	44,00

Figure V.8 : Le taux de variation du Ca²⁺ entre 2014 et 2019.

En 2014 (Fig. V. 8), le taux d'augmentation du calcium a atteint 40,9% dans le forage F3, tandis que dans le puits de la ferme a diminué de 5,7%. En 2019, le taux maximum d'augmentation est enregistré dans les forages F4 et F2 (25%), et une forte diminution du 11,22% est observée dans le puits de la ferme.

3.3.5.2. Magnésium (Mg²⁺)

C'est un élément qui accompagne souvent le calcium et vient de la dissolution des dolomites, des calcaires dolomitiques et minéraux ferromagnésiens (BRGM, 2006). Les valeurs élevées dans les eaux de l'aquifère des terrasses alluviales peuvent être dues à la présence de lentilles d'argile magnésienne. Les teneurs en magnésium dans la nappe de

Mougheul varient entre 27 et 88.7 mg / l, ces valeurs sont généralement inférieures au seuil standard défini par l'OMS (50 mg / l), on note que dans le puits APC1 nous avons enregistré des valeurs supérieures au seuil de norme et qui sont variées entre 83.6 et 88.7 mg/l (tab.V. 7).

Tableau V.7 : Valeurs de magnésium (mg / l) des points d'eau de la nappe de Mougheul (2009-2019).

Années	M	F2	F3	F4	F5	APC1	Puits de la ferme
2009	54,00	41,00	55,00	41,00	27,00	83,60	50,63
2010	53,00	43,00	49,50	40,00	35,00	85,00	50,00
2011	45,00	45,00	49,00	42,30	48,00	85,40	49,60
2012	43,00	46,00	45,00	43,00	49,00	86,00	51,00
2013	40,00	49,00	42,00	45,00	50,00	88,70	54,00
2014	38,00	45,00	40,00	45,00	52,00	87,00	49,00
2015	30,00	42,00	38,00	40,00	54,00	86,00	39,00
2016	28,00	40,00	35,00	38,60	57,00	85,00	31,00
2017	30,00	46,00	36,00	41,00	56,50	86,00	30,00
2018	40,00	47,00	38,00	42,00	56,60	85,00	31,00
2019	48,00	47,30	39,00	42,30	56,60	87,60	32,00

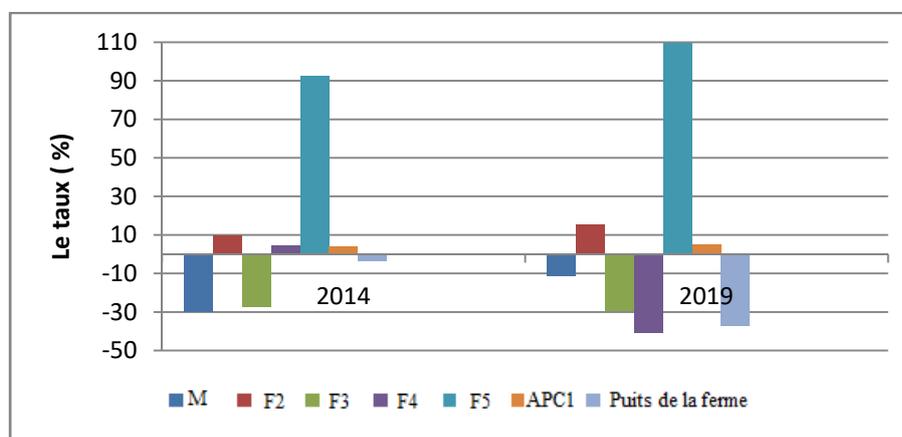


Figure V.9 : Le taux de variation de Mg⁺² entre 2014 et 2019.

En 2014 (Fig.V.9), le taux de l'augmentation du magnésium atteint 92,59% dans le forage F5 et une diminution de 29,62% est notée dans le forage M. En 2019, le taux maximum d'augmentation est enregistré dans le forage F5 (109,62%), avec une forte baisse (40,73%) est remarquée dans le forage F4.

3.3.5.3. Potassium (K^+)

C'est un élément alcalin qui réagit facilement avec l'eau, on le retrouve dans les roches ignées et dans la nature sous forme de chlorure double dans de nombreux minéraux (BRGM, 2006). La concentration de potassium des eaux souterraines de la nappe de Mougheul varie entre 1 et 5 mg / l (tab.V.8). Tous nos échantillons présentent des résultats de potassium inférieurs au seuil de la norme OMS (12 mg / l) dans toute la période étudiée.

Tableau V.8 : Valeurs de potassium (mg/l) des points d'eau de la nappe de Mougheul (2009-2019).

Années	M	F2	F3	F4	F5	APC1	Puits de la ferme
2009	1,00	1,00	1,00	1,50	2,60	2,90	1,00
2010	2,00	1,50	1,50	2,00	2,00	2,80	2,00
2011	1,00	1,00	1,80	2,60	1,00	2,60	2,30
2012	2,00	1,50	1,80	2,80	1,50	2,50	2,00
2013	2,00	1,00	1,90	2,90	2,00	2,30	1,00
2014	1,00	1,00	1,90	2,50	2,00	3,00	1,50
2015	1,90	1,50	2,00	2,30	1,50	3,50	2,00
2016	2,00	2,00	2,30	2,00	1,00	5,00	2,00
2017	2,00	2,00	2,10	2,00	2,00	4,00	2,10
2018	1,50	1,50	2,09	2,90	2,10	3,00	2,00
2019	2,00	2,00	2,08	1,90	2,30	2,10	2,10

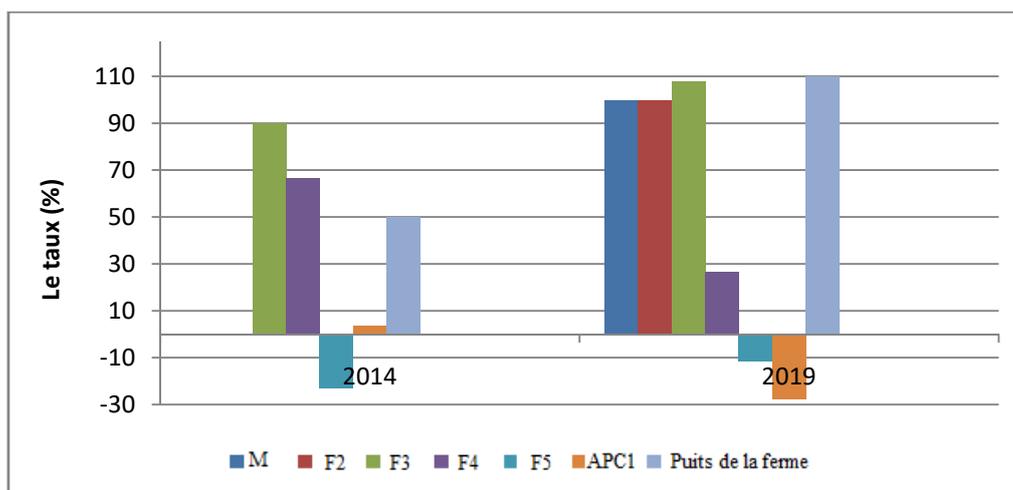


Figure V.10 : Le taux de variation de K^+ entre 2014 et 2019

En 2014 (Fig.V.10), le taux d'augmentation du potassium atteint 90% dans le forage F3 et une diminution de 23,3% est mentionnée dans le forage F5. En 2019, le taux maximum

d'augmentation est enregistré dans le puits de la ferme (110%) et une forte diminution dans le puits de l'APC1 (27,58%).

3.3.5.4. Sodium (Na^+)

Le sodium représente le cation le moins abondant dans les eaux de l'aquifère de Mougheul (7 à 21 mg / l), dans le puits APC1 il varie entre 40 et 56 mg / l (tab. V. 9). Dans tous nos échantillons, les résultats de sodium sont inférieurs au seuil de la norme de l'OMS (250 mg / l).

Tableau V.9 : Valeurs de sodium (mg / l) des points d'eau dans la nappe de Mougheul (2009-2019).

Années	M	F2	F3	F4	F5	APC1	Puits de la ferme
2009	7,00	12,00	10,00	10,00	20,00	43,00	8,60
2010	8,00	11,00	14,00	11,00	10,00	45,00	9,00
2011	10,62	10,00	16,30	13,00	9,00	47,30	12,00
2012	11,00	11,50	17,00	12,00	9,00	50,00	11,00
2013	12,00	12,30	18,60	12,96	9,00	50,30	7,00
2014	13,00	12,00	18,00	13,00	9,00	48,00	15,00
2015	18,00	11,00	17,50	13,50	10,00	46,00	20,00
2016	19,00	11,86	17,00	14,00	10,00	44,00	21,00
2017	15,00	12,00	17,00	15,00	11,00	49,00	20,00
2018	13,00	13,00	17,10	16,00	11,50	50,00	21,00
2019	13,86	14,30	17,30	17,30	12,00	56,30	20,00

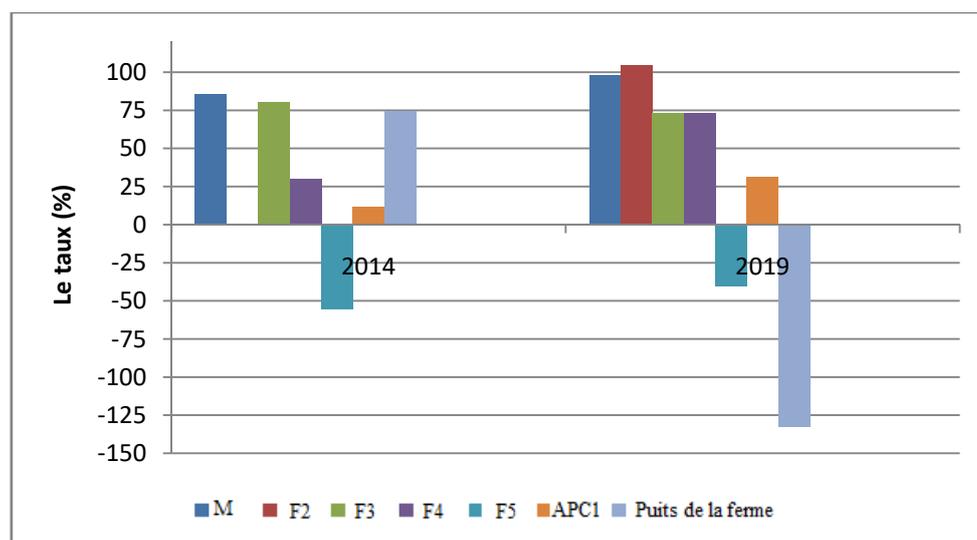


Figure V.11 : Le taux de variation du Na^+ entre 2014 et 2019

En 2014 (Fig.V.11), le taux de l'augmentation du sodium atteint 85,71% dans le forage M et une diminution de 55% dans le forage F5. En 2019, le taux maximum d'augmentation enregistré dans le forage F2 (104,28%), et une forte diminution (132,55%) dans le puits de la ferme.

3.3.5.5. Chlorure (Cl)

Le chlorure sous forme d'ion chlorure (Cl^-) est le principal anion inorganique présent dans l'eau et les eaux usées (Thakur et al, 2015).

Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines et sont principalement liés à la dissolution des champs de sel. La dissolution de ces sels est très facile d'où leur présence en fortes concentrations dans les eaux ayant traversé de l'argile-sableuse ou formations argileuses. Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de la corrosion dans les tuyaux et les réservoirs à partir de 500 mg / l (OMS, 2006).

Les teneurs en chlorures varient entre 13 et 30 mg / l dans tout les forages de la nappe de Mougheul, excepté le puits APC1 ces valeurs varie entre 83.6 à 97 mg / l (tab.V 10).

Tableau V.10 : Valeurs de chlorure (mg / l) des points d'eau dans la nappe de Mougheul (2009-2019).

Année	M	F2	F3	F4	F5	APC1	Puits de la ferme
2009	22,00	20,00	28,00	18,00	30,00	89,60	26,50
2010	20,00	20,00	26,00	20,00	20,00	87,00	27,00
2011	16,30	19,00	25,33	24,36	17,00	84,56	28,30
2012	15,90	20,00	24,00	24,00	20,00	84,00	25,00
2013	14,50	23,30	22,69	25,30	25,00	83,60	22,00
2014	14,00	24,00	21,00	25,00	24,00	85,00	20,00
2015	13,50	28,00	19,00	26,00	24,50	90,00	18,00
2016	13,00	30,00	16,80	26,53	24,60	97,00	13,00
2017	13,50	29,00	18,00	26,90	25,00	92,00	14,20
2018	14,00	28,00	19,00	27,00	25,50	88,00	14,50
2019	15,00	27,00	20,30	27,42	26,30	85,60	14,60

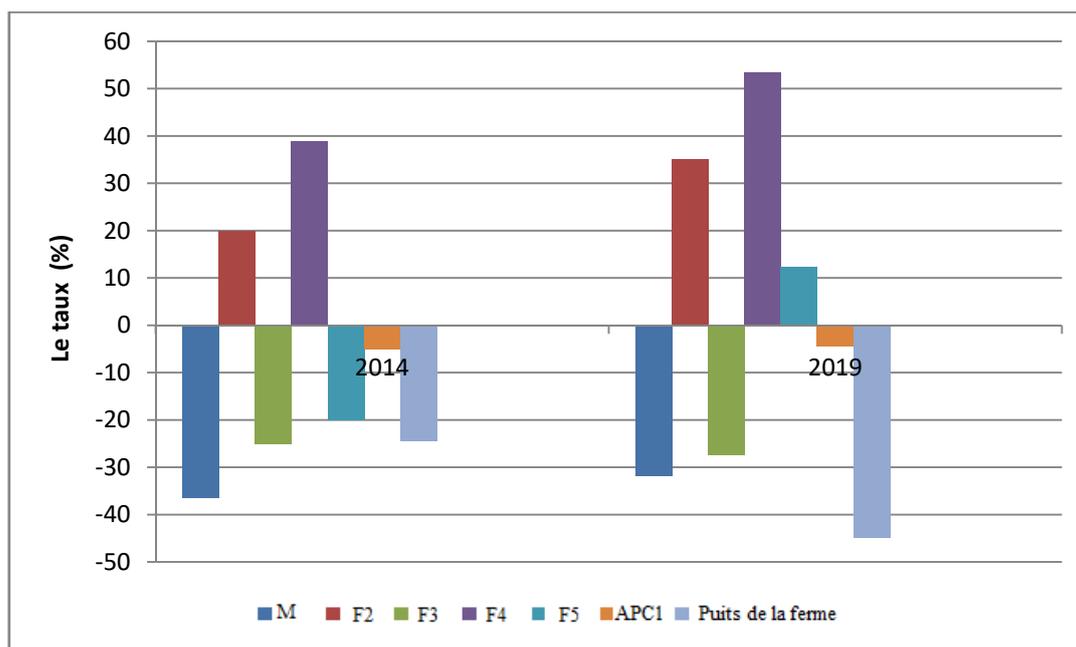


Figure V.12 : Le taux de variation du Cl^- entre 2014 et 2019.

La figure V.12 montre qu'en 2014 le taux d'augmentation des chlorures a atteint 38,88% dans le forage F4 et une diminution de 36,36% dans le forage M. En 2019, le taux maximum d'augmentation enregistré dans le forage F4 (53,33%) et une forte baisse dans le puits de la ferme (44,9%).

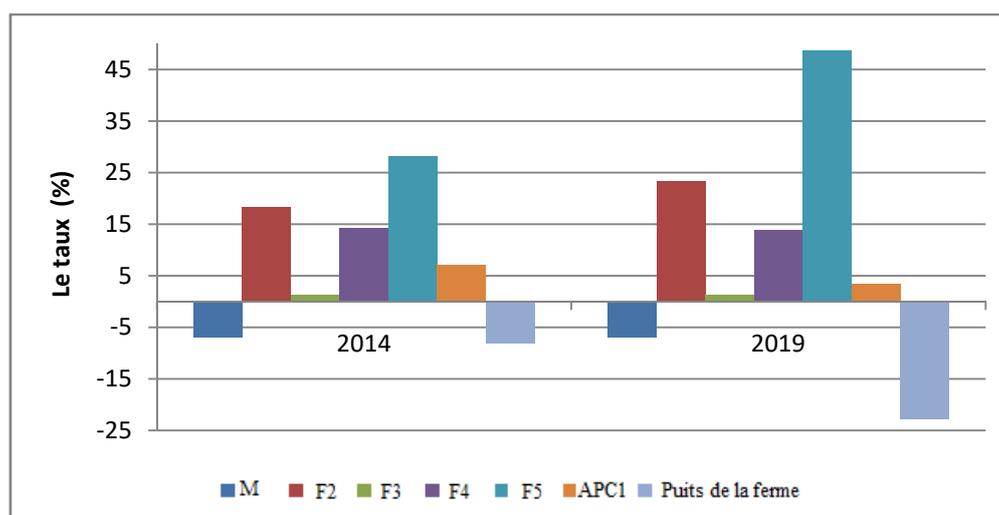
3.3.5.6. Bicarbonate HCO_3^-

Les bicarbonates se trouvent dans les eaux naturelles et leur présence dans l'eau est due à la dissolution de formations carbonatées telles que les calcaires et les dolomites (Drever, 2001). HCO_3^- est l'anion le plus commun des eaux souterraines, essentiellement dérivé du dioxyde de carbone (CO_2) du sol (Yammani et al., 2008).

La teneur en bicarbonate varie entre 199 et 339 mg / l (tab.V. 11) dans les points d'eau de la nappe de Mougheul son origine est certainement due au lessivage des formations carbonatées.

Tableau V.11 : Valeurs de bicarbonate (mg / l) des points d'eau dans la nappe de Mougheul (2009-2019).

Année	M	F2	F3	F4	F5	APC1	Puits de la ferme
2009	247,00	235,00	247,00	232,00	195,00	280,00	259,00
2010	241,00	235,90	260,00	245,00	200,00	282,00	252,00
2011	239,00	238,00	265,00	258,60	232,00	287,00	250,00
2012	240,00	250,00	266,00	260,00	238,00	290,00	248,00
2013	241,00	289,00	267,39	260,00	240,00	296,00	247,00
2014	230,00	278,00	250,00	265,00	250,00	300,00	238,00
2015	225,00	260,00	230,00	268,00	270,00	320,00	220,00
2016	201,00	225,00	209,00	270,00	280,00	339,00	198,00
2017	220,00	250,00	230,00	265,00	285,00	320,00	199,00
2018	225,00	270,00	240,00	264,00	287,00	295,00	200,00
2019	230,00	290,00	250,00	264,00	290,00	289,56	200,00

Figure V.13 : Le taux de variation du HCO_3^- entre 2014 et 2019.

En 2014 (Fig.V.13), le taux d'augmentation des bicarbonates a atteint 28,2% dans le forage F5 et une diminution de 8,1% dans le puits de la ferme. En 2019, le taux maximum d'augmentation est enregistré dans le forage F5 (48,71%) et un forte baisse (22,77%) dans le puits de la ferme.

3.3.5.7. Sulfates SO_4^{-2}

Ils sont présents dans les eaux naturelles à des niveaux très variables et peuvent provenir de la dissolution du gypse. Cette dernière peut être triasique, car elle peut être associée à des formations plus récentes telles que les argiles Mio-Plio-Quaternaires. Ils

dépendent également des déchets industriels. Les sulfates sont des éléments très solubles et également très stables (**BRGM, 2006**).

Les teneurs varient entre 54 et 86 mg / l dans tous les points d'eau, le puits APC1 donne des valeurs élevées comprises entre 170 et 196 mg / l (tab.V.12), les augmentations des teneurs proviendraient probablement du lessivage du gypse représenté sous forme de lentilles dans les formations quaternaires ainsi que de la présence de marnes et d'argiles dans ces formations.

La concentration de sulfate peut provoquer des réactions avec les organes humains si la valeur dépasse la limite maximale autorisée de 400 mg / l (**OMS, 1993**), elle provoque un effet laxatif sur le système humain avec l'excès de magnésium dans les eaux souterraines (**Jacintha et al., 2017**).

Tableau V.12 : Valeurs de sulfate (mg / l) des points d'eau dans la nappe de Mougheul (2009-2019).

Année	M	F2	F3	F4	F5	APC1	Puits de la ferme
2009	80,00	60,00	82,00	66,00	60,00	186,30	80,60
2010	76,00	58,00	80,00	60,00	70,00	188,00	80,00
2011	79,00	60,00	77,56	54,00	86,00	190,00	79,60
2012	77,30	65,00	75,00	55,00	83,00	195,00	79,00
2013	76,00	67,20	73,62	57,00	79,00	196,00	80,00
2014	77,00	67,00	72,00	56,00	78,00	180,00	78,00
2015	79,00	66,00	73,00	57,00	76,00	175,00	75,00
2016	80,00	66,00	75,60	58,63	75,60	170,00	75,00
2017	80,00	65,00	75,00	59,00	77,00	172,00	75,00
2018	81,00	65,10	73,90	59,50	78,00	174,00	74,00
2019	83,00	65,30	74,80	59,80	79,60	178,60	74,63

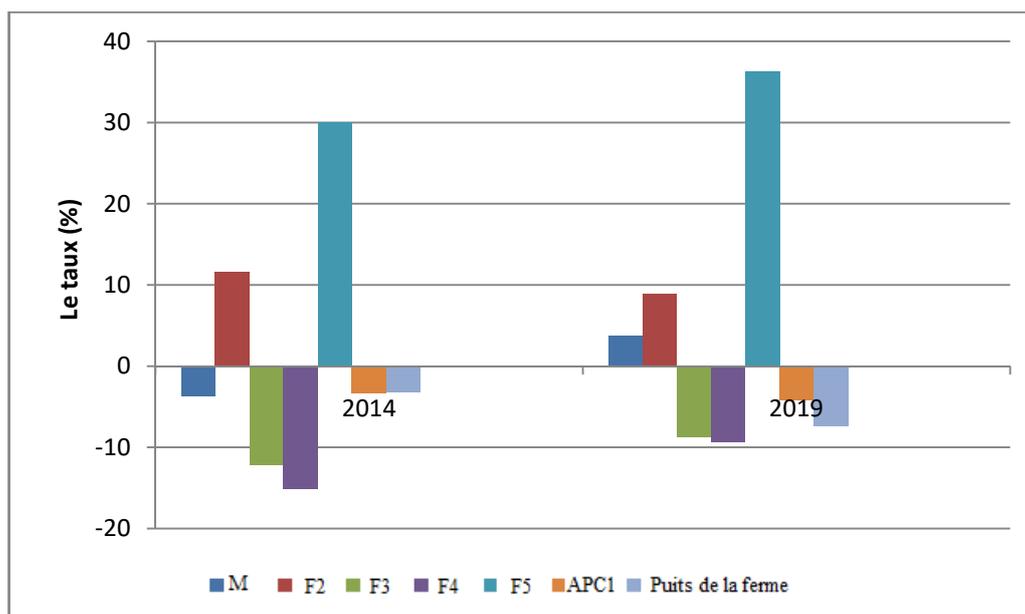


Figure V.14 : Le taux de variation du SO_4^{-2} entre 2014 et 2019

En 2014 (Fig.V.14), le taux d'augmentation du sulfate a atteint 30% dans le forage F5 et une diminution de 15,15% dans le forage F4. En 2019, le taux maximum d'augmentation enregistré dans le forage F5 (36,22%) et une forte diminution (9,39%) dans le forage F4.

3.3.5.8. Nitrates NO_3^-

C'est une forme très soluble, et sa présence dans l'eau est liée aux engrais, l'ion nitrate (NO_3^-) est la forme d'azote la plus oxydée. Le nitrate dans les eaux souterraines peut provenir de sources ponctuelles telles que les systèmes d'évacuation des eaux usées et les installations d'élevage, de sources non ponctuelles telles que les terres agricoles fertilisées, les parcs ou les sources naturelles d'azote (Thakur et al., 2015).

La présence des nitrates dans les eaux de l'aquifère de Mougheul est une indication de pollution d'origine domestique (rejet des eaux usées dans la vallée de Mougheul). Les teneurs en nitrates sont comprises entre 5,8 et 32,5 mg / l (tab.V.13), des valeurs élevées ont été observées au niveau de puits APC1 qui dépasse les limites recommandées par l'OMS (50 mg / l).

Tableau V.13 : Valeurs de nitrate (mg / l) des points d'eau dans la nappe de Mougheul (2009-2019).

Année	M	F2	F3	F4	F5	APC1	Puits de la ferme
2009	12,00	25,00	5,80	24,00	29,40	59,86	15,60
2010	20,00	27,00	10,00	24,00	27,00	62,00	17,00
2011	23,00	28,00	29,30	23,54	25,00	65,30	19,00
2012	21,00	27,00	31,00	25,00	20,00	66,00	15,00
2013	22,30	26,80	32,50	27,56	14,30	66,30	12,00
2014	23,00	26,00	28,00	26,00	16,00	67,00	18,00
2015	20,00	25,00	20,00	27,00	17,00	68,00	19,00
2016	15,53	25,60	18,60	28,64	18,30	68,00	21,00
2017	16,50	26,00	21,00	28,00	20,00	67,00	22,00
2018	18,00	27,00	23,00	29,00	21,00	65,00	23,00
2019	20,35	27,80	25,86	29,65	22,00	65,30	23,60

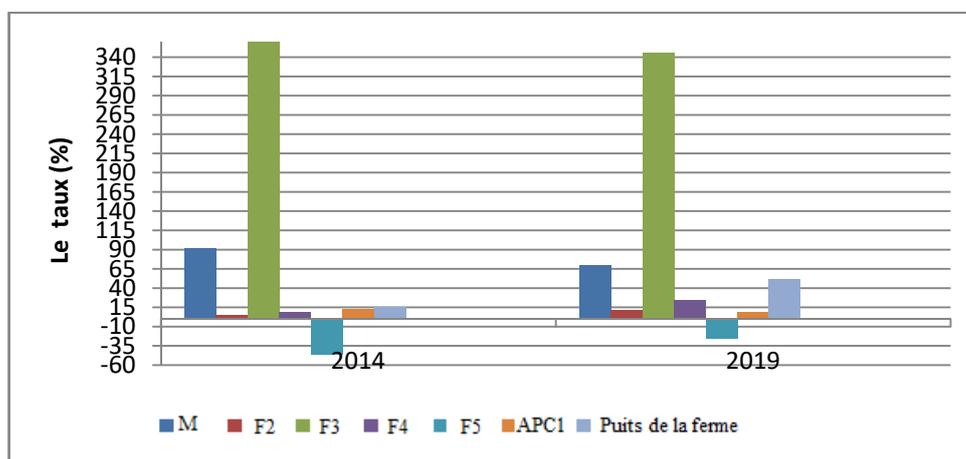


Figure V.15 : Le taux de variation du NO₃⁻ entre 2014 et 2019

D'après la figure V.15, on note de forte augmentation du taux de nitrate par rapport l'année 2009 au niveau du forage F3 respectivement en 2014 (382,75%) et 2019 (345,86%), et une diminution de 45,57% (2014) et 25,17% (2019) dans le forage F5.

4. L'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque dans l'aquifère jurassique inférieur de Mougheul

La vulnérabilité des aquifères à la pollution dans une région donnée, résulte d'une combinaison de plusieurs facteurs, à savoir : l'hydrogéologie, la réaction aquifère-contaminant et les sources de pollution (Chaffai et al, 2006).

Les méthodes d'études sont nombreuses et souvent redondantes, car prenant en considération les mêmes paramètres (Bouchahm, 2009). Néanmoins, la méthode à retenir

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

Pour notre étude et étant donné la faiblesse de la densité et de la quantité des informations disponibles pour le calcul de l'indice de la vulnérabilité à la pollution de la nappe jurassique inférieure de la plaine de Mougheul (le champ captant), on a choisi d'appliquer l'approche de la méthode paramétrique GOD, dont le nombre des paramètres utilisés n'est que de trois. Outre, son utilisation nous permettra d'apprécier assez rapidement la vulnérabilité à la pollution de la nappe de Mougheul.

4.1. Détermination des critères de la méthode GOD

4.1.1. Critère (G) de type de nappe

Les observations retenues sur terrain, ainsi que l'étude des coupes lithologiques des sondages et des puits, le tous révèle que la nappe jurassique inférieure de Mougheul est semi captive. Le recouvrement surmontant la zone saturée, composé essentiellement d'argile gypsifère armées de banc de calcaires.

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

Tableau V.14 : Cotes attribuées au critère "Type de nappe"

Type de nappe	Cote
Aucun aquifère	0
artésien	0.1
confiné	0.2
Semi- confiné	0.3
Libre avec couverture	0.4-0.6
libre	0.7-1

4.1.2. Critère (O) Impact de la ZNS (Overall aquifer class)

C'est un paramètre à très grande importance dans la méthode GOD. La nature lithologique de la zone non saturée joue un rôle prépondérant dans la propagation du polluant vers la nappe.

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

Tableau V.15 : Cotes attribuées au critère "Impact de la ZNS"

Lithologie	Cote
Sol résiduel	0.4
Limon alluvial, argile, marne, calcaire fin	0.5
Sable éolien, siltite, tuf, roches ignées ou métamorphiques fracturées	0.6
Sable et gravier, grès, tuf	0.7
Gravier (colluvion)	0.8
Calcaire	0.9
Calcaire fracturé ou karstique	1

4.1.3. Critère (D) Profondeur à la nappe (Depth to groundwater table)

Ce critère a été réalisé par l'interpolation des données sur les niveaux d'eau de la nappe phréatique de la plaine de Mougheul, les mesures ont été effectuées au cours de la période 2016. Les cotes du critère " Profondeur à la nappe" définies selon la méthode GOD, figurent dans le tableau ci-après :

Tableau V.16 : Cotes attribuées au critère " Profondeur à la nappe "

Profondeur (m)	cote
>2	1
2-5	0.9
5-10	0.8
10-20	0.7
20-50	0.6
50-100	0.5
>100	0.4

4.2. Les résultats de l'application la méthode GOD

La figure V.16 ci-après représente les classes de l'indice de vulnérabilités qui sont répartis en deux classes de vulnérabilité allant de très faible à faible ;

- Aire très faiblement vulnérable est dominante dont le pourcentage de 70% de la surface totale et couvre la partie nord de la nappe. Les indices de vulnérabilité sont de l'ordre de 0,09.

- Aire faiblement vulnérable occupe la partie sud de la nappe de Mougheul, avec un pourcentage de 30%. Les valeurs de vulnérabilité sont de l'ordre 0.105.

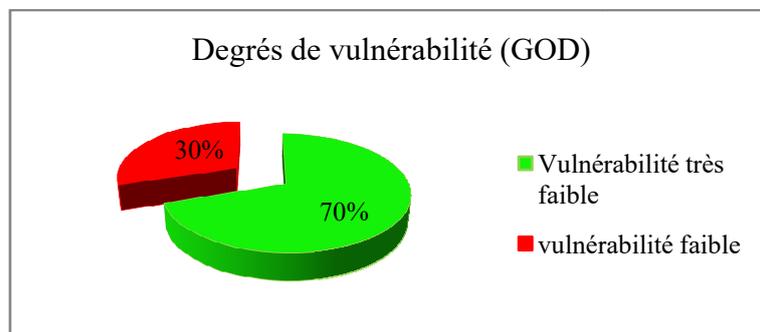
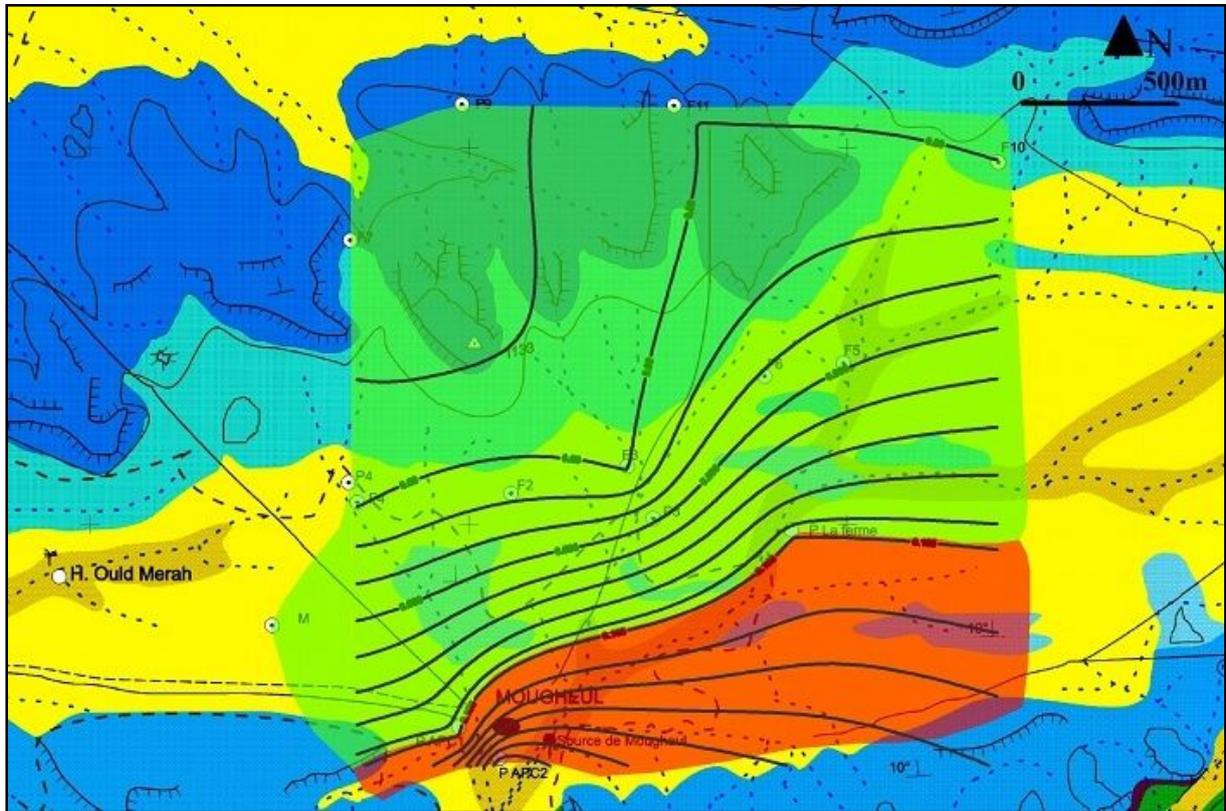


Figure V.16: Carte de vulnérabilité « GOD » de la nappe jurassique inférieure de Mougheul.

5. Conclusion

Cette étude a été menée pour donner l'évolution qualitative d'eaux souterraines dans la région de Ksour du Nord (cas de champs captant de Mougheul) pendant la période 2009-2019, afin d'évaluer sa qualité pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation. Le besoin de cette recherche est dû aux problèmes que connaît dans la région comme la sécheresse, et la pénurie d'eau douce.

Les eaux captées dans la nappe de Mougheul ont des faciès chimiques bicarbonaté calcique, bicarbonatémagnésien, chloruré et sulfaté calcique et magnésien selon le digramme de Schöeller et Berkaloff, et le diagramme triangulaire de Piper.

Les valeurs de pH reflètent généralement la nature alcaline des eaux souterraines de la nappe de Mougheul. Les calculs de SAR montrent que les eaux de l'aquifère du Mougheul sont excellentes pour l'irrigation.

La classification selon le diagramme de Wilcox montre que les eaux souterraines du Mougheul sont de bonne qualité, sauf que le puits APC1 est adapté à l'irrigation et nécessite de contrôler l'évolution de la salinité. Les eaux souterraines restent potables pendant la période 2009-2019, selon les normes de potabilité de l'OMS. L'origine des nitrates dans les eaux de l'aquifère de Mougheul est domestique (rejet des eaux usées dans la vallée du Mougheul).

La méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque (GOD) donne deux zones de vulnérabilité, qui sont : très faiblement vulnérable (70%) et faiblement vulnérable (30%). En outre, la méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque utilisée dans cette étude, nous a permis de faire une idée assez nette sur les zones sensibles à la pollution au sein de la plaine de Mougheul. A cet effet, des mesures de protection de ces ressources souterraines doivent être établies. Par ailleurs, il est recommandé d'approuver les résultats ainsi obtenus par l'utilisation des méthodes de cartographie de la vulnérabilité à la contamination autres que la méthode GOD, et de contrôler les zones et les sources de pollution et de faire le suivi des paramètres de pollution, afin de caractériser la sensibilité de l'aquifère car cette vulnérabilité peut évoluer avec le temps.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est de contribuer à améliorer la connaissance de la ressource en eau au niveau des ksour de la région nord de Béchar par une étude hydrogéologique locale et le développement d'une banque de données sur les ressources en eau souterraines, leurs utilisations, leurs comportements hydrodynamiques et suivre l'évolution des paramètres physicochimiques.

Les Ksour du Nord appartiennent à la région nord occidentale du Sahara Algérien, la zone d'étude occupe une superficie de 1287.67 Km² avec une altitude moyenne de 968,8m. Elle constitue la partie la plus élevée avec un relief peu différent de celui des autres régions de la Wilaya. C'est un plateau très accidenté dans ses parties Nord et Sud. Le sous bassin versant des Ksour du Nord fait partie du grand bassin du Guir, il est caractérisé par un relief assez fort avec une pente moyenne du cours d'eau principal 23.62 m/km.

La zone d'étude est caractérisée par une faible couverture climatique, d'où une obligation d'utiliser les données interannuelles (2009-2019) de la station de Mougheul (opérationnel depuis 2008). L'aperçu climatique a permis de déterminer les principales caractéristiques climatologiques de la zone d'étude (un climat de type hyperaride aréisme selon De Martonne et saharien d'après L. Emberger avec une longue période de sécheresse a été mis en évidence ainsi qu'un apport pluviométrique rare et un bilan annuel déficitaire. Pour la série allant de 2009 à 2019, les valeurs moyennes des précipitations et de température sont respectivement de l'ordre de 144,13 mm et 23,6 °C, le bilan hydrologique montre qu'une grande quantité d'eau se perd par évapotranspiration; ce bilan est déficitaire et pose le problème de l'alimentation de l'aquifère existant dans cette région.

Le cadre géologique de la région d'étude est formée d'un Substratum constitué de grés paléozoïques d'âge Cambro-ordovicien et une couverture essentiellement jurassique dans la plaine de Mougheul, elle est turonienne dans la région de Boukaïs et l'Ahmar. La région de Mougheul est constituées de 5 formations (Les trois formations de Hassi Laâma, l'Oued Mennat et Koudiat El Haïdoura sont perméables; leurs épaisseurs, leurs structures, leurs surfaces d'affleurement constituent une configuration géologique favorable pour l'emménagement et la circulation des eaux souterraines. Celles de l'Oued El Abiod et d'Aïn Ben Serhane constituent des formations imperméables).

La région de l'Ahmar et Boukaïs est constituée de terrains très variés appartenant à des époques géologiques différentes. Les formations géologiques s'étendent du Protérozoïque au Quaternaire, où les plus anciennes sont datées du Précambrien et affleurent à l'intérieur de Boukaïs.

Sur le plan structural, la zone d'étude est située sur le flanc d'une structure monoclinale dont tous les massifs présentent une grande densité de fracturation qui jouera probablement un grand rôle dans la porosité des roches et contribuera aussi à une rapide infiltration de l'impluvium par les eaux de pluies.

Pour une approche hydrogéologique, nous avons utilisé les méthodes d'étude classiques autant que les modèles descriptifs et équivalents dans la mesure de leur validité en milieu fissuré. Les cartes piézométriques établies en octobre 2001, 2016 et 2009 dans la région de Mougheul montrent que l'écoulement principal des eaux se fait du Nord vers le Sud en direction de la source de Mougheul. Les essais de pompage donnent une valeur faible de transmissivité qui varient entre 3.22×10^{-5} m²/s dans le forage Menabha et 5.49×10^{-3} m²/s dans le forage F2.

D'après le calcul du rayon fictif du forage F3, on a constaté que ce forage possède une grande influence sur la nappe de la zone d'étude, l'implantation inadéquate des forages très rapprochés a conduit à l'abaissement des rabattements et à l'assèchement de la source de Mougheul au cours du temps.

L'évolution qualitative des eaux souterraines du champ captant de Mougheul pendant la période 2009-2019 reste potable selon les normes de potabilité de l'OMS avec des faciès chimiques bicarbonaté-calcique, bicarbonaté-magnésien, sulfaté-calcique et sulfaté-magnésien.

La classification selon le SAR et le diagramme de Wilcox montre que les eaux souterraines sont de bonne qualité, excepté le puits APC1 qui n'est propre qu'à l'irrigation et nécessite un contrôle continue de l'évolution de la salinité. L'analyse chimique des eaux ne montre pas un indice de pollution remarquable. Toutefois les rejets urbains sans traitement peuvent avec le temps menacer les eaux des aquifères carbonatés.

La méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque (par la méthode GOD) délimite deux zones de vulnérabilité : une zone très faiblement vulnérable et une seconde faiblement vulnérable.

Il est cependant recommandé de contrôler les zones et les sources de pollution avec un suivi des paramètres de pollution car la vulnérabilité de l'aquifère peut évoluer avec le temps.

Au terme de ce travail on suggère succinctement :

- D'implanter des stations climatiques dans le sous bassin à fin d'obtenir une meilleure estimation des paramètres du bilan.

- D'implanter des forages où on trouve les formations de Hassi Laâma, l'Oued Mennat et Koudiat El Haïdoura car leurs surfaces d'affleurement constituent une configuration géologique favorable pour l'emmagasinement et la circulation des eaux souterraines, contrairement aux formations de l'Oued El Abiod et d'Aïn Ben Serhane qui sont des formations imperméables.

- Eviter d'utiliser plus de forage pour l'exploitation, pour cela on peut choisir le forage F2 qui possède une valeur de transmissivité supérieure par rapport aux autres forages avec un débit ne dépasse pas le débit critique.

- Pour une stratégie efficace dans la gestion de la ressource en eau il est souhaitable d'établir une surveillance de la quantité et de la qualité des eaux souterraines par la réalisation de piézomètres à côté des forages d'exploitation.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES. 1995 « Synthèse sur les eaux souterraines de la région nord et est de la wilaya de Béchar». Direction régionale sud ouest Adrar.

AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES. 2004 «Plan National de l'eau». ANRH, Alger.

AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES. 2008 « Synthèse sur les eaux souterraines de la région nord et est de la wilaya de Béchar». Direction régionale sud ouest Adrar.

AGW-NET, BGR, IWMI, CAP NET, RAOB, IGRA. 2015 «L'intégration de la gestion des eaux souterraines pour les Organismes de Bassins Transfrontaliers en Afrique». un manuel de formation, module 8.

ACHOUR M. 2014 « Vulnérabilité et protection des eaux souterraines en zone aride : Cas de la vallée du M'Zab (Ghardaia- Algérie)». Mémoire de Magistère en sciences de la terre. Université d'Oran, 2014.

AHONON A. 2011 «Evaluation de la qualité physico-chimique et Bactériologique des eaux de surface dans les zones Montagneuses du sud-ouest du Togo : cas du canton de la vie». Thèse de master international en environnement eau et santé, université de Lome, Togo, 33Pp.

AKE G.E., DONGO K., BOYOSSORO H.K., DIBI B., SALE M.B., BIEMI J. 2009 « Contribution des méthodes de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC et GOD à l'étude de la pollution par les nitrate dans la Région de Bonoua (Sud-Est de la côte d'Ivoire)». European Journal of scientific Recherche. Vol.31 N°1 PP157-171.

ALLER L., BENNET T., LEHR J., PETTY R., HACKETT G. 1987 «DRASTIC: A standardized System for Evaluation Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic settings». US EPA Report 600/2-87/035, U.S. Environmental Protection Agency.

ALMERAS Y., ELMI S., MEKAHLI L., OUALI MEHADJI A., SADKI D ET TLILI M. 1994 «Biostratigraphie des Brachiopodes de Jurassique moyen dans le domaine Atlasique (Maroc, Algérie). Contraintes environnementales et relations avec l'évolution verticale des

peuplements d'ammonites». *Miscellanea, del. Servizio geologico National*. Vol. 5, pp. 219-248, 8 fig, 8 tavv.

ALOUI R., NABOU M., MEKKAOUI A. 2018 «Hydrodynamic and hydrochemical characterization of the liasic groundwater in atlassic zone (ksour of North, Bechar, Algeria)». Vol. 20, pp 90-98. ISSN-0972-3005.

ANDREU B., LEBEDEL V., WALLEZ MJ., LÉZIN C., EL ETTACHFINI M. 2013 «The upper Cenomanian–lower Turonian carbonate platform of the Preafrican Trough, Morocco: Biostratigraphic, paleoecological and paleobiogeographical distribution of ostracods». *Cretac Res* 45:216– 246.

APPELO C. A. J., POSTMA D. 1993 «Geochemistry, Groundwater and Pollution». xvi + 536 p.

BACK W., HANSHAW. B. 1965 «Chemical geohydrology». In: Chow VT (ed) *Advances in hydroscience*, vol 2. Academic Press Inc, New York, 1965, pp 49–109.

BARRES A., LALLEMAND A. 1994 « -Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions, BRGM-R37928, 17 p., (inédit).

BATRAM J., BALLANCE R. 1999 «Water quality monitoring : a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programs».

BEKRI A., KEBIALI Z. 2020 «Inventaire des captages en eau potable cas de Ksours du Nord de Béchar». Mémoire de Master en hydraulique générale. Université de Béchar.

BOUCHAHM N., SLIMANI R., CHAIB W., REZEG A., BENAOUA L.,DJABRI L. 2009 «Détermination de la vulnérabilité des eaux a la pollution par différentes méthodes : application a la nappe phréatique de Biskra Sud Algérien» *Journal Algérien des Régions Arides*, N°08, pp 35-50.

BOUDIA A. 2017 «Caractérisation hydrochimique et qualité des eaux de la nappe karstique de Saida». Mémoire de Master, université de Moulay Tahar de Saida.

BOUDJADJA A., MESSAHEL M., PAUC H. 2003 « Ressources hydriques en Algérie du Nord ». *Revue des sciences de l'eau*, volume 16, number 3, 2003.

BOUNAB S. 2017 « Ressources en eau et développement durable cas de la région Annaba-El Taref (Nord –Est Algérien) ». Thèse de doctorat en sciences, U.B.M. Annaba, 2017.

BOUNAB S., BOUSNOUBRA S., KHERICI A., SAOU N. 2017 « Determination of scaling, corrosion tendencies and water type in the Annaba-El Tarf aquifers, Northeastern of Algeria ». *J. Bio. Env. Sc* 10(5), 155p-162p.

BOUZIANI M. 2000 « L'eau de la pénurie aux maladies ». Ibn-khaldoun. 135p, 137p, 138p.

BRGM. 2002 « Cartographie de la vulnérabilité des nappes de grande-terre et de Marie Galante (Guadeloupe) ». Phase 1 –Définition de la méthode de détermination de la vulnérabilité, RP51783-FR, 41 p.

BRGM. 2006 « Guides techniques, qualité des eaux souterraines. Méthodes de caractérisation des états de références des aquifères français », France.

BURKE J.J., MOENCH M.H. 2000 « Groundwater and Society: Resources, Tensions and Opportunities ». United Nations. Publications, Sales No. E.99.II.A.1, ISBN 92-1-104485-5.

CASTANY G., MARGAT J. 1977 « Dictionnaire français d'hydrogéologie ». Edition du BRGM. 1977.

CASTANY G. 1963 « Traité pratique des eaux souterraines », Dunod, Paris, 1963, P657.

CASTANY G. 1980 « Hydrogéologie, principes et méthodes », Dunod, Paris, 1980.

CASTANY G. 1982 « Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie-Tunisie) ».

Aquifères. Bulletin du B.R.G.M., Hydrogéologie Géologie de l'Ingénieur, 2, 127p-148p.

CHABANE S., AMRI K., HAMDIDOUCHE R., 2019 « Deformation pattern in the El Ahmar area (Bechar Basin Southwestern Algeria) : contribution of Landsat 8 OLI and field measurement ». *Arabian Journal of Geosciences* (2019) 12: 158.

CHAPMAN D., KIMSTACH V. 1996 « Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring ». Edition, 2nd ed. E & FN SPON; London; pp 59-126, 1996.

CHIKHI-AOUIMEUR F., NOUHMEFNOUNE B., BANKIH K. 2006 « Rudistes du Cénomaniens et du Turonien de la région de Ghardaïa (Mzab, Algérie). Paléontologie,

biostratigraphie et paléobiogéographie». Mémoire du service Géologique National, Algérie 13:199–207p.

CHIKHI-AOUIEUR F. 2010 «L'Algérie à travers son patrimoine paléontologique : les rudistes.BAOSEM».

CIVITA M. 1994 «La carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria e Pratica. Pitagora» editrice, Bologne, Italie, 1994 (325 p.).

CHAFFAI H., LAOUAR R., DJABRI L., HANI A. 2006 «Etude de la vulnérabilité a la pollution des eaux de la nappe alluviale de Skikda : Application de la méthode DRASTIC». Bulletin du Service Géologique National, Vol. 17(1) ,63-74.

CHAMPAGNE L., CHAPUIS R.P. 1993 «Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode DRASTIC. Rev. Sc. Tech. Eau;26 ; pp. 76 -169.

CHAVAILLON J., 1964 «Etude stratigraphique des formations Quaternaires du Sahara nordoccidental (Colomb-Bechar à Reggane)». Th. Doc., publ. CRZA. Series geol. 10, CNRS, Paris. 393p.

CONRAD J., 1970 «Mise en évidence du tournaisien inférieur dans la vallée de la Saoura ». Compte rendus d'Académie des sciences, Paris t.271, 900p- 903p.

CONRAD J., 1984 «Les séries Carbonifères du Sahara central Algerien : Stratigraphie, sédimentation, évolution structurale». Th. de doct. d'état, Uni. de droit, d'econo. et des sciences d'Aix-Marseille.

CONRAD J., LEMOSQUET Y. 1984 «Du craton vers sa marge; évolution sédimentaire et structurale du bassin Ahnet-Timimoun-Bechar (Sahara algérien) au cours du Carbonifère; données paléoclimatiques». Bull Soc Géol Fr XXVI(N°6):987–994p.

DAWOUD, M.A. (2013), The development of integrated water resource information management system in arid regions, Arab J Geosci, 6: 1601.

DELEAU P., 1951 «Les bassins Houillers du Sud Oranais dans la région de Colomb-BecharAbadla». Série 2, strat. N°20, Bulletin de service de la carte géologique de l'Algérie, France, 277 p.

DELEAU P. 1952 « Alimentation de Colomb-Béchar». SERV. Géol. Algérie, Trav. Réc. Coll.III, 1952.

DREVER I. 2001 «The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments», Prentice Hall Publishers, P436.

DIRECTION D'HYDRAULIQUE DE LA WILAYA DE BECHAR (DHW). 2009 «Compte-rendu des travaux hydrogéologiques. Rapport interne (inédit)».

DIRECTION DE PLANIFICATION ET AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

DPAT . 2010 «Bulletin de la direction de planification et aménagement de la wilaya de Béchar».

DOMENICO, PA., SCHWARTZ S. 1997 « Physical and Chemical Hydrogeology». John Wiley & Sons, New York, 528 pages

DU DREASNAY R., HUPE P. 1953 «La série cambrienne de jebel Tibalicine (Cofins algéro-marocains du Sud)». Extrait des comptes rendus des séances de l'Académie des sciences, t.236, p. 1061-1063p.

DUEE G., TANI NK., ZERROUKI A., BOUSMAHA M., KACI AA. 1992 «Les boutonnières pan-africaines du Haut-Atlas algérien : aspects structuraux et sédimentaires = Pan-African outcrops of Algerian High Atlas». structural and sedimentary setting. C R AcadSci 314(N°13):1477–1484

ENGEL BA., NAVULUR KCS., COOPER BS., HAHN L. 1996 «Estimating groundwater vulnerability to non point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale», Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publi., 235: 521-526.

FABRE J. 1976 «Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines: La couverture phanérozoïque» (Vol. 1). SNED.

FAO. 2003 « Groundwater Management – The Search for Practical Approaches. Water Reports 25. FAO (Food and Agricultural Organization) », ISBN 92-5-104908-4, 2003.

- FELLAH H. 2009** «L'Anticlinal de Ben Zireg : Lithostratigraphie, Evolution séquentielle et environnements de dépôts au Dévonien inférieur et moyen (Béchar, Sahara Algérien Nord-Occidental)». Magister, Université Mohamed Ben Ahmed d'Oran 2, 136p.
- FOSTER S. S. D. 1987** « Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy – Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, RIVM, TNO Committee on Hydrogeological Research, pp. 69-86.
- GILLI E., MANGAN C., MUDRY J. 2008** « Hydrogéologie : Objets, méthodes, application ». 2^e Edition, DUNOD, Paris, 2008.
- GLEICK PH. 2000** «A look at twenty-first century water resources development». Water Int 25(1):127p–138p.
- GOGU R., DASSARGUES A. 1998** « Sensitivity analysis for the EPIK vulnerability assessment in a local karstic aquifer.Workshop». “Vulnérabilité et protection des eaux karstiques”. Neuchâtel (Suisse).
- GOGU R., DASSARGUES A. 2000** «Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods». Environmental Geology, 39(6), 549-559.
- GUERRE C., 1974** «Alimentation en eau potable de Bechar et de Kenadsa». DEMRH, 36 p.
- HACHOUR K. 2012** «Etude stratigraphique et structurale de la région d’El Abiodh Sidi Cheikh : Géométrie et cinématique de l’accident sud atlasique (Atlas saharien occidental)». Thèse Magister USTHB 103.
- HAMDIDOUCHE R. 1997** «Le Bassin salifère de Béchar-Kenadsa "étude sédimentologique et dynamique». Thèse Magister, U.S.T.H.B.
- HAMDIDOUCHE R. 2009** «le bassin intra-cratonique de l’Ougarta (SWAlgerie) : évolution géodynamique au Paléozoïque».PhD thesis, U.S.T.H.B 175.
- HANDA BK. 1965** «Modified Hill-piper diagram for presentation of water analysis data»,. Curr Sci, 1965, 34:131–314.

HCEFLCD. 2006 « Haut Commissariat Aux Eaux et Forêt et la Lutte Contre la Désertification. Etude sur la pisciculture au barrage Almassira » ; CR dar CHAFAAI ; Cercle d'ELBROUGE ; Province de Settat ; 201p.

HEM JD. 1985 «Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water». USGS Water Supply Paper 2254:117–120

IDROTECNECO, 1979 «Etude hydrogéologique de la région de Bechar». Rapport interne, DHWB. 170 p.

JACINTHA T.G.A., RAWAT K.S., MISHRA A., SINGH S.K. 2017 «Hydrogeochemical characterization of groundwater of peninsular Indian region using multivariate statistical techniques». Appl Water Sci 7:3001– 3013. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0400-9>.

JOURDA J. P., SALEY M. B., DJAGOUA E. V., KOUAME K. J., BIEMI J. ET

KABOUR A. 2017 « Impact des rejets urbains sur l'environnement et sur les ressources en eau de la région de Bechar (Sud Ouest Algérien) ». Thèse de doctorat en sciences, université de Biskra.

KABOUR A., MEKKAOUI A., CHEBBAH L. 2008 «Assessment and management of water resources in an arid zone, case of the city of Béchar (South-West Algeria)», SNHYC08, P1-3.

KAZI-TANI N. 1986 «Evolution géodynamique de la bordure nord africaine. Le domaine intraplaque Nord-algérien : Approche mégaséquentielle». Thèse de Doctorat e s sciences. Univesité Pau

KENDOUCI M.A., KHARROUBI B., MEBARKI S., BENDIDA A. 2016 «physicochemical quality of groundwater and pollution risk in arid areas: the case of Algerian Sahara», Arab J Geosci (2016) 9:146.

KENDOUCI M.A. 2018 « Etude de risque de pollution des eaux souterraines de la ville de Béchar et valorisation du sable en vue de son utilisation en traitement des eaux usées» Thèse de doctorat en sciences, USTO-MB Oran, 2018.

KENDOUCI M.A., BENDIDA A., MEBARKI S., KHARROUBI B. 2019 « Study of the management efficiency of the drinking water supply in arid areas: case of Bechar city (southwest of Algeria)», *Appl Water Sci* (2019) 9:192.

KETTAB A. 2001 «Les ressources en eau en Algérie, Stratégies, enjeux et vision (Water resources in Algeria: strategies, investments, and vision)», *Desalination* vol 136 25–33

KISHAN S. R., SINGH S., GAUTAM S. K. 2018 «Assessment of groundwater quality for irrigation use: a peninsular case study», *Applied water science*, 2018, 8:233.

LAMALI A., MERABET N., HENRY B., MAUCHE S., GRAINE-TAZROUT K., LATIFI S., CHAAB S. 2017 « Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord – Est Algérien» *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 34 : 48-62. 2017.

MEKKAOUI A., AYACHE M. 2013 «Polyphased geodynamical evolution of the Ougarta (Algeria) magmatic complexes evidenced by paleomagnetic and AMS studies». *Tectonophysics* 588:82–99.

MAALEM L., BENAÏSSA Z. 2014 «Caractérisation physico-chimique des eaux de certains point d'eau utilisées comme source d'eau potable dans la région de Béchar (Ksour du Nord de Béchar)». Mémoire de Master en hydraulique générale. Université de Béchar.

MARGAT J. 1972 « Terminologie hydrogéologique ». Edition BRGM, juin 1972.

MARGAT J. 1990 « Les eaux souterraines dans le monde ». Edition BRGM, Décembre 1990.

MARGAT J. 2008 « Exploitations et utilisations des eaux souterraines dans le monde». Co-édition UNESCO et BRGM, 2008.

MARDHEL V., PINSON S., GRAVIER A. 2005 « Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais». Rapport BRGM/RP-54238-FR. 113 p.

MARSILY G., BESBES M. 2017 « Les eaux souterraines ». *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*. ISSN 1268-4783, 2017/2 N° 86 | pages 25 à 30.

MASSA A., COMBAZ A. 1965 «Observations sur les Séries SiluroDévoniennes des confins Algéro-Marocains du sud (1954-1955)». Compagnie Française des pétroles.

MEBARKI A. 2010 « La région du Maghreb face à la rareté de l'eau». 2nd International Conference: Climate, Sustainability and Development in semi-arid regions August 16-20, 2010, Fortaleza - Ceará, Brazil.

MEBARKI S. 2013 « Caractérisation hydrogéologique de l'aquifère jurassique de la plaine de Mougheul , Ksour du Nord de Béchar ».Mémoire de magistère, université de Béchar, 2013.

MEBARKI S., BENALI K., KENDOUCI MA. 2021 « Physicochemical evolution and evaluation of groundwater quality in Mougheul area (Southwest of Algeria)» Applied Water Science (2021) 11:40. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01368-7>

MEINDRE M., 1955 «Etude géologique du massif du Boukaïs». Bull. Sci. Et Econ. Bur. Rech. Min. Algérie, Alger, 2, 7-48.

MENCHIKOFF N. 1936 «Etudes géologiques sur les confins algéro-marocains du Sud». Bull. Soc. Géol. France, S. 5, t. VI, p. 131-148.

MEKKAOUI A., 2000 «Bordure du sillon atlasique – plateforme saharienne, pendant le jurassique moy-inf (Grouz meridional, chebket charef-fendi) Algérie Sud Occidentale». Mémoire de Magister, université d'Oran, 234p.

NEMČIĆ-JUREE J., SINGH S. K. & JAZBEE A. 2017 « Hydrochemical investigations of groundwater quality for drinking and irrigational purposes: two case studies of Koprivnica-Kriz Źevci County (Croatia) and district Allahabad (India)», Sustain. Water Resour. Manag., DOI 10.1007/s40899-017-0200-x.

NEDJARI A. 1991 «Dynamique du remplissage littoral et continentale moscovo-permien du bassin d'avant fosse de Béchar (Algérie) électroséquences modèle sédimentaires paléopédogeneses». Thèse Doctorat d'Etat USTHB 289p.

NEDJARI A., AIT OUALI R., DELFAUD J. 2002 «The Triassic of the Algerian Atlasic and Saharian basins : check point and new approach]. In: Stratigraphie de l'Algérie : Contributions et mises au point; CSA, SGA (Eds)», Mémoires du Service Géologique de l'Algérie 11 (2002) 87-113.

ONS. 2015 «Collections Statistiques N° 177/2013», Statistiques Régionales et Cartographie
PAREYN C., 1961 «Les massifs carbonifères du Sahara Sud – Oranais ». Edition du CNRS, 325p.

PERRACHE C. 2004 «The volcano-sedimentary Boukaïs inlier (southwestern Algeria): evidence for lithospheric thinning during the Late Neoproterozoic». J Afr Earth Sci V39:256–266p.

PERRODON A., 1951 «Etude des confins Algéro-marocains au Nord de Béchar». Rapport de mission, pp1-9.12p.

PESCOD.M.B; Design. 1985 « operation and maintenance of waste water stabilization ponds in treatment and use of sewage effluent for irrigation». Ed Pescodand Arar, 93-114.

PNE. 2010 «Actualisation du plan national de l'eau». (Vol. 2) Algerie.

RAZACK M. 2006 «Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire : approche par analyse multicritère et test de validation». Revue de Télédétection.Vol.5, n°4, pp. 339-357.

RAWAT KS., MISHRA AK., SEHGAL VK., TRIPATHI VK. 2012 «Spatial variability of ground water quality in Mathura district (Uttar Pradesh, India) with geostatistical method». Int J Remote Sens Appl 2(1):1–9

RAWAT KS., MISHRA AK., SEHGAL VK., TRIPATHI VK. 2013 « Identification of geospatial variability of fluoride contamination in ground water of Mathura District, Uttar Pradesh, India». J Appl Nat Sci 4(1):117–122

RAWAT K. S., GERMAN AMALI JACINTHA T., SINGH S.K. 2018 « Hydro-chemical Survey and Quantifying Spatial Variations in Groundwater Quality in Coastal Region of Chennai, Tamilnadu, India – a case study» .Indonesian Journal of Geography Vol. 50, No. 1, June 2018 . 57p – 69p.

ROCHE MA., 1973 «Hydrogéologie de la haute Saoura (Sahara Nord Occidental). CNRS (Recherche sur les zones arides)» France, 1973, 91p.

RODIER .J. 1976 « l'analyse de l'eau ; eaux naturelles ; eaux résiduaire ; eaux de mer» ; édition dunod, 8eme édition ; pages (945 à1075).

RODIER. J. 1994 « L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer». Edition Dunod Paris.

RODIER .J, BAZIN .C, BROUTIN. J.P, CHAMBON. P, CHAMPSAUR. H, RODI .L

.1996 « L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer» ; 8e édition. Paris: DUNOD ;1384 p.

RODIER J., LEGUBE B., MERLET N., BRUNET R. 2009 « L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer »,9ème Édition 1383p.

SCHOELLER H. 1959 «Hydrogéologie des régions arides», progrès récents. Unesco, France, 127 p.

SDWF, 2020 «Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique». Gouvernement du Canada, 2009, 6 fév.

SHARMA B., KUMAR M., DENIS DM., SINGH SK. 2018 «Appraisal of river water quality using open-access earth observation data set: a study of river Ganga at Allahabad (India)». Sustain Water Res Manag. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0251-7>.

SINGH SK. 2002 «Quality assessment of surface and sub-surface water of Damodar river basin, India» . J Environ Health 44:41–49

SINGH KP., MALIK A., MOHAN D., SINGH VK., SINHA S. 2006 « Evaluation of groundwater quality in northern Indo-Gangetic alluvium region». *Environ Monit Assess* 211p–230p.

SINGH SK., MUSTAK S., SRIVASTAVA PK., SZABO S., ISLAM T. 2015a «Predicting spatial and decadal LULC changes through cellular automata Markov chain models using earth observation datasets and geo-information». *Environ Process* 2: 61p–78p.

SINGH S., SRIVASTAVA P.K., GUPTA, M., MUKHERJEE S. 2012 « Modeling mineral phase change chemistry of groundwater in a rural-urban fringe». *Water Sci. Technol.* 66(7), 1502-1510.

SANDRE. 2011 « Dictionnaire des données ; Mesure de la qualité des eaux souterraines des eaux souterraines ».

SEDDIKI AM., REMACI-BENAOUDA N., COTIN JY., MOINE BN., MÉNOT P.,

SRIVASTAVA P.K., MUKHERJEE S., GUPTA M. 2008 «Groundwater quality assesment and its relation to land use/land cover using remote sensing and GIS. Proceedings of international groundwater conference on groundwater use- efficiency and sustainability: groundwater and drinking water». *Issues, Jaipur, India*, pp.19-22.

SRIVASTAVA P.K., HAN D., GUPTA M. MUKHERJEE S. 2012 «Integrated framework for monitoring groundwater pollution using a geographical information system and multivariate analysis», *Hydril.Sci. J.* 57(7), 1453-1472.

SUN H., BERGSTROM JC., DORFMAN JH. 1992 «Estimating the benefits of groundwater contamination control». *South J Agric Econ* 24:63.

THAKUR JK., SINGH P., SINGH SK., BHAGHEL B. 2013 « Geochemical modelling of fluoride concentration in hard rock terrain of Madhya Pradesh, India». *Acta Geol Sin* 87:1421p–1433p. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12139>.

THAKUR JK., DIWAKAR J., SINGH SK. 2015 «Hydrogeochemical evaluation of groundwater of Bhaktapur Municipality», Nepal. *Environ Earth Sci* 74:4973–4988.

TRAVI Y. 1993 « hydrogéologie et hydrochimie des aquifères du Sénégal ».

UNEP. 2003 « Groundwater and its Susceptibility to Degradation». UNEP/DEWA, Nairobi, 2003.

US SALINITY LABORATORY. 1954 «Diagnosis and improvement of saline and alkali soils». Agricultural Handbook No 60. USDA, 160

UQAM, CRE, MRC, GROBEC, AGTCQ. 2013 «Projet de reconnaissance des eaux souterraine du bassin de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour». obv-ca.org/paces.

VAN DER GUN J. 2012 « Groundwater and Global Change: Trends, Opportunities and Challenges», in WWDR4, UNESCO, 2012.

VERDEIL P. 1988 «Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie».

WEYANT M., PAREYN C. 1975 «Mise en évidence du caractère condensé de la série dinantienne de la bordure méridionale du Djebel Grouz (Sahara sud- Oranais) » Bulletin de la société géologique de la France, t. 7, vol . XVII, n°1, 52-55p.

WHO. 1993 «Guidelines for drinking water quality». 2nd edn, vol 1–3, World Health Organization, Geneva.

WHO. 2006 « Guidelines for drinking-water quality Recommendations», vol 1, 3rd edn. World Health Organization, Geneva .

WILCOX L.V. 1955 «Classification and use of irrigation waters» vol 969. U.S. Department of Agriculture Circular, Washington, DC, 1955, p 19

YAMMANI SR., REDDY T.V.K., REDDY M.R.K. 2008 «Identification of influencing factors for groundwater quality variation using multivariate analysis». Environ Geol 55:9–16

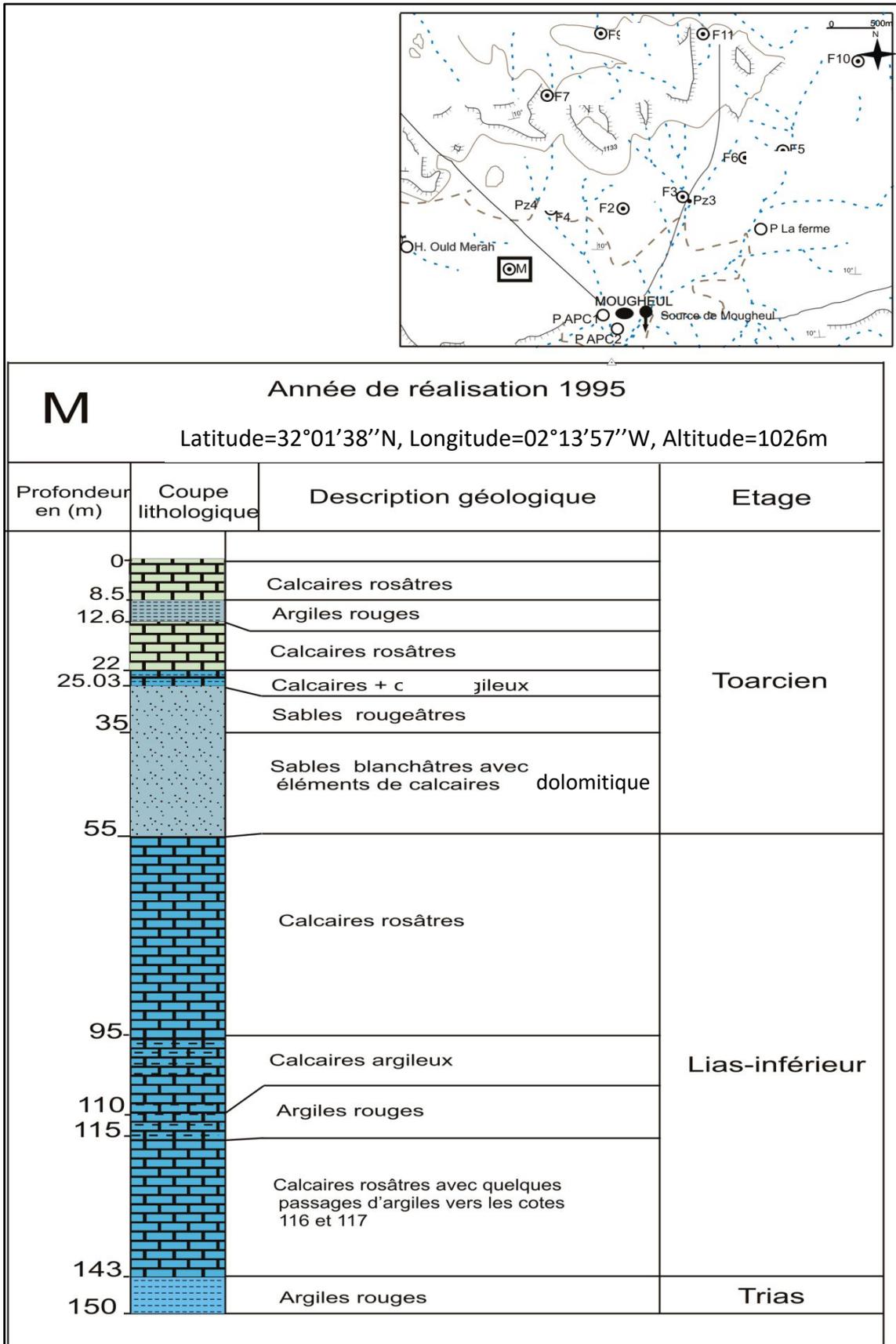
ZERROUKI A., 1993 «Etude des affleurements du Précambrien Deux (P II) du Nord de Béchar». Bulletin du Service Géologique de l'Algérie, 4 (2) (1993) 89-97.

ZERROUKI A. 2000b «Lithostratigraphie du Protérozoïque de la région de Boukais et étude des minéralisations associées (Béchar, Sud-ouest algérien)». Bull Serv Géol Algérie 11(n° 2):163–183.

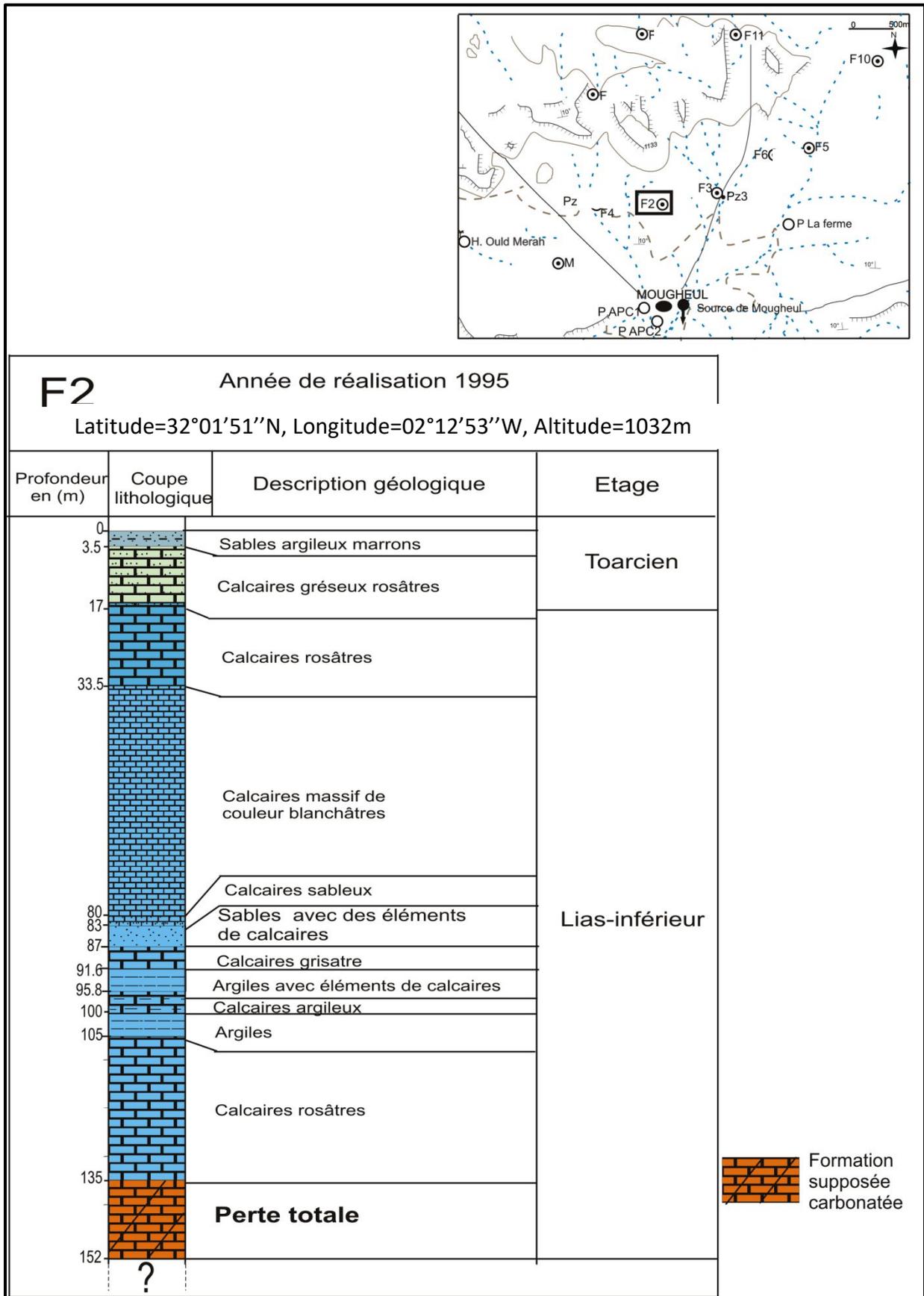
ZERROUKI A. 2004 «Evolution structurale de la région de Béchar pendant les cycles orogéniques hercyniens et alpins». Bull Serv Géol Algérie 15(N°2):135–156.

Annexes

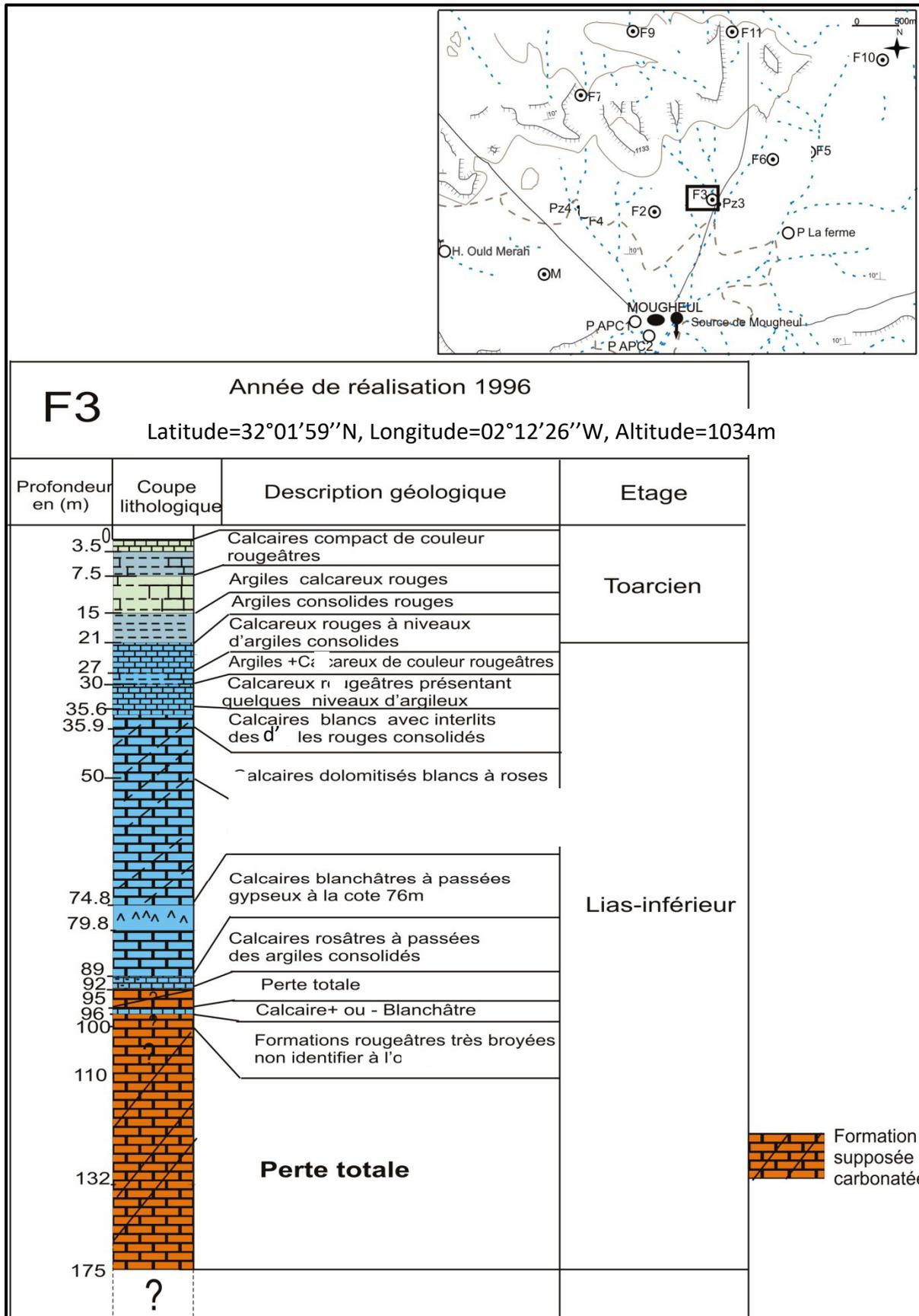
Annexe 1 : Coupe lithologique du forage Menabha.



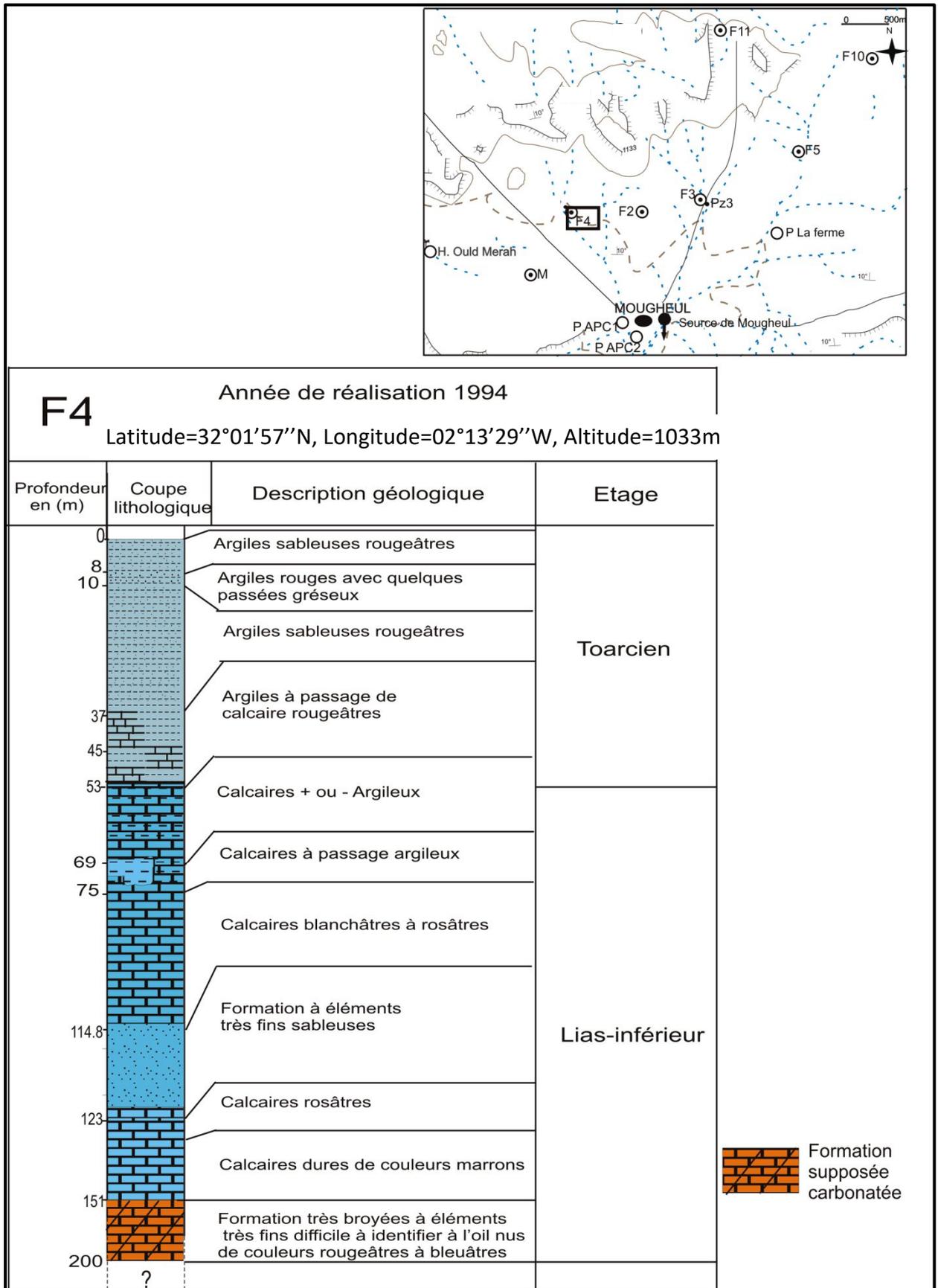
Annexe 2 : Coupe lithologique du forage F2.



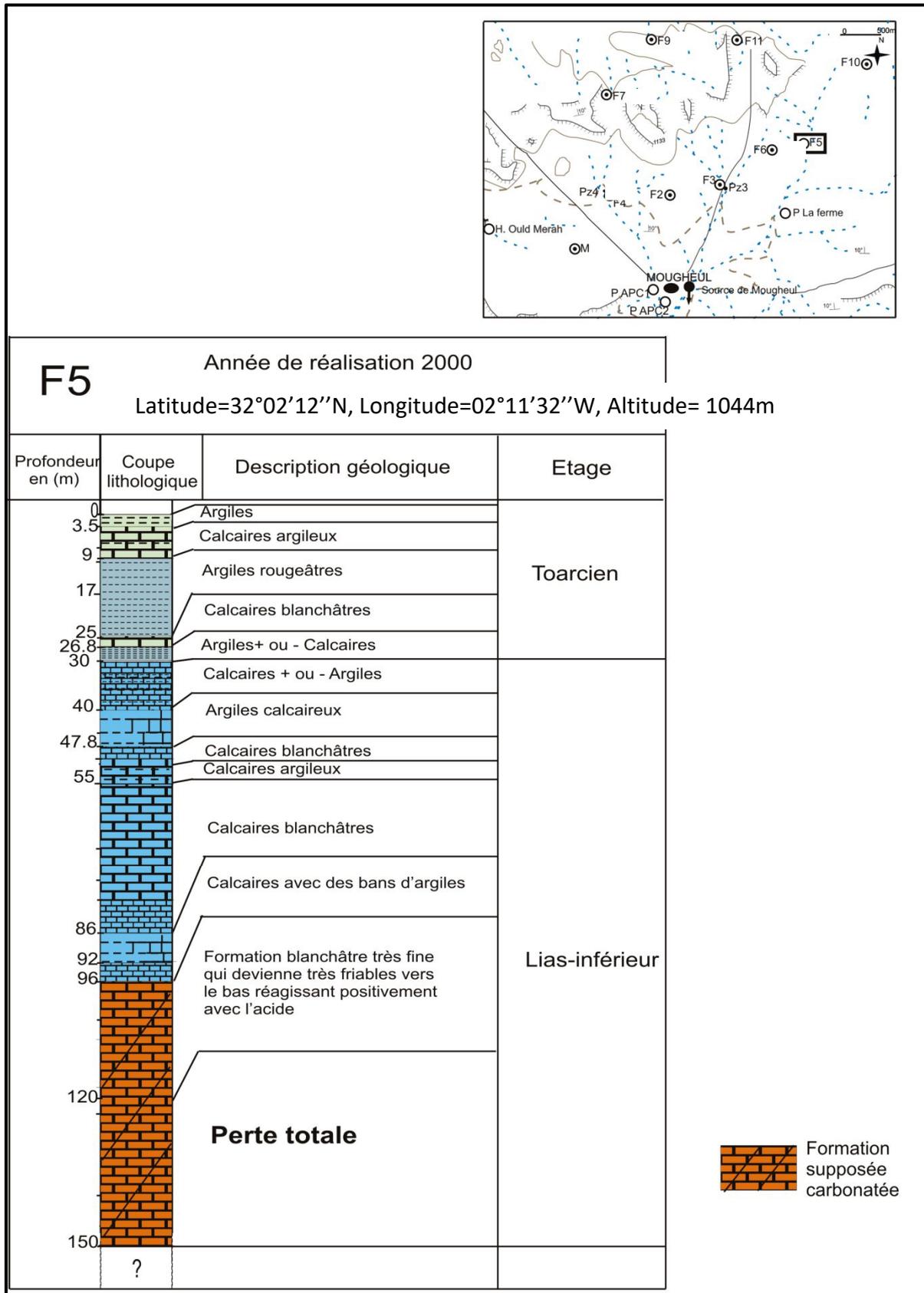
Annexe 3 : Coupe lithologique du forage F3.



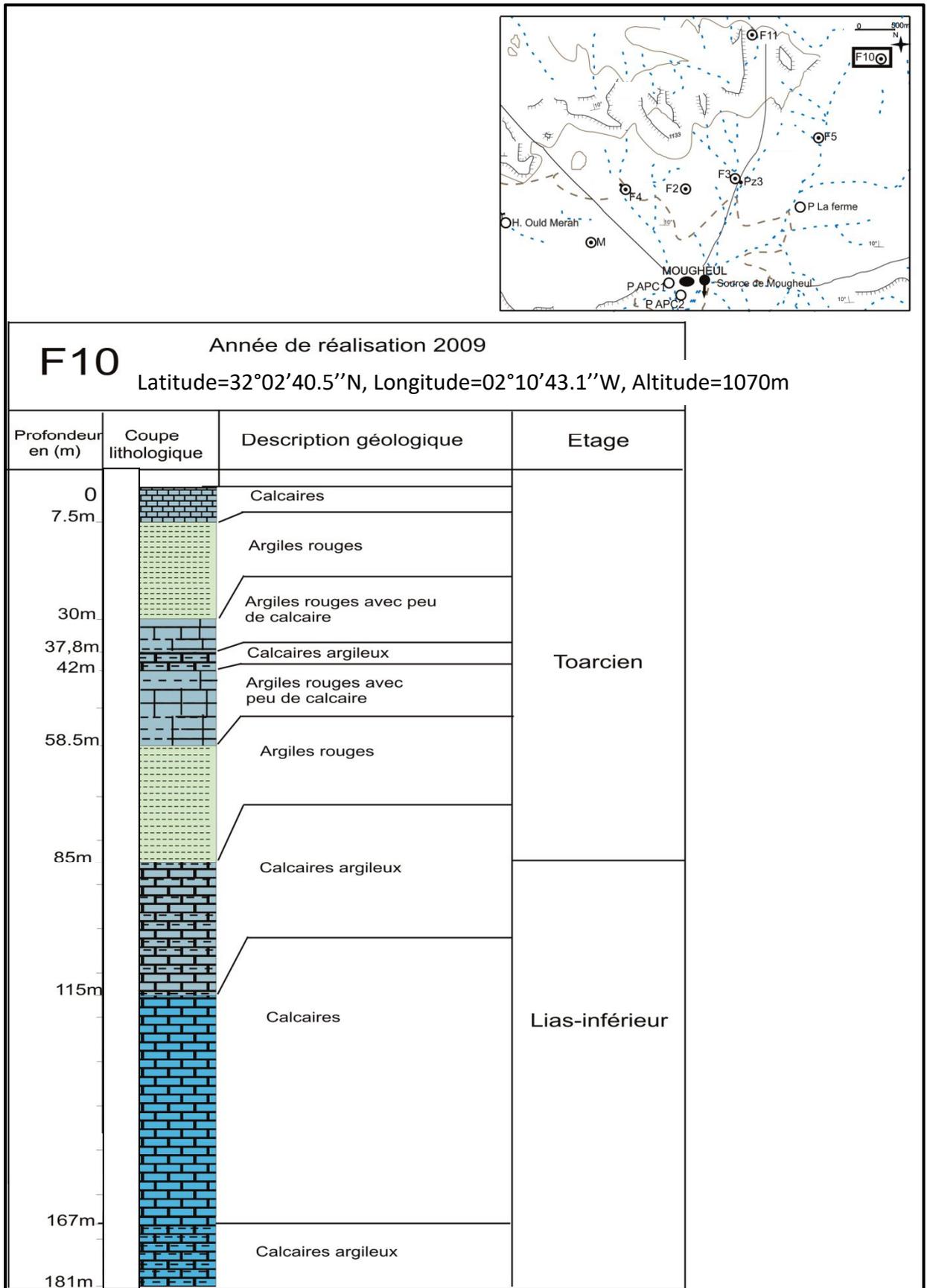
Annexe 4 : Coupe lithologique du forage F4.



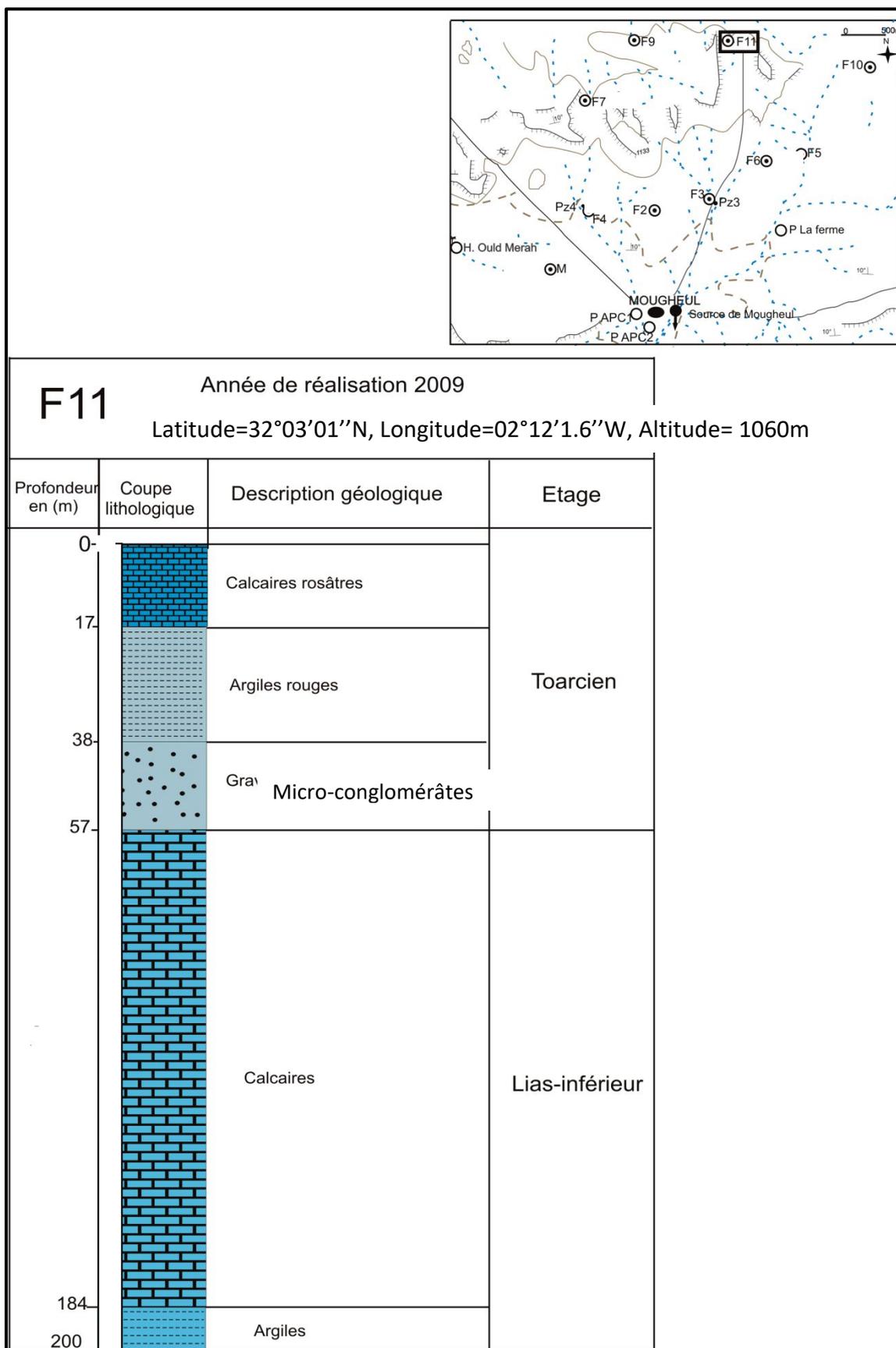
Annexe 5 : Coupe lithologique de forage F5.



Annexe 6 : Coupe lithologique de forage F10.



Annexes 7: Coupe lithologique de forage F11.



Annexe 8 : Essais de pompage (Forage Menabha (M)).

DATE	TEMPS(s)	ND(m)	Rabattement(m)	DATE	TEMPS(s)	ND(m)	Rabattement(m)
22/10/2001	0	10,6	0		25200	57	46,4
	30	13,82	3,22	23/10/2001	32400	57,15	46,55
	300	30,12	19,52		39600	57,2	46,6
	360	33,25	22,65		46800	57,2	46,6
	420	38,38	27,78	24/10/2001	54000	57,15	46,55
	480	40,33	29,73		61200	57,18	46,58
	600	43,57	32,97		68400	57,1	46,5
	720	47,68	37,08		75600	57,15	46,55
	900	52,32	41,72		82800	57,1	46,5
	1020	55,28	44,68	25/10/2001	90000	57,15	46,55
	1200	56,82	46,22		97200	57,17	46,57
	1500	56,9	46,3		111600	57,2	46,6
	2100	56,75	46,15	26/10/2001	133200	57,15	46,55
	2400	57,15	46,55	27/10/2001	140400	57,15	46,55
	2700	57	46,4	28/10/2001	226800		
	3600	56,94	46,34		248400	108	97,4
	4500	56,8	46,2		277200	108,3	97,7
	5400	56,82	46,22		291600	108,35	97,75
	6300	56,8	46,2		298800	108,3	97,7
	7200	56,83	46,23		306000	108,35	97,75
	9000	56,84	46,24	29/10/2001	131200	108,35	97,75
	10800	56,89	46,29		356400	108,37	97,77
	12600	56,72	46,12	30/10/2001	392400		
	14400	56,8	46,2	01/11/2001	572400	108,6	98
	16200	56,88	46,28	02/11/2001	792000	108,7	98,1
	18000	57,15	46,55	03/11/2001	1036800	108,8	98,2
	21600	56,9	46,3		/	/	/

Annexe 9 : Essais de pompage (Forage F2).

DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)	DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)
22/10/2001	0	23,6	0		21600	33,85	10,25
	30	28	4,4		25200	33,85	10,25
	60	28,5	4,9		28800	33,83	10,23
	120	29,38	5,78	23/10/2001	32400	33,93	10,35
	180	30,51	6,91		36000	34,01	10,41
	240	31,8	8,2		39600	34,04	10,44
	300	31,85	8,25		43200	34,21	10,61
	360	32,03	4,43		50400	34,21	10,61
	420	32,15	8,55		57600	34,35	10,75
	480	32,25	8,65		64800	34,43	10,83
	540	32,31	8,71		72000	34,4	10,8
	600	32,4	8,8	23/10/2001	79200	34,46	10,86
	720	32,52	8,92		86400	34,48	10,88
	900	32,7	9,1		100800	34,42	10,82
	1020	32,81	9,21		115200	34,43	10,83
	1200	33,02	9,42		129600	34,46	10,86
	1500	33,16	9,56		144000	34,48	10,88
	1800	33,23	9,63		158400	34,54	10,94
	2100	33,28	9,68	24/10/2001	172800	34,52	10,92
	2400	33,3	9,7		187200	34,52	10,92
	2700	33,33	9,73		216000	34,58	10,98
	3600	33,38	9,78	25/10/2001	244800	34,58	10,98
	4500	33,44	9,84		288000	34,85	11,25
	5400	33,48	9,88	26/10/2001	331200	34,78	11,18
	6300	33,5	9,9	27/10/2001	417600	34,84	11,24
	7200	33,52	9,92	28/10/2001	504000	34,76	11,16
	9000	33,55	9,95		590400	34,67	11,07
	10800	33,7	10,01	30/10/2001	676800	34,85	11,25
	12600	33,75	10,15	31/10/2001	763200	34,86	11,26
	14400	33,76	10,16	01/11/2001	849600	34,88	11,28
	16200	33,79	10,19	02/10/2001	936000	34,59	10,99
	18000	33,85	10,25	03/11/2001	1036800	34,82	11,22

Annexe 10 : Essais de pompage (Forage F3).

DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)	DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)
26/10/2001	0	24,2	0		230400	35,01	11,61
	600	24,53	1,13		244800	35,08	11,68
	1200	31,7	8,3		225000	35,32	11,92
	1800	31,72	8,32	30/10/2001	266400	34,99	11,59
	3600	31,84	8,44		273600	35,01	11,61
	7200	31,95	8,55		284400	35,08	11,68
	10800	32,06	8,66		291600	35,08	11,68
	14400	32,2	8,8		298800	35,32	11,92
	18000	32,19	8,79		309600	34,94	11,54
	21600	32,62	9,22		316800	34,95	11,54
	25200	32,65	9,25		324000	34,97	11,57
	39600	32,69	9,29		331200	35,05	11,64
27/10/2001	54000	33,2	9,8		338400	35,06	11,66
	68400	33,34	9,94	31/10/2001	360000	35,13	11,73
	82800	33,55	10		374400	35,16	11,76
28/10/2001	97200	33,63	10,23		388800	35,17	11,77
	111600	33,63	10,23		403200	35,18	11,78
	126000	33,63	10,23		417600	34,49	12,09
	140400	33,63	10,23		432000	36	12,6
	162000	34,52	11,12	01/11/2001	446400	35,48	12,08
29/10/2001	180000	34,92	11,52		468000	35,52	12,12
	144400	34,89	11,49		489600	35,81	12,41
	208800	34,96	11,56		511200	35,82	12,42
	223200	34,99	11,56	02/11/2001	532800	35,88	12,48
	/	/	/	03/11/2001	619200	35,88	12,48

Annexe 11 : Essais de pompage (Forage F5).

DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabatement(m)	DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabatement(m)
22/10/2001	0	28,08	0		21600	74,55	46,47
	60	34,12	6,04		25200	75,21	47,13
	120	36,8	8,72		28800	75,5	47,42
	180	38,35	10,27		32400	75,8	47,72
	240	41,75	13,67		36000	75,95	47,87
	300	44,66	16,58	23/10/2001	39600	76,2	48,12
	360	47,25	19,17		43200	76,4	48,32
	420	48,98	20,9		46800	76,42	48,34
	480	50,24	22,16		50400	76,45	48,37
	540	51,6	23,52		54000	76,5	48,42
	600	52,8	24,72		57600	76,28	48,2
	720	54,88	26,77		61200	76,12	48,04
	900	58,22	30,14		64800	75,55	47,47
	1020	59,66	31,58		68400	75,53	47,45
	1200	61,55	33,47		72000	75,47	47,35
	1560	63,9	35,82		75600	76,15	48,07
	1800	65,58	37,5		79200	76,66	48,58
	2100	66,89	38,81	24/10/2001	90000	76,8	48,72
	2400	67,72	39,64		97200	76,95	48,87
	2700	68,3	40,22		104400	76,9	51,82
	3600	69,62	41,54		111600	77,4	49,32
	4500	70,67	42,59		118800	77,8	49,72
	5400	71,38	43,3		126000	77,88	49,8
	6300	72,12	44,04	26/10/2001	201600	78,5	50,42
	7200	72,6	44,52		216000	78,8	50,72
	10800	73,67	45,59	26/10/2001	262800	78,95	50,87
	12600	73,94	45,86		273600	79,1	51,02
	14400	74,24	46,16		306000	79,25	51,17
	16200	74,35	46,27		320400	79,47	51,39
	18000	74,45	46,37		1036800	82,55	54,8

Annexe 12: Essais de pompage (Forage F10).

TEMPS(s)	Rabatement(m)	TEMPS(s)	Rabatement(m)
0	0	8400	59,9
30	40,25	9000	59,9
60	45	9600	59,9
90	46	10800	59,9
120	48,18	11700	59,9
150	50,15	12600	59,9
180	51,05	13500	59,9
210	52	14400	59,9
240	54,3	15600	59,9
270	54,45	16800	59,9
300	54,5	18000	59,9
360	54,6	19800	59,9
420	54,45	21600	59,9
480	55,45	25200	59,9
540	56,5	28800	59,9
600	56,8	32400	59,9
660	56,9	36000	59,9
720	57,25	39600	59,9
780	57,45	43200	59,9
840	57,63	46800	59,9
900	57,84	50400	59,9
1050	58,03	54000	59,9
1200	58,27	61200	59,9
1350	58,55	72000	59,9
1500	58,65	79200	59,9
1800	58,75	86400	59,9
2100	59,19	933600	59,9
2400	59,45	104400	59,9
3000	59,6	115200	59,9
3300	59,84	126000	59,9
3600	59,9	136800	59,9
3900	59,88	147600	59,9
4200	59,88	158400	59,9
4500	59,9	169200	59,9
4800	59,9	180000	59,9
5100	59,9	190800	59,9
5400	59,9	201600	59,9
5700	59,9	216000	59,9
7200	59,9	230400	59,9
7800	59,9	244800	59,9
/	/	259200	59,9

Annexe 13 : Essais de pompage (Forage F11).

TEMPS(s)	Rabatement(m)	TEMPS(s)	Rabatement(m)
0	0	8400	90,1
30	33,1	9000	90,1
60	37,2	9600	90,1
90	40,2	10800	90,1
120	43,1	11700	90,1
150	45	12600	90,1
180	45,2	13500	90,1
210	49,8	14400	90,1
240	51,3	15600	90,1
270	53,4	16800	90,1
300	55,4	18000	90,1
360	59,2	19800	90,1
420	62,1	21600	90,1
480	65,2	25200	90,1
540	65,2	28800	90,1
600	65,2	32400	90,1
660	73,2	36000	90,1
720	75,4	39600	90,1
780	75,4	43200	90,1
840	77,3	46800	90,1
900	77,3	50400	90,1
1050	77,3	54000	90,1
1200	82,2	61200	90,1
1350	82,2	72000	90,1
1500	84,1	79200	90,1
1800	85,4	86400	90,1
2100	86,2	933600	90,36
2400	87,4	104400	90,45
3000	87,45	115200	90,4
3300	88,3	126000	90,43
3600	88,4	136800	90,4
3900	89,15	147600	90,42
4200	89,4	158400	90,45
4500	89,55	169200	90,43
4800	89,2	180000	90,4
5100	89,33	190800	90,4
5400	89,44	201600	90,4
5700	90	216000	90,4
7200	90,05	230400	90,4
7800	90,07	244800	90,4
/	/	259200	90,4

Annexe 14 : Remontée (Forage M).

DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)	DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)
03/11/2001	0	108,8	98,2		13200	12,62	2,02
	240	104,3	93,7		14400	12,61	2,01
	300	102,97	92,37		16200	12,56	1,96
	360	102,06	91,46		18000	12,53	1,93
	420	101,82	91,22		19800	12,5	1,9
	480	99,14	88,54		21600	12,48	1,88
	600	92,82	82,22		23400	12,47	1,87
	750	74,17	63,57		25200	12,44	1,84
	900	64,34	53,74		28800	12,41	1,81
	1050	57,67	47,07		32400	12,37	1,77
	1200	50,48	39,88		36000	12,34	1,74
	1500	38,58	27,98	04/11/2001	43200	12,15	1,55
	1800	30,7	20,1		64800	11,99	1,39
	2100	21,82	11,66		72000	11,95	1,35
	2400	17,82	7,22		79200	11,92	1,32
	2700	14,96	4,36		86400	11,9	1,3
	3000	13,42	2,82		93600	11,86	1,26
	3300	13,15	2,55		100800	11,83	1,23
	3600	13,02	2,52		108000	11,8	1,2
	4200	12,94	2,34		115200	11,76	1,16
	4800	12,88	2,28		122400	11,73	1,13
	5400	12,82	2,22	05/11/2001	129600	11,69	1,09
	6000	12,81	2,21		136800	11,65	1,05
	6600	12,81	2,21		144000	11,62	1,02
	7200	12,79	2,19		158400	11,61	1,01
	8100	12,76	2,16		172800	11,6	1
	9000	12,73	2,13		194400	11,58	0,98
	9900	12,71	2,11	06/11/2001	205200	11,56	0,96
	10800	12,69	2,09		223200	11,55	0,95
	12000	12,64	2,04		244800	11,49	0,93
	/	/	/		306720	11,44	0,84

Annexe 15 : Remontée (Forage F2).

DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)	DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)
03/11/2001	0	34,82	11,26		9000	25,48	1,88
	30	33,82	10,22		11000	25,45	1,85
	60	30,49	6,89		10800	25,41	1,81
	120	27,81	4,21		12000	25,38	1,78
	180	27,45	3,85		13200	25,35	1,75
	220	27,39	3,79		14400	25,32	1,72
	240	27,2	3,6		16200	25,29	1,69
	300	27,14	3,54		18000	25,25	1,65
	360	27,08	3,48		19800	25,22	1,62
	420	27	3,4		21600	25,19	1,59
	480	26,96	3,36		23400	25,17	1,57
	540	26,9	3,3		25200	25,15	1,55
	600	26,83	3,23		27000	25,13	1,53
	720	26,74	3,14		28800	25,11	1,51
	900	26,59	2,99		32400	25	1,4
	1050	26,5	2,9		36000	24,97	1,37
	1200	26,35	2,73	04/11/2001	43200	24,94	1,34
	1500	26,16	2,56		50400	24,9	1,3
	1800	26	2,4		57600	24,8	1,2
	2100	25,95	2,35		64800	24,75	1,05
	2400	25,9	2,3		86400	24,69	1,09
	2700	25,85	2,25		93600	24,63	1,03
	3000	25,82	2,22		100800	24,59	0,99
	3300	25,8	2,2	05/11/2001	108000	24,45	0,94
	3600	27,77	2,17		115200	24,5	0,9
	4200	25,72	2,12		122400	24,45	0,85
	4800	25,68	2,08		129600	24,42	0,82
	5400	25,64	2,04		151200	24,38	0,78
	6000	25,61	2,01		172800	24,36	0,76
	6600	25,58	1,98		194400	24,34	0,74
	7200	25,55	1,95	06/11/2001	216000	24,32	0,72
	8100	25,52	1,92		237600	24,3	0,7

Annexe 16 : Remontée (Forage F3).

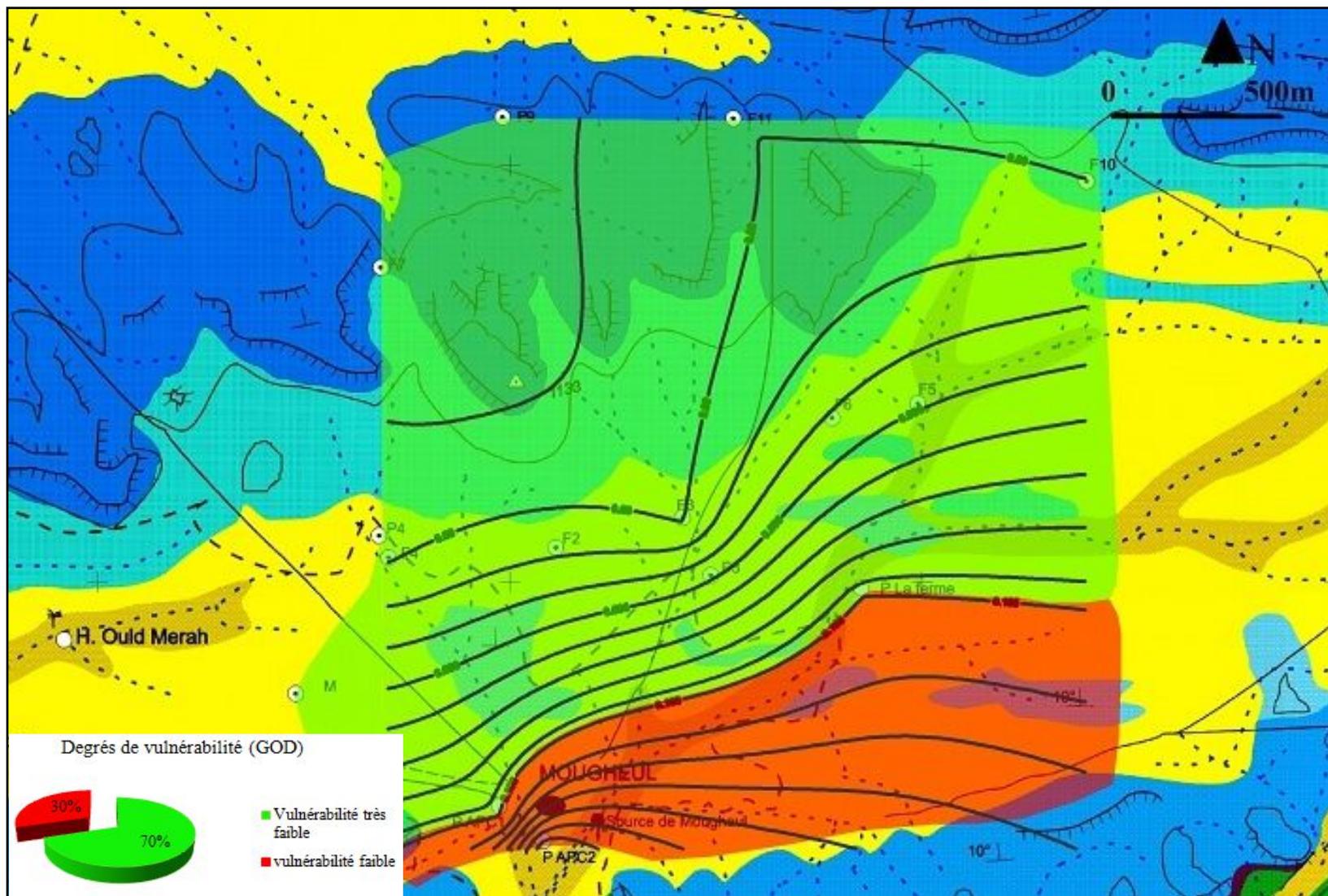
DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)	DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)
03/11/2001	0	35,88			8100	25,02	1,62
	30	27,2	3,8		9000	25,01	1,61
	60	25,51	2,11		9900	24,98	1,58
	120	25,4	2,1		10800	24,94	1,54
	180	25,38	1,98		12000	24,94	1,53
	240	25,35	1,95		13200	24,93	1,53
	300	25,34	1,94		14400	24,92	1,52
	360	25,33	1,93		16200	24,9	1,5
	420	25,33	1,93		18000	24,88	1,48
	480	25,32	1,92		19800	24,87	1,47
	540	25,31	1,91		21600	24,85	1,45
	600	25,3	1,9		23400	24,84	1,44
	900	25,27	1,87		25200	24,83	1,43
	1200	25,24	1,84		27000	24,81	1,41
	1500	25,24	1,84		28800	24,8	1,4
	1800	25,23	1,83		36000	24,77	1,37
	2100	5,21	1,81	04/11/2001	43200	24,73	1,33
	2400	25,2	1,8		57600	24,66	1,26
	2700	25,18	1,78		72000	24,61	1,21
	3000	25,16	1,76		86400	24,57	1,17
	3300	25,15	1,75		100800	24,53	1,13
	3600	25,14	1,74		115200	24,5	1,1
	4200	25,13	1,73	05/11/2001	129600	24,47	1,07
	4800	25,12	1,72		151200	24,42	1,02
	5400	25,09	1,69		172800	24,4	1
	6000	25,07	1,67		194400	24,36	0,96
	6600	25,05	1,65	06/11/2001	216000	24,31	0,91
	7200	25,04	1,64		237600	24,27	0,87

Annexe 17: Remontée (Forage F5).

DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)	DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)
03/11/2001	0	82,55	54,47		13200	29,25	1,17
	30	64,8	36,72		14400	29,24	1,16
	120	60,5	32,42		16200	29,21	1,13
	180	54,5	26,42		18000	29,2	1,12
	240	49,5	21,42		19800	29,19	1,11
	360	42,3	14,22		21600	29,18	1,1
	420	39,4	11,32		23400	29,17	1,09
	480	37,2	9,12		25200	29,16	1,08
	540	35,18	7,1		27000	29,15	1,07
	600	33,65	5,57		28800	24,14	1,06
	720	29,85	1,77		32400	29,13	1,05
	1200	29,5	1,42	04/11/2001	36000	29,12	1,04
	1500	29,47	1,39		43200	29,11	1,03
	1800	29,45	1,37		50400	29,1	1,02
	2100	29,44	1,36		57600	29,09	1,01
	2640	29,43	1,35		64800	29,07	1,99
	2700	29,41	1,33		72000	29,05	0,97
	3300	29,4	1,32		72200	29,04	0,96
	3600	29,39	1,31		86400	29,02	0,94
	4200	29,38	1,3		93600	29	0,92
	4800	29,35	1,27	05/11/2001	100800	28,98	0,9
	5400	29,35	1,27		108000	28,98	0,9
	6000	29,34	1,26		192600	28,97	0,89
	6600	29,33	1,25		144000	28,96	0,88
	7200	29,32	1,24		158400	28,94	0,86
	8100	29,3	1,22		172800	28,93	0,85
	9000	29,29	1,21		194400	28,9	0,82
	9900	29,28	1,2	06/11/2001	216000	28,88	0,8
	10800	29,27	1,19		244800	28,86	0,78
	12000	29,26	1,18		/	/	/

Annexe 18 : Remontée (Forage F4).

DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)	DATE	TEMPS(s)	ND (m)	Rabattement(m)
03/11/2001	0				12000	20,15	2,05
	30	77,36	59,26		13200	20,11	2,01
	60	77,35	59,25		14400	20,05	1,95
	180	77,35	59,25		16200	20,04	1,94
	240	73,68	55,58		18000	20,03	1,93
	300	68,94	50,84		19800	19,98	1,88
	360	63,57	45,47		21600	19,97	1,87
	420	59,13	41,03		23400	19,96	1,86
	480	54,29	36,19		25200	19,92	1,82
	540	50,4	32,3		27000	19,9	1,8
	600	46,54	28,44		28800	19,87	1,77
	720	39,79	21,69		32400	19,83	1,73
	900	31,3	13,2		36000	19,79	1,69
	1020	27,94	9,66		43200	19,71	1,63
	1200	24,07	5,97		50400	19,66	1,56
	1500	21,5	3,5		57600	19,59	1,49
	1800	21,01	3	04/11/2001	64800	19,53	1,43
	2100	20,88	2,78		72000	19,49	1,39
	2400	20,81	2,71		86400	19,44	1,34
	2700	20,74	2,64		93600	19,39	1,29
	3000	20,67	2,57		100800	19,33	1,23
	3300	20,65	2,55		108000	19,32	1,22
	3600	20,63	2,53	05/11/2001	115200	19,29	1,19
	4200	20,53	2,43		122400	19,26	1,16
	4800	20,5	2,4		129600	19,23	1,13
	5400	20,43	2,33		136800	19,2	1,1
	6000	20,39	2,29	06/11/2001	144000	19,17	1,07
	6600	20,35	2,25		158400	19,14	1,04
	7200	20,35	2,25		172800	19,12	1,02
	8100	20,3	2,2		194400	19,1	1,01
	9000	20,22	2,12		216000	19,05	0,95



Annexe 19 : Carte de vulnérabilité « GOD » de la nappe jurassique inférieure de Mougheul.