

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE HADJ LAKHDAR – BATNA –



FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister en Géologie

Option : GEOLOGIE DE GENIE CIVIL ET DES MILIEUX AQUIFERES

Etude des écoulements souterrains dans les gneiss schisteux fissurés du Précambrien de la région de Tamanrasset

Présenté par :

BOULAHBAL SOUAD

Devant le jury :

Yahiaoui Abdlouahab	Maître de conférence à l'Université de Batna	Président
Menani Mohamed Redha	Professeur à l'Université de Batna	Rapporteur
Chabour Nabil	Maître de conférence à l'Université de Constantine	examineur
Fourar Ali	Professeur à l'Université de Batna	examineur

Année Universitaire : 2011-2012.

Résumé:

La région de Tamanrasset tire la totalité de ces besoins en eau des eaux souterraines, qui sont liés à la formation des alluvions quaternaires et à la formation de socle précambrien constituées de gneiss.

L'extension importante des affleurements de roches métamorphiques, Conjointe avec le climat aride ne permet pas de mettre ces aquifère en saturation. Il semble donc nécessaire d'identifier l'aquifère de gneiss' et déterminer son mode de fonctionnement hydrogéologique et son mode de recharge.

A cette fin la présente étude est basée sur une approche géologique, Hydroclimatologique, hydrogéologique et hydrochimique pour caractériser l'écoulement souterrain dans les gneiss.

L'étude géologique montre que la région d'étude est couverte dans sa majeure partie par des formations gneissiques paleoproterozoïques, recoupées par du granite et d'épanchements basaltiques.

Ces formations ont subi plusieurs phases tectoniques qui mettent en évidence des accidents subméridiens de plusieurs kilomètres de long. Les différentes méthodes de prospection permettent de déterminer que l'aquifère des gneiss est lié à la zone altérée et fissurée.

L'étude hydroclimatique montre que les inondations de l'oued présentent le seul apport qui permet de recharger ces aquifères.

Les caractéristiques hydrogéologiques, hydrochimiques et isotopiques mettent en évidence la superposition horizontale des trois aquifères qui sont l'aquifère des alluvions et l'aquifère de la zone altérée et l'aquifère de socle.

Abstract:

The Tamanrasset region derives all of its water needs of groundwater, which binds to the formation of quaternary alluvium and the formation of Precambrian basement. The major expansion of metamorphic rock outcrops, Joint with the arid climate does not put this aquifer saturation. It therefore seems necessary to identify the aquifer gneiss' and determine its mode of operation and their hydrogeological charging mode. To this end this study proceeds different geological approach, hydroclimatologic hydrogeological hydro chemical characterized groundwater flow in the gneisses.

The geological study shows the study area is covered for the most part by Paleoproterozoic gneissic formations, intruded by granite basaltic these formations have undergone several tectonic phases that highlight submeridian accident several kilometers long. The different survey methods used to determine the aquifer gneisses binds to and alters cracked area. The study shows that hydroclimatologic flooding of the river now the only supply that recharges the aquifer. The hydrogeological and hydrochemical and isotopic point to the superposition of three horizontal aquifer that its alluvial aquifer and the aquifer area and altered the aquifer base.

ملخص :

تستمد منطقة تمنراست كل احتياجاتها من الماء من المياه الجوفية التي تتواجد في تشكيلة الرواسب النهرية للعصر الرباعي والتشكيلة الصخرية لعصر ما قبل الكامبري التي تتألف من الغنيس.

الانتشار الواسع للصخور المتحولة و المناخ الجاف لا يسمحان لطبقات المياه الجوفية بالتنبع. ولذلك دراسة طبقة المياه الجوفية المتواجدة في صخر الغنيس ضرورية لتحديد طريقة جريانها و كيفية اعادة شحنها.

الغاية من هذه الدراسة هو معرفة مميزات جريان المياه الجوفية في صخر الغنيس وتحقيقا لهذه الغاية تستند هذه الدراسة إلى الطرق التالية الجيولوجية, الهيدرو مناخية, الهيدروجيولوجية و الهيدرو كيميائية.

أثبتت الدراسة الجيولوجية ان التشكيلة الأساسية في منطقة تمنراست هي الغنيس paléoprotérozoïques التي تخترقها الغرانيت و التدفقات البازلتية.

خضعت هذه التشكيلات الصخرية لعدة مراحل تكتونية التي ساهمت في خلق فوالق Subméridiens. . مختلف أساليب الاستقصاء المستخدمة أثبتت أن المياه الجوفية في صخر الغنيس تتواجد في المنطقة التي تعرضت للتعرية و التصدع.

الدراسة الهيدرو مناخية اثبتت أن فيضانات الوادي هي المصدر الوحيد الذي يعيد شحن طبقات المياه الجوفية.

الخصائص الهيدروجيولوجية و الهيدروكيميائية والنظائر تثبت وجود ثلاث طبقات افقية للمياه الجوفية هي طبقة المياه الجوفية في الرواسب النهرية و المياه الجوفية المتواجدة في الغنيس الذي تعرض للتعرية طبقة المياه الجوفية في الغنيس المتصدع.

Sommaires :

AVANT PROPOS	I
LISTE DES FIGURES.....	II
LISTE DES TABLEAUX :.....	VI
<i>Introduction</i>	2
<i>Chapitre I : Cadre géographique et géologique de la région de Tamanrasset</i>	3
I / Cadre géographique	4
1/ Situation géographique du Tamanrasset.....	4
2 / Relief.....	4
3/ Végétation.....	5
4/ Réseau hydrographie.....	5
5/ Délimitation de la zone d'étude.....	5
II / Contexte géologique du Hoggar.....	8
1/ Présentation du Hoggar	8
2/ Structure et géologie du Hoggar	8
2.1/ Domaine du Hoggar occidental.....	11
2.2/ Domaine du Hoggar central polycyclique.....	12
2.3/ Domaine du Hoggar oriental	12
3/ Formations de couverture phanérozoïques du Hoggar.....	13
4/ Evénements tectono-métamorphiques du bouclier touareg.....	15
4.1/ Un événement très ancien.....	15
4.2/ L'événement éburnéen.....	15
4.3/ L'événement kibarien.....	15
4.4/ L'événement panafrica.....	15
5/ Géologie de la région d'étude.....	16
5.1/ Les formations paléo à mesoprotérozoïque	16
5.1.1/ Série inférieure	16
5.1.2/ Série supérieure	17

5.2/ Formations néoprotérozoïque.....	17
5.2.1/ Formations détritiques de Tazat	17
5.2.2/ Formations volcano-sédimentaires	17
5.3/ Les formations magmatiques du Hoggar central	18
5.4/ Les épanchements volcaniques du Hoggar central	18
6/ Tectonique et métamorphisme régional.....	19
6.1/ L'événement Eburnéen	19
6.2/ L'événement Panafricain	20
7/ Géologie du site	22
7. 1/ Les formations paléoprotérozoïques	22
7.2/ Les roches intrusives d'âge panafricain.....	23
7.3/ Les formations volcaniques	23
7.4/ Les dépôts quaternaires	23
8/ Tectonique de site	23
9/ Conclusion.....	25
10/ Hydrogéologie du massif cristallin du Hoggar.....	25
11/ Conséquence hydrogéologique	27
III/ Géométrie de l'aquifère	27
1/ Les données de forages.....	28
2 / Fracturation	30
2.1/ Etude de la fracturation.....	30
2.2/ Interprétation des données de fracturation de la région d'étude.....	31
3/ Prospection géophysique.....	35
3.1/ Sismiques réfractions.....	35
3.2/ Prospection électrique	38
4/ Interprétation des données	38
4.1/ Interprétation des données de la sismique réfraction	38
4.2/ Interprétation des données des sondages électriques.....	38
5/ Les coupes géoélectriques.....	39

6 / Cartes du toit de substratum.....	45
7/ Carte de l'épaisseur de la zone altérée et fissuré.....	45
8/ Conclusion	47
Chapitre II : Etude hydroclimatologique.....	48
I/ Introduction.....	49
II/ Etude morpho métrique du bassin versant d'oued Tamanrasset	49
1/description du bassin versant de l'oued Tamanrasset	49
2/ Les caractéristiques morphométriques.....	51
2.1/Surface	51
2.2/Périmètre.....	51
2.3/ Indice de compacité de Gravelius.....	51
2.4/ Rectangle équivalent.....	53
2.5/Le relief	54
3/ Caractéristiques hydrographiques	57
2.6/ Indice de pente globale.....	57
3.1/ Longueur du cours d'eau principal.....	57
3.2/Temps de concentration.....	57
II/ Climatologie du domaine d'étude.....	58
1/Température.....	60
2/ Ensoleillement.....	60
3/ Humidité relative.....	61
4/ Pluviométrie	61
4.1/ Pluie moyenne annuelle	61
4.2/ Pluies mensuelles.....	62
4.3/ Les pluies journalières.....	63
5/ Répartition statistique des pluies journalières maximal.....	65
6/L évaporation et Evapotranspirat.....	68
6.1/ Evapotranspiration potentielle.....	68
7/ Evaporation	69
8/ Bilan hydrologique.....	70

8.1/ Estimation du ruissèlement.....	70
9/Crués.....	71
10/ Infiltration (recharge)	74
11/ Conclusion.....	76

CHAPITRE III : Caractérisation hydrogéologique des aquifères du bassin versant d’oued Tamanrasset.....77

I/ Introduction.....	78
1/ Les aquifères de socles.....	78
2/Model conceptuel du profil d’altération type d’aquifères de socle	79
II/ Identification des aquifères capté dans la région de Tamanrasset.....	82
1/ L’aquifère des alluvions des quaternaire (les nappe d’inféro-flux)	82
2/ L’aquifère des socles altéré et fissure.....	82
III – Piézométrie.....	83
1/ Les cartes piézométriques	85
2/Interprétation des cartes piézométriques	85
2.1/La carte piézométrique de la campagne 08-08-2007	85
2.2/ Campagne 26-08-2007	85
2.3/Campagne du 16-03-2008	88
2.4/La carte piézométrique de la campagne du 26-03-2008.....	89
2.5/La campagne piézométrique de 01-04-2008.....	90
2.6/Carte piézométriques du puits Izerzi.....	90
2.7/Carte piézométrique du puits Amsel	91
2.8/ Carte piézométrique puits Ablessa	93
3/ Fluctuation piézométrique.....	93
4/Conclusion	94
IV Caractérisations hydrodynamiques des aquifères du bassin versant oued Tamanrasset.....	95
1/ Pompage d’essai	95
2/ Présentation des données de pompage d’essai	95
3/ Interprétation des essais de pompages.....	95

3.1/ Méthode de Jacob (l'approximation de Cooper-Jacob).....	96
3.2/ Méthode de rabattement résiduel (courbe de la remontée).....	98
3.3/ Pompage par palier de débits enchainés.....	101
4/Interprétation de pompage d'essai en milieu fissuré.....	103
4. 1/ Le milieu fissuré est considéré comme un système à double porosité	103
4.1.1/La solution de Moench (1984).....	104
4.2 /Le milieu fissuré est considéré comme un milieu isotrope affecté d'une fissure unique.....	105
4.2.1/L'interprétation au puits de pompage (Thiery - Vandenbeusch – Vaubourg, 1983).....	106
V /Essai hydraulique.....	109
1/ Essai LEFRANC.....	109
2/ Essai d'absorption	112
3/ Présentation des données de l'essai Lefranc de l'oued Izerzi	112
4/ Essai Lugeon	112
4.1/ Interprétation de l'essai Lugeon	113
4.2/Présentation des données de l'essai Lugeon de l'oued Izerzi.....	113
5/ Discussions des résultats de paramètres hydrodynamiques	114
VI/ Conclusion	116

Chapitre IV : *Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de Tamanrasset*117

I/Introduction	118
1/Etude Hydrochimique sur les eaux du Hoggar.....	118
2/ Diagramme de Piper des eaux souterraines du Hoggar	119
II/ Etude Hydrochimique des eaux de la région de Tamanrasset.....	120
1.1/Paramètres physico-chimiques.....	121
1.1/La température	121
1.2/Conductivité électrique.....	121
1.3/Le PH	122
2/Facies chimiques des eaux.....	122
2.1/Diagramme de Piper des eaux du Tamanrasset.....	122

2.2/ Représentation graphiques des eaux souterraines de Tamanrasset selon Shoeller-Berkalof.....	124
3/ Qualité chimique des eaux de Tamanrasset (potabilité)	125
3.1/Potabilité de l'eau selon l'OMS.....	126
3.2/La dureté ou le degré hydrométrique (d°h)	126
III/ Etude isotopique des eaux du Hoggar	127
1/Isotope stable de l'eau.....	127
2/Teneurs isotopiques des eaux souterraines du Hoggar.....	128
IV/Conclusion	130
<i>Conclusion générale</i>	132
Référence bibliographique	135
ANNEXE.....	141
ANNEXE I.....	142
ANNEXEII.....	159
ANNEXE III.....	193

AVANT PROPOS

Au terme de ce travail je tiens à remercier en premier lieu le Professeur Menani Mohamed Redha mon Directeur de thèse. Pour son enseignement, ses conseils et son encouragement.

Je remercie, Mr Yahiaoui Abdlouahab Maître de conférence à l'Université de Batna d'avoir accepté de présider le Jury

J'adresse mes remerciements à Monsieur Chabour Nabil, Maître de conférence à l'Université de Constantine et Monsieur Fourar Ali Professeur à l'Université de Batna d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Mes vives gratitudee au Mme Amrous karima ingénieur en DHW de Tamanrasset, pour l'aide qu'il m'a apporté au cours des campagnes de terrains.

Je remercie Monsieur le directeur de la DHW de Tamanrasset, Monsieur le directeur de l'O.N.M de Tamanrasset et le chef de service de département d'étude du patrimoine naturel d'OPNA. Qui ont mis à ma disposition les données de la région d'étude.

Je tiens à remercier mes parents et toute ma famille pour leur soutien.

LISTE DES FIGURES :

Figure I.1 : situation géographique de Tamanrasset.....	4
Figure I.2 : Réseau hydrographique du Hoggar.....	5
Figure I.3 : limite de la zone d'étude.....	7
Figure I.4 : domaines structuraux du Bouclier Touareg (d'après Caby et al 1981 modifier par Boullier 1991)	9
Figure I.5 : les différents terranes du Hoggar (Black et al 1994).....	10
Figure I.6 : les formations phanérozoïques du Hoggar Meriem. D.E, Boufassa A. : le Hoggar office national de la recherche géologique et minière (O.R.G.M).....	14
Figure I.7 : le Hoggar central (Léigeois et al, 2003).....	16
Figure I.8 : carte de distribution du volcanisme (mésozoïque à actuel) dans le Hoggar (Dauturia et Girod, 1991 modifiée).....	19
Figure I.9 : schéma structural du Hoggar central et oriental (Bertrand.JM ,1974).....	21
Figure. I.10 : schéma géologique de la région de Tamanrasset (A.SCHEILLETZ et al, 1992).....	22
Figure I.11 : schéma structural 1/000.000de la région Tamanrasset Rapport (ENHYD), Juillet 2004.....	24
Figure I.12 : les différentes formations aquifères de Hoggar (d'après le rapport ORGM n° 620).....	26
Figure I.13 : localisation des forages et des sondages mécaniques dans le bassin de Tamanrasset.....	29
Figure I.14 : carte de fracturation de la zone de Tamanrasset (Groupe mixte SONARAM – IDROTECNECO 1975).....	32
Figure I.15 : rosace directionnelle de la fracturation de socle de la zone d'étude Fréquence en nombre (N= 663).....	33
Figure I.16 : carte de fracturation et point d'eaux de la zone d'étude.....	34
Figure I.17 : situation des sondages électriques dans l'oued Tamanrasset.....	36
Figure I.18 : localisation des différents sondages géophysiques d'oued Izerzi.....	37
Figure I.19 : carte de situation des coupes géoélectriques.....	40
Figure I.20 : coupe géoélectrique site (1 -2).....	41
Figure I.21 : coupe géoélectrique site 3 et site 4.....	42

Figure I.22 : les coupes géoélectriques A, B, C, D, L, Q.....	43
Figure I.23 : Carte du toit du substratum.....	46
Figure II.1 : Le bassin versant de l'oued Tamanrasset.....	50
Figure II.2 : Bassin versant zone d'étude.....	52
Figure II.3 : carte hypsométrique du bassin versant d'oued Tamanrasset.....	55
Figure II.4 : courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Tamanrasset (zone d'étude).....	56
Figure II.5 : localisation des stations pluviométriques.....	59
Figure II.6: Températures moyennes mensuelles.....	60
Figure II.7 : variation des pluies annuelles dans les trois stations.....	62
Figure II.8 : variations moyennes mensuelles des précipitations aux trois stations.....	63
Figure II.9 : indice d'aridité des stations.....	65
Figure II.10 : Ajustement de la loi de Gumbel (l'échantillon de P_J observés à Tamanrasset...)	67
Figure II.11 : situation des points des crues.....	71
Figure II.12 : crue au niveau d'oued Tamanrasset et ses affluents.....	73
Figure II.13 : valeur de recharge calculée sur une grille à mailles de 0.5° (P. Doll ; M.Florke. M 2005).....	75
Figure III.1 : Schéma conceptuel de formation d'altération de roche de socle (Wyns1999).....	81
Figure III.2. (a) Profil d'altération monophasée sur granite (Wyns et al. 1999) et(b) profil d'altération polyphasée sur granite (Dewandel et al. 2006).....	81
Figure III.3 : coupe hydrogéologique.....	82
Figure III.4 : localisation des points d'eau dans le bassin versant d'oued Tamanrasset (zone d'étude (2008)).....	84
Figure III.5: carte piézométrique (campagne piézométrique 08-08-2007).....	86
Figure III.6 : Carte piézométrique (campagne 26-08-2007).....	87
Figure III.7 : Carte piézométrique (campagne 16-03-2008).....	88
Figure III.8: carte piézométrique (campagne piézométrique 26-03-2008).....	89
Figure III.9 : Carte piézométrique 01-04-2008 (Izerzi).....	90
Figure III.10 : Carte piézométrique 01-04-2008 (Amsel).....	91

Figure III.11 : Carte piézométrique 01-04- 2008.....	92
Figure III.12 : Carte piézométrique puits Ablessa 04-04- 2007.....	93
Figure III.13. : Courbe de descente –forage F2.....	100
Figure III.14 : Courbe de remontée forage F2.....	100
Figure III.15: courbe rabattement spécifique du forage F05 en fonction de temps (Pompage par palier de débits enchainés).....	101
Figure III.16: Modèle à double porosité.....	103
Figure III.17: modèle de fracture verticale.....	106
Figure III.18: Courbe type fracture verticale – pompage au centre de la fracture verticale.....	107
Figure III.19 : courbe de descente du forage Machouen.....	108
Figure III.20: courbe de descente du forage Matnatallet.....	108
Figure III.21 : localisation des sondages mécaniques d’oued IZERZI.....	110
Figure IV .1 : diagramme de Piper de compositions chimique moyenne des eaux souterraines du Hoggar (O. SAIGHI J.L. MICHELOT, A. FILLY 2001).....	120
Figure IV.2: situation des forages des analyses des échantillons des eaux souterraines prélevés.....	123
Figure IV.3 : diagramme de Piper des eaux du Tamanrasset.....	124
Figure IV.4 : diagramme Shoeller-Berkalof des eaux.....	125
Figure IV.5 : profile chimique et isotopique des aquifères du Hoggar (O. SAIGHI J.L. MICHELOT, A. FILLY 2001).....	129
Figure IV.6 : relation ente deutérium et oxygène 18($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) de l’eau souterraines du Hoggar (O. SAIGHI J.L. MICHELOT, A. FILLY 2001).....	130

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau II. 1: Répartition de la surface totale en fonction de tranches d'altitudes...54	Tableau II.2 : Superficies cumulées supérieures à une altitude donnée.....56
Tableau II.3 : caractéristiques morphométriques du bassin versant oued Tamanrasset.....58	
Tableau II.4 : coordonnées des stations pluviométriques.....59	
Tableau II.5: Températures moyennes mensuelles60	
Tableau II.6 : ensoleillement mensuel moyen (heures) de station Tamanrasset.....61	
Tableau II.7 : humidité mensuelle moyenne (%) (1975-2002) (station de Tamanrasset).....61	
Tableau II.8 : variations moyennes mensuelles des précipitations aux trois stations.....62	
Tableau II.9 : fréquence des mois des pluies 1960-2002 de la station Tamanrasset.....63	
Tableau II.10 : pluies journalières maximales observées à la station de Tamanrasset (1960-2002).....64	
Tableau II.11 : Répartition statistique des pluies journalières maximales.....65	
Tableau II.12: pluies journalières maximales, pluies fréquentielles de temps égale au temps de concentration et les intensités correspondantes aux différentes périodes de retour.....68	
Tableau II.13 : évaporation moyenne mensuelle calculée par la méthode de Turc.....69	
Tableau II.14 : évaporation moyenne mensuelle (sous abri) station Tamanrasset.....69	
Tableau II.15 : la lame d'eau ruisselée pour différentes périodes de retour du bassin versant d'oued Tamanrasset.....71	
Tableau II.16 : débit de crue de l'oued Tamanrasset.....74	

Tableau III.1 : les valeurs de transmissivité m^2/s calculées par la méthode d'approximation logarithmique de Jacob.....	102
Tableau III .2 : les caractéristiques hydrodynamiques des nappes inféro-flux du bassin versant d'oued Tamanrasset (Gribi.A, Sai.N, Younsi .N : notice explicative de la carte hydrogéologique du Hoggar et des Tassilis).....	102
Tableau III.3 : valeurs de la perméabilité des essais Lefranc.....	112
Tableau III. 4 : Les valeurs des unités Lugeon et les perméabilités correspondantes.....	114
Tableau III.5 : les valeurs des T (m^2/s) et k m/s des différentes essais utilisés pour la caractérisation hydrodynamique de l'aquifère des alluvions et l'aquifère du gneiss de Tamanrasset.....	115
Tableau IV.1 : concentration chimique moyenne en mg/l de l'eau souterraine des Hoggar (O. SAIGHI J.L. MICHELOT, A. FILLY 2001).....	119
Tableau IV.2 : les analyses physico-chimiques des quelques forages et puits de Tamanrasset.....	121
Tableau IV .3 : potabilité de l'eau selon L'OMS	126
Tableau IV .4 : potabilité de l'eau en fonction de la dureté.....	126
Tableau IV .5: la teneur moyenne d'Oxygene18, ^{13}C , ^{14}C , 3H des eaux souterraines du Hoggar.....	128

Introduction

Introduction :

La région de Tamanrasset est située au sud de l'Algérie. La rareté des ressources en eau dans cette région amène les utilisateurs à optimiser l'exploitation de cette ressource en recherchant les formations susceptibles de fournir les moindres débits à même de satisfaire un tant soit peu les différents besoins de la population.

Les formations géologiques en présence sont caractérisées par de larges affleurements de roches métamorphiques, qui en mode de gisements normal non tectonisé, sont réputées imperméables. C'est à la faveur de la fissuration qu'elles permettent des écoulements souterrains d'autant plus prolifiques que la densité de fissuration est importante.

Pour mieux caractériser cet écoulement des gneiss schisteux fissuré. Ce mémoire a été divisé en quatre chapitres.

- le premier, sera consacré à une étude du contexte géographique et géologique de Tamanrasset. Afin de bien déterminer la géométrie du réservoir des aquifères de socle gneissique. nous avons combiné plusieurs méthodes : étude lithologique des aquifères à partir des coupes de forage, prospection géophysique et étude de la fracturation.
- Le deuxième chapitre examinera les variations des différents paramètres qui agissent sur l'écoulement de surface, tel que les caractéristiques du bassin versant et les paramètres climatiques.
- Le troisième chapitre portera sur l'étude des caractéristiques hydrogéologiques des aquifères du bassin versant de Tamanrasset à travers une étude piézométrique basée sur les données provenant de la direction de l'hydraulique de la Wilaya de Tamanrasset et les campagnes piézométriques que j'ai effectuées durant l'année 2007-2008.

La détermination des paramètres hydrodynamiques par le biais des essais de pompage antérieurs et les essais que j'ai suivis et les essais hydrauliques.

- Le dernier chapitre porte sur l'étude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de Tamanrasset pour déterminer la qualité chimique des eaux souterraines et les aquifères qui sont en lien.

Chapitre I :
Cadre géographique et
géologique de la région de
Tamanrasset

I / Cadre géographique :

1/ Situation géographique de Tamanrasset :

Tamanrasset ville du sud de l'Algérie est située dans la région appelée massif cristallin du Hoggar qui affleure sur plus de 500 000 km² à environ 2000 km au sud de la capitale Alger (Fig. I.1)

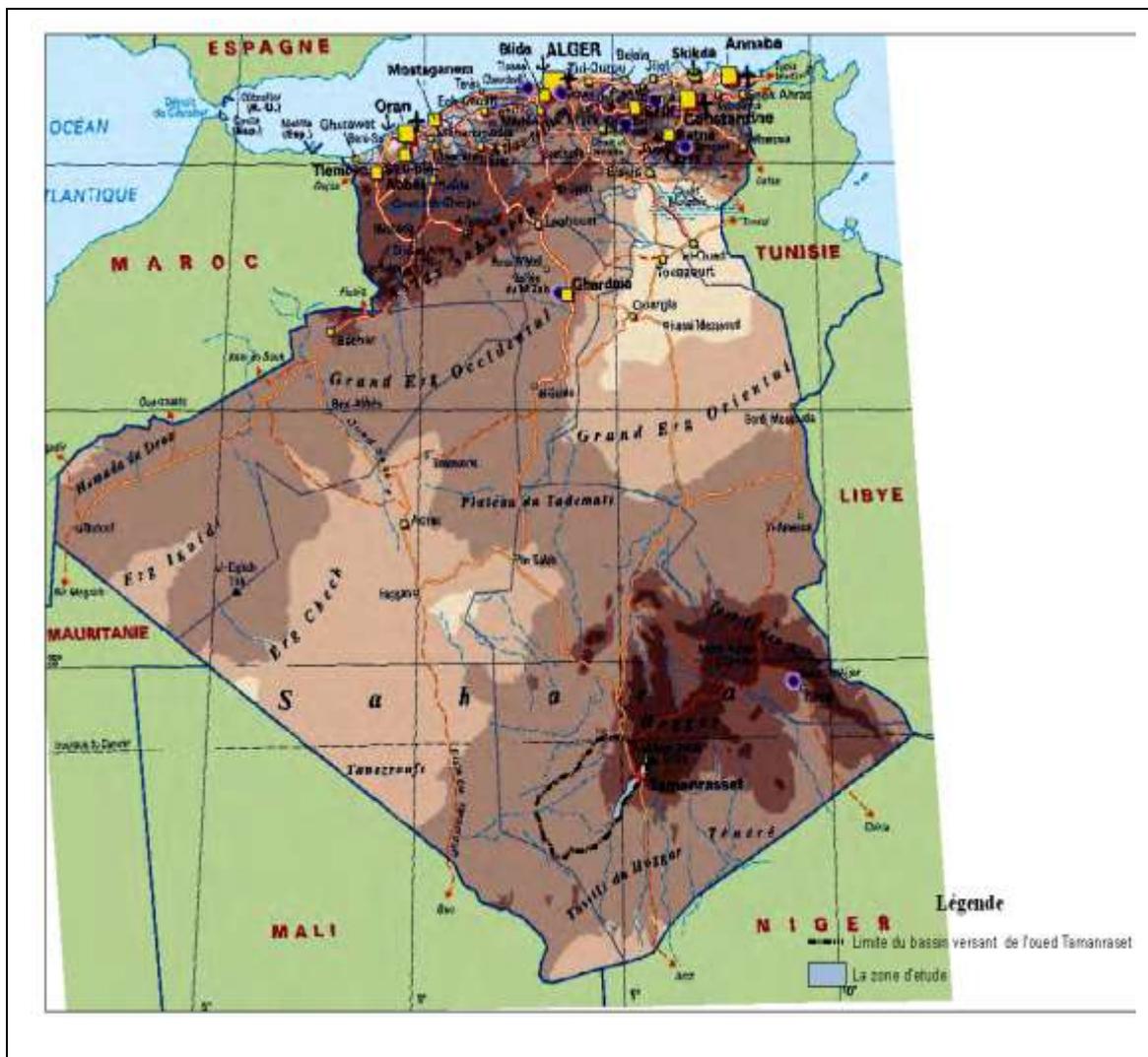


Figure I.1 : situation géographique de Tamanrasset

I.2 / Relief :

Le relief est important au centre du massif cristallin du Hoggar où culminent les hauts sommets tel que Tahat 2908 m, Ilamane 2789 met Asskrem 2778 m. Ailleurs la topographie varie entre 500 m et 1800m au dessus du niveau de la mer. La ville de Tamanrasset se situe à environ de 1400 m d'altitude.

I.3/ Végétation :

La végétation, pratiquement absente, se concentre dans et à proximité des grands oueds, elle est essentiellement composée d'arbustes, de plantes herbacées d'acacias, de coloquintes du désert et parfois de tamaris.

4/ Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique de Tamanrasset est d'une densité exceptionnelle, il est pratiquement impossible de dénombrer tous les oueds avec leurs affluents primaires ou secondaires. La plupart des ces oueds prennent naissance dans les parties les plus élevées de l'Atakor et divergent dans toutes les directions. Leur tracé débute dans les régions montagneuses, par un lit bien marqué et une pente forte, et finissent souvent par traverser dans leur cour aval les surfaces aplanies des regs où il devient difficilement identifiable.

Ce réseau hydrographique draine quatre principaux bassins situés sur le territoire du Tamanrasset : bassin de L'Igharghar, bassin du Mekerghane, bassin du Tanezrouft et le bassin de l'Azaouak (Fig. I.2).

Le ruissellement dans ces oueds est occasionnel du fait du caractère rare et très irrégulier des précipitations. Les oueds présentent des débits importants quelques heures après la chute des pluies, ce qui se traduit par des crues importantes

5/ Délimitation de la zone d'étude :

La zone objet de la présente étude est la partie amont du premier tronçon de l'oued Tamanrasset qui s'étale sur un 2876 km^2 entre $21^{\circ}54'$ et $23^{\circ}16'$ de latitude nord et $4^{\circ}50'$ et $5^{\circ}43'$ de longitude est (Fig. I.3.).

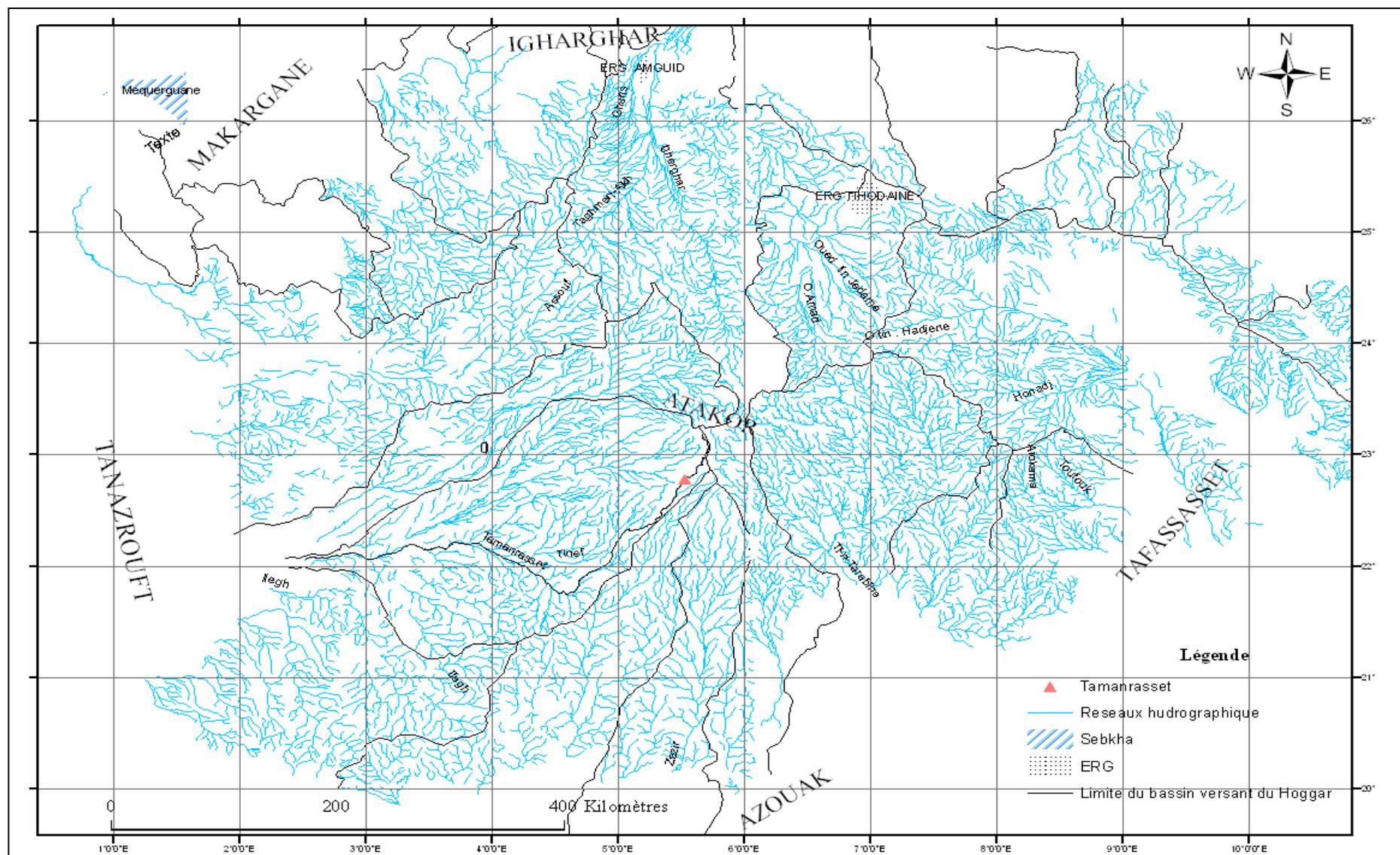


Figure I.2 : Réseau hydrographique du Hoggar

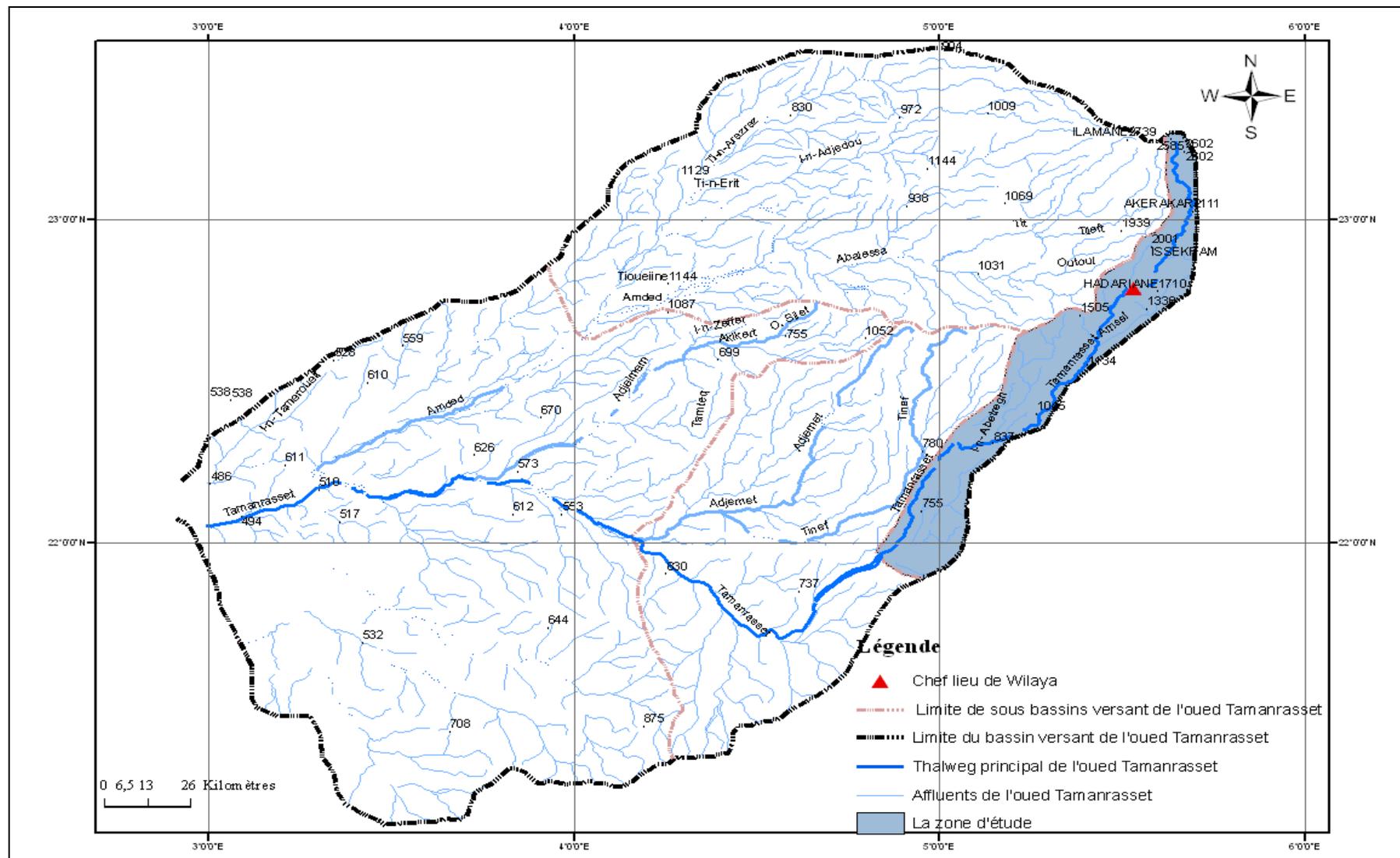


Figure I.3 : limite de la zone d'étude

II / Contexte géologique du Hoggar :

1/ Présentation du Hoggar :

Le massif cristallin du Hoggar se situe au sud de l'Algérie, avec ses 550 000 km² de superficie. Il s'étend sur 1000 km d'est en ouest et sur 700 km du nord au sud. Il est le plus important massif constituant le bouclier touareg qui comprend également l'Adrar des Iforas au Mali au (SW) et l'Air au Niger au (SE)

Il est défini comme une vaste boutonnière précambrienne stable depuis le cambrien qui appartient à la chaîne panafricaine. Son territoire est recouvert au nord, à l'est et en partie au sud par les formations sédimentaires Tassiliennes du Paléozoïque.

2/ Structure et géologie du Hoggar :

La subdivision structurale du Hoggar repose sur la présence de vastes compartiments allongés N-S, délimités par de grandes zones de cisaillements régionaux subméridiens. Les accidents 4°50 et 8°30 de direction N –S et à composantes décrochantes, les séparent en trois grands structuro-formationelles distincts de par leurs lithologies et leur évolution tectono-métamorphiques (Lelubre ; 1952). Ils sont d'ouest en est : le Hoggar occidental, le Hoggar central et le Hoggar oriental (Bertrand et Caby ; 1978) (fig. I.4).

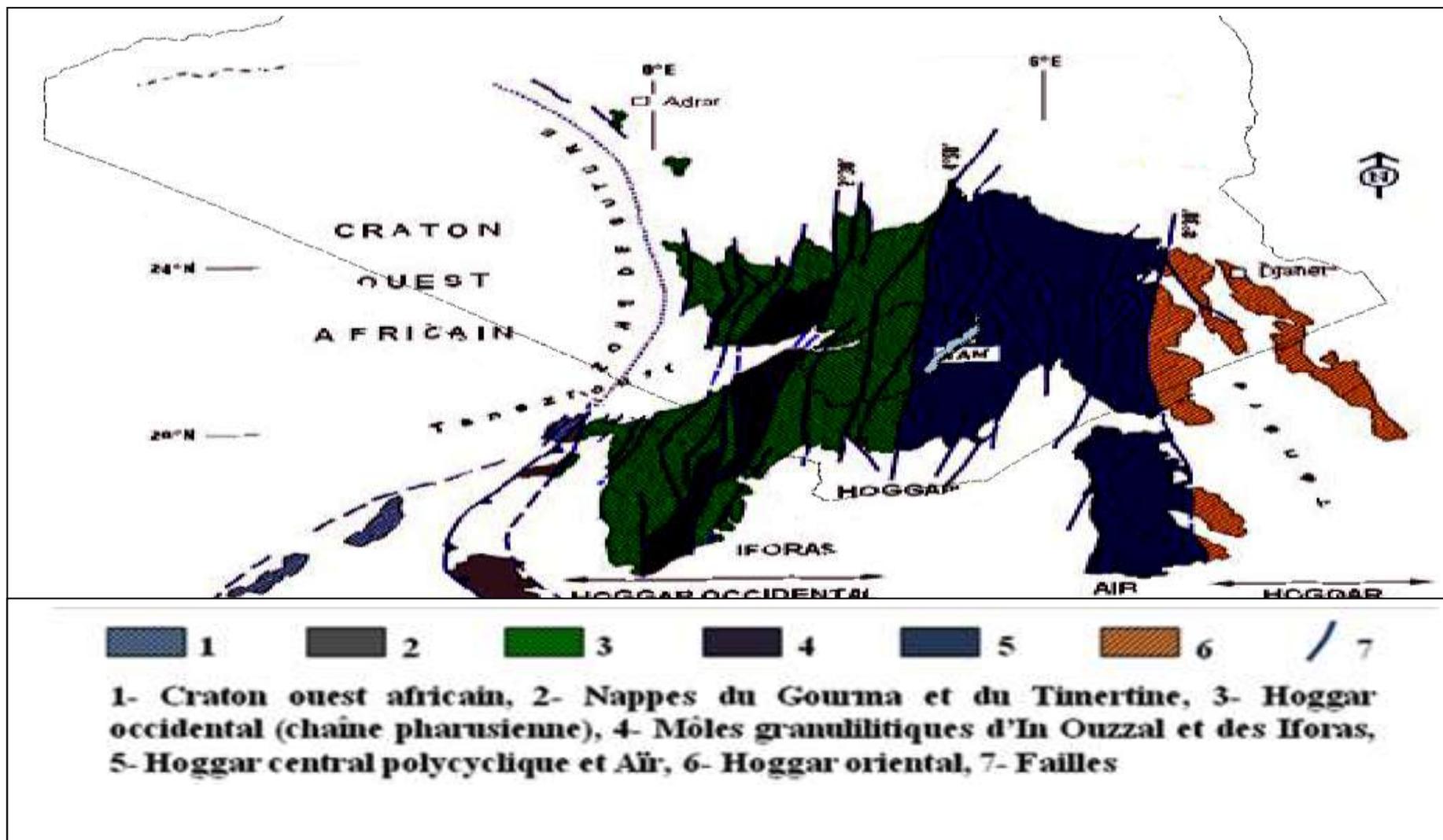


Figure I.4 : domaines structuraux du Bouclier Touareg (d'après Caby et al 1981 modifier par Boullier 1991)

Les récents travaux géologiques (Liegeois et al ; 1994, Black et al ; 1994) portant sur le concept de «collage de terranes» (les blocs déplacés latéralement) (P.J. Coney et al. 1980 ; D. Howell, 1986), ont montré que ces trois domaines sont constitués de plusieurs terranes accolés pendant l'orogénèse panafricaine (fig. I.5).

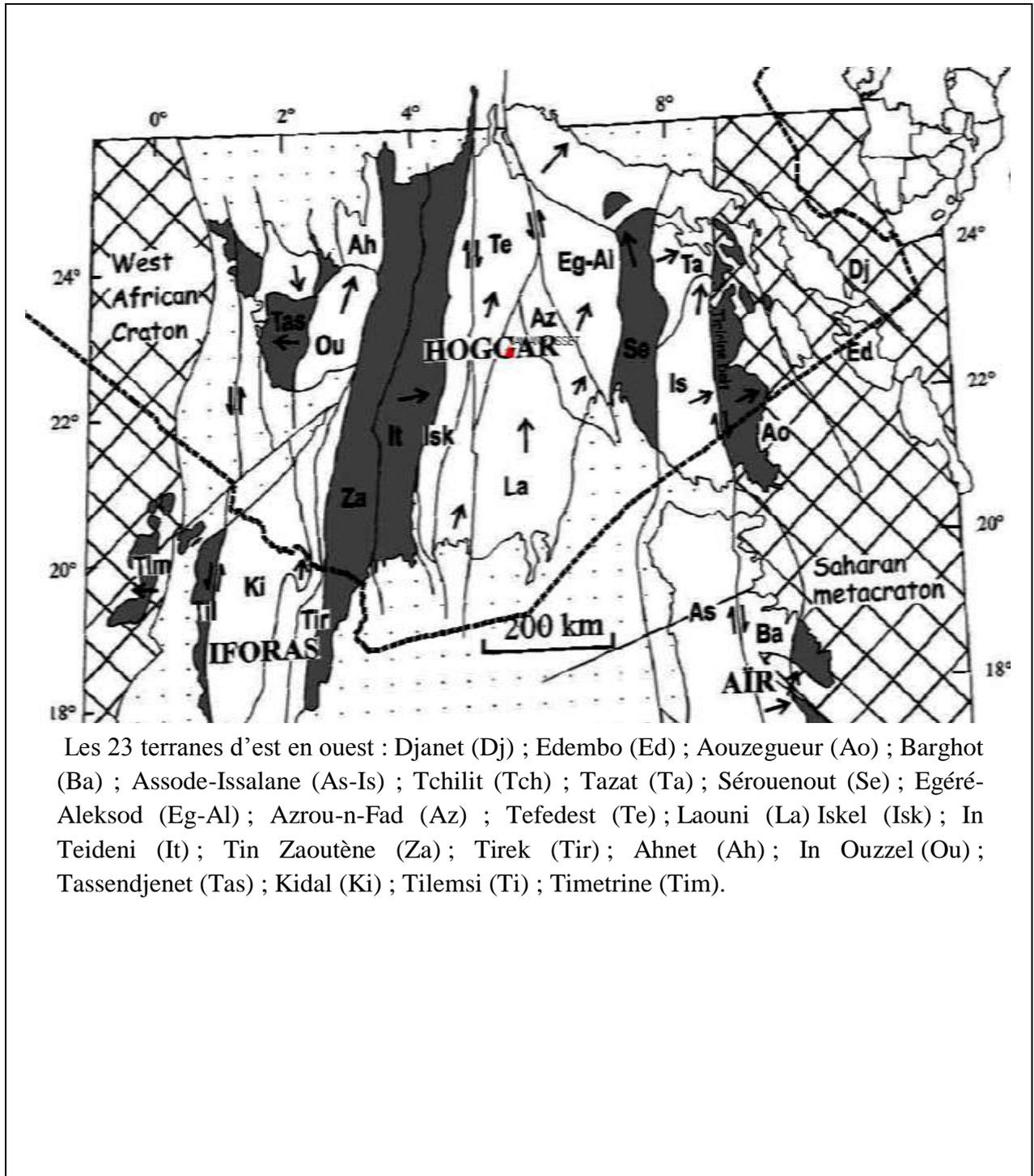


Figure I.5 : les différents terranes du Hoggar (Black et al 1994).

2.1/ Domaine du Hoggar occidental : composé des terranes suivants (d'est en ouest) : Iskel (Isk) ; In Teideni (It) ; Tin Zaoutène (Za) ; Tirek (Tir) ; Ahnet (Ah) ; In Ouzzel (Ou) ; Tassendjenet (Tas) ; Kidal (Ki) ; Tilemsi (Ti) ; Timetrine (Tim).

Le Hoggar occidental ou chaîne dite panafricaine ou pharusienne est le résultat de la collision entre le craton ouest africain à l'ouest, et le bouclier targui à l'est pendant l'orogénèse panafricaine. Il est limité à l'est par l'accident 4°50' et à l'ouest par le craton ouest africain (I.4). Ce domaine est constitué essentiellement de formations volcano-sédimentaires et plutoniques d'âge Néoprotérozoïque (800-540 Ma) avec quelques blocs résiduels de formations d'âge Paléo à Mésoprotérozoïque. Il est subdivisé en deux rameaux d'affleurement occidental et oriental (Caby ; 1970, Bertrand ; 1972, Black ; 1978), situés de part et d'autre de l'unité granulitique de In-Ouzzal, laquelle est constituée de matériaux d'âge archéen (> 2700 ma) structurés et métamorphisés à l'Eburnéen (Ferrara et Gravelle ; 1966, Allegre et Caby ; 1972, Lancelot et al ; 1976, Haddoum ; 1984).

Les deux rameaux occidentaux et orientaux datant du Protérozoïque supérieur sont constitués essentiellement de formations volcano-sédimentaires (série à stromatolithes à la base et une série verte au sommet) séparés par une discordance stratigraphique et recoupés par un plutonisme orogénique plus développé d'âge néoprotérozoïque et recouvert par deux séries molassiques.

Suivant le nouveau schéma lithostratigraphique de D.Meriem (2006) les formations volcano-sédimentaires sont subdivisées en deux groupes. Le Pharusien inférieur (Ph I) et le Pharusien supérieur (Ph II).

Le Pharusien inférieur (Ph I) est représenté par une série de plates formes regroupant un ensemble de roches d'origine détritique (essentiellement des schistes, des quartzites alumineux, des métapélites, des métagrès, des marbres et dolomies parfois à stromatolithes) et un ensemble de roches volcaniques essentiellement mafiques, que recourent des complexes intrusifs de roche mafique et ultramafique à caractère ophiolitique.

Le Pharusien supérieur (Ph II), en discordance sur le (Ph I), comprend trois séries :

- Une série détritique à caractère flychoïde formée de grès et de pelites surmontées par des volcanites (basaltes, andésites, dacite et rhyolites) d'affinité tholéitique à calco-alcaline.

- Une série volcano détritique constituée principalement de niveaux de conglomérats et de marbres, de grés, de grauwackes surmontés par des laves volcaniques essentiellement mafiques (basaltes à andésites).
- Une série volcanique acide de composition sub-alkaline comprenant des coulées, des tufs et brèches de composition dacitique à rhyolitique.

Les séries molassiques qui affleurent sous forme de lambeaux résiduels transgressifs en petit bassin ou le long des accidents subméridiens comprennent des conglomérats polygéniques, des arkoses conglomératiques, des grés, des pélites parfois de couleur pourpre.

Les roches plutonique au Hoggar occidental sont essentiellement représentées par des corps basiques ultrabasiques d'âge méso à néoprotérozoïque et de batholithes de granitoïdes calco-alkalin à alcalins d'âge néoprotérozoïque.

2.2/ Domaine du Hoggar central polycyclique : Il comprend les terranes suivants (d'ouest en est) : Laouni (La) ; Tefedest (Te) ; Azrou-n-Fad (Az) ; Egéré-Aleksod (Eg-Al) ; Sérouenout (Se) ; Tazat (Ta) ; Tchilit (Tch) ; Assode-Issalane (As-Is).

Il représente la partie médiane du bouclier (fig.I.4) limité à l'ouest par l'accident 4°50' et à l'est par l'accident de Honedj 8°30'. Ce domaine a été considéré comme polyorogénique du fait de la présence d'âge géochronologique à environ 1000 ma correspondant à l'orogénèse kibarienne en plus d'autres âges connus dans le reste du Hoggar (éburnéen et panafricain). Ce domaine est caractérisé par une structure et une lithologie diversifiées dans le détail.

Il est constitué en majeure partie de terrains métamorphiques d'âge paléoprotérozoïque à mesoprotérozoïque «suggarien». Les formations volcano-sédimentaires d'âge néoprotérozoïque comblent les grabens de ce domaine, et sont recoupés localement par des granitoïdes panafricains.

2.3/ Domaine du Hoggar oriental :

Ce domaine s'étend à l'est de l'accident 8°30' (fig. I.4). Il est formé de trois zones, séparées par des grands accidents verticaux. Elles sont : la zone occidentale (chaîne ou série de Tiririne), la zone centrale et la zone orientale (pré -Teririne de Djanet-Tafassesset).

- a) La zone occidentale (la chaîne de Tiririne) s'étend le long du cisaillement majeur, l'accident 8°30', est constituée de dépôts détritiques molassiques (arkose et

conglomérats) découlant vraisemblablement du remaniement des formations du substratum oriental (zone pré-Teririne de Djanet-Tafassasset). Cette série est de structure subhorizontale. Son âge serait antérieur à 580 ma (Ducrot et Lancelot ; 1976). Elle est formée de trois séries volcano-sédimentaires et terrigènes :

- La série de plate forme, essentiellement composée de micaschistes avec alternance de niveaux de pélites, de conglomérats, de marbres et de quartzites.
 - La série volcanique : constituée de basaltes, d'andésites, de rhyodacites et rhyolites porphyrique.
 - La série de Tiririne, essentiellement sédimentaires et discordante, formée de deux groupes superposés : série inférieure composées de conglomérats et d'arénites gréseuses à la base et surmontés par une alternance rythmique de caractère turbiditique de grès et pélites, et localement de calcaires et dolomies à stromatolites. et la série supérieure (série Arokame) constituée de conglomérats et poudingues avec des niveaux de grès et arkoses.
- b) La zone centrale correspond à une ceinture d'orientation NW-SE, composée essentiellement de batholite de granitoïdes très mylonitisés.
- c) La zone orientale ou zone pré-Teririnienne de Djanet-Tafassasset est de lithologie encore plus variée et caractérisée par l'abondance de termes méta-volcano-sédimentaires et son envahissement par des roches plutoniques notamment granodioritiques qui forment de vastes massifs qui sont datés de 600 ma (J. Ducrot et J. Lancelot ; 1976).

Les complexes plutoniques du Hoggar oriental comprennent de petits complexes mafiques à ultra mafiques précoces (ex complexe d'Arirère, Kalabeichkine et al. 1978 ; Katchevski al. 1982 datés à 729 Ma (Caby et Andreopoulos-Renaud, 1987) et de grands complexes granitoïdes (batholite de Honadj et Adaf) datés respectivement à 604 ± 13 Ma (Bertrand et al, 1978) et entre 585 ± 13 Ma à 553 ± 15 (Guérangé et Lasserre, 1971).

Les trois zones du Hoggar oriental citées précédemment sont représentées par les différents terranes suivants : Barghot (Ba) ; Aouzegueur (Ao) ; Edembo (Ed) ; Djanet (Dj) (Fig. I .5).

3/ Formations de couverture phanérozoïques du Hoggar :

Ces formations sont essentiellement représentées par les dépôts tabulaires d'âge paléozoïque et avec quelques affleurements de formations sédimentaires mésozoïques et volcaniques d'âge cénozoïque. Les formations d'âge quaternaire comprennent des dépôts alluvionnaires et

éluvionnaires de graviers et de limons déposés dans les oueds (O. Tafassasset, O. Tin-Tarabine, O. Tekouiat, O. Amded, O. Igherghar, Oued de Tamanrasset et autres) et dans les plaines intra- montagneuses et dans les piémonts (dépression de Tafassasset, Amador, Tin-Seririne et Tanezrouft). Les dépôts éoliens forment des dunes des sables (Erg Kilian, Erg In-Ataram, etc...) (fig. I.6).

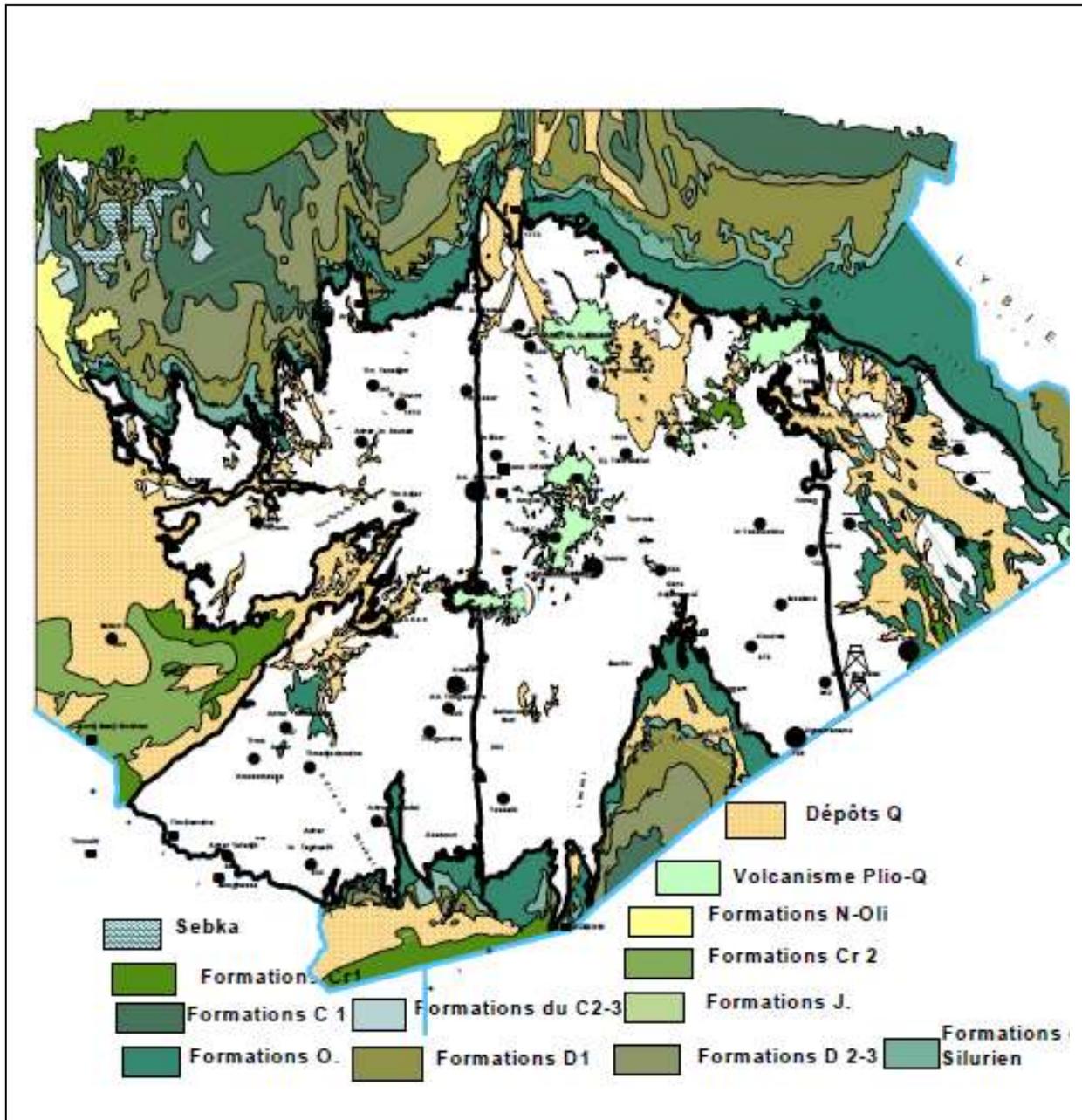


Figure I.6 : les formations phanérozoïques du Hoggar Meriem. D.E, Boufassa A. : le Hoggar office national de la recherche géologique et minière (O.R.G.M)

4/ Evénements tectono-métamorphiques du bouclier touareg :

Dans le bouclier touareg plusieurs événements tectono-métamorphiques ont été reconnus dont les plus importants sont :

4.1/ Un événement très ancien correspondant aux roches à faciès granulitique daté de 2995 Ma à 3300 Ma pour les carbonatites et à 2860 Ma pour les charnokites dans le mole de In-Ouzzal (Hoggar occidental), et à 3500 Ma pour les métasédiments de la série rouge de Gouroumelalen (Hoggar central).

4.2/ L'événement éburnéen : appelée suggarien par (Lelubre ; 1952). Il a été reconnu dans le Hoggar occidental (Tassandjanet, mole In-Ouzzal et son prolongement vers le sud Adrar du Iforas (Allegre et Caby ; 1972). Dans le Hoggar central cet événement à été mis en évidence dans l'Aleksode, dans le Gouroumelalen et dans la région de Tamanrasset (Bertrand et Laser ; 1976, Latouche et Vidal ; 1974, Bertrand et al 1984). Le meilleur faciès représentés dans cet événement est celui des leptynites gneissiques de la série Gouroumelalen et de gneiss In-Ouzzal respectivement daté à 1975 et 2310-1820 ma.

4.3/ L'événement kibarien : est mal défini (1130 ma sur les roche de la série d'Aleksode et 982 Ma sur les roches de la série de Toukhmatine et de Tit-n'Afra).

4.4/ L'événement panafricain : cet événement majeur affecte presque tout le Hoggar avec des intensités variables selon les endroits. Ces manifestation tectoniques sont très variables d'un domaine à l'autre du Hoggar et se développe dans le temps, probablement d'une manière continue, entre 630 et 580 Ma (Bertrand et al ; 1986).

Les stades post tectoniques correspondants, qui s'accompagnent du rejeu des grandes failles décrochantes se poursuivent jusque 540 Ma (Leiégeois et Black ; 1984).

Les structures associées à cet événement peuvent être, soit des plis droit de direction voisine de N-S, soit des charriages déversés vers le N-NE (Bertrand et al ; 1984, Lapique et al ; 1986). Elles se sont faites dans des conditions métamorphiques variant du faciès amphibolite au faciès schiste vert.

Cet événement se caractérise par des alignements NNW-SSE des structures avec une foliation mylonitique subhorizontale, reprise par des plis de plan axial redressé (Boullier et Bertrand ; 1981, Lapique et al ; 1986).

5/ Géologie de la région d'étude :

La région d'étude fait partie du Hoggar central polycyclique qui est l'un des domaines du Bouclier Touareg. Du point de vue stratigraphique, le Hoggar central est composé des formations suivantes (fig. I.7) :

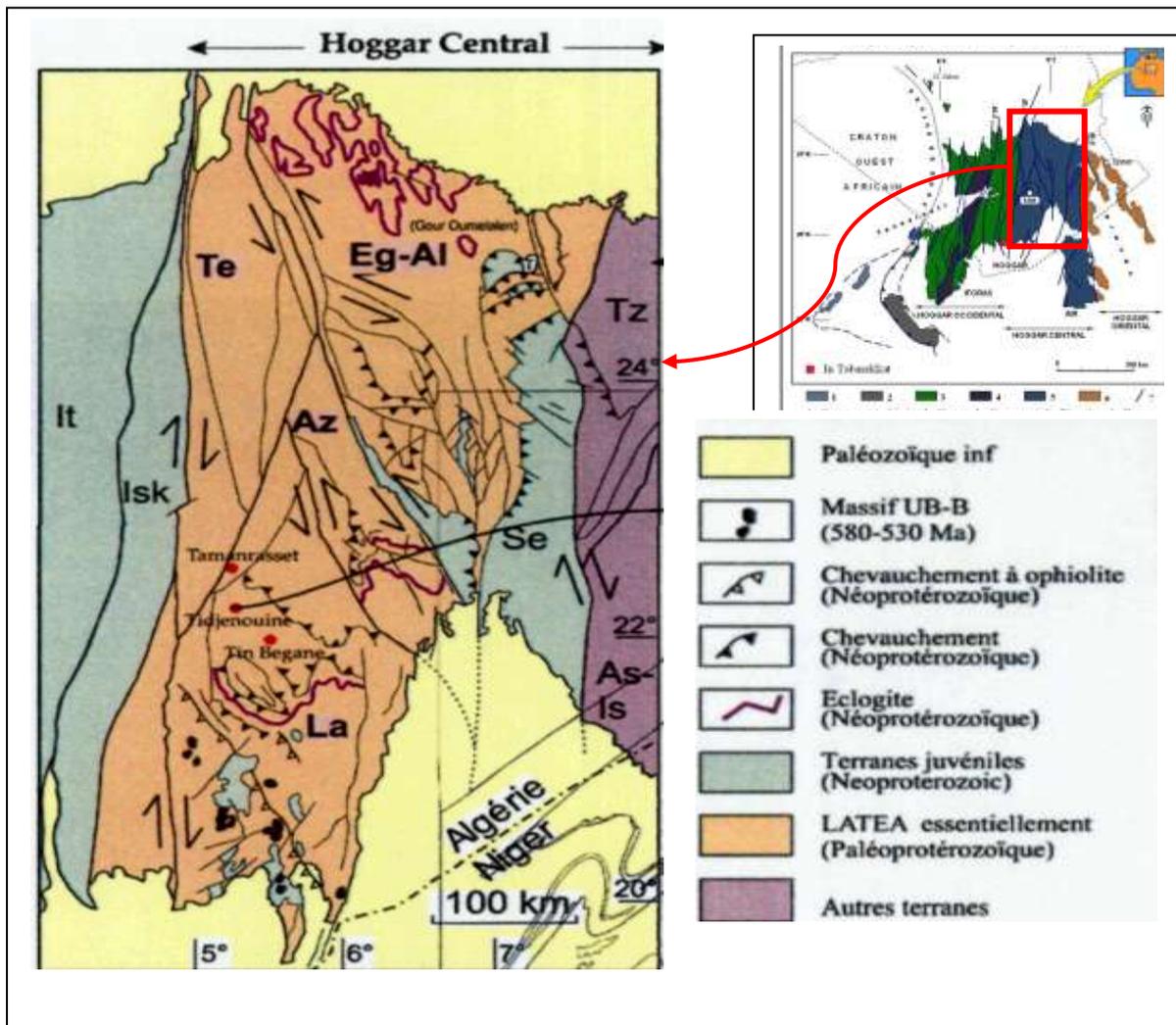


Figure I.7 : le Hoggar central (Léigeois et al, 2003)

5.1/ Les formations paléo à mesoprotérozoïque : Ces formations ont été subdivisées globalement en deux séries

5.1.1/ Série inférieure : elle est essentiellement gneissique d'origine orthodirivé, et appelée Archchoum (Lelubre 1952) elle est surtout composée de gneiss quartzo-

feldspathique à biotite et grenat, de gneiss rubané à amphiboles, et de gneiss ocellés avec de rares niveaux de marbres, de leptynites, de quartzites et d'amphibolites.

Dans ces formations on rencontre localement des reliques de Protolite d'âge archéen probable (dans Tafedest, Gouroumelalen et dans le domaine Issalane).

5.1.2/ Série supérieure : de nature supracrustale, elle est appelée Egeré-Aleksode (Lelubre ; 1952, Bertrand ; 1974). Elle est composée d'amphibolites parfois à grenat , de gneiss leucocrate à biotite, muscovites, et de gneiss mésocarte à amphibolites, pyroxènes et plagioclases , et de formation métasédimentaire de quartzites à magnétites, de marbre et de schistes alumineux .Cette série renferme localement des lentilles tectoniques et des massifs lopolitiques de roche basique, ultrabasique et amphibolites associés.

5.2/ Formations néoprotérozoïque : ces formations renferment les séries terrigènes et volcano-sédimentaires classées selon leur formation, leur degré de métamorphisme et leur niveau stratigraphique en :

5.2.1/ Formations détritiques de Tazat :

Cette série de caractère fluvial deltaïque repose en discordance stratigraphique (Blaise ; 1969, Bertrand et al ; 1968, Itskov et al ; 1988) sur le socle, et est constituée d'une alternance de quartzites, de grés, de calcaires avec des niveaux de conglomérats.

5.2.2/ Formations volcano-sédimentaires :

Ces formations affleurent dans des bassins en graben qui sont localisés dans le domaine du terrane de Serouanont et dans la région d'Aghafsa. Elles sont subdivisées en trois séries superposées (Meriem. D.E, Boufassa A. : le Hoggar office national de la recherche géologique et minière (O.R.G.M)

- **Série de plate forme :** elle est constituée par des micaschistes parfois à grenat. Elle est associée avec de niveaux de quartzites, de marbres, de pelites et de sillons et /ou de coulées de metabasalte. Cette série est recoupée par des corps des roches basiques – ultrabasiques qui affleurent sous forme d'écailles tectoniques.
- **Série volcano-sédimentaire :** elle repose en discordance sur la série précédente. Au serouanont cette série est constituée d'une alternance de grés, de pélites et de greywacks avec des niveaux de schiste noir et de conglomérats. Dans la région d'Aghafsa cette série est subdivisée en deux unités : Unité grésopélitique constituée

d'une alternance de grès, de pélites et de marbres avec des sills et/ou des coulées de laves basaltiques et une unité volcanique constituée d'une alternance de roches volcaniques composées de basaltes, d'andésites et de rhyolites et de niveaux de conglomérats, de grès, de pélites et de graywackes.

- **Série molassique** : elle affleure en forme de lambeau kilométrique et repose en discordance stratigraphique et angulaire sur la série volcano- sédimentaire. Elle est essentiellement constituée de conglomérats polygéniques associée localement avec des niveaux de pélite violace, de marbre, de jaspe, de grés arkosique et de brèches volcanique.

Ces formations ont subi trois phases de déformation panafricain : une phase tangentielle avec formation de plis isoclinaux, de schistosité passant localement à la foliation et par écaillage, et deux phases de décrochements ayant produit des accidents senestres (N150°-330°) engendrant des plis ouverts et des plis droits d'axe subverticaux, et des accidents subméridiens tardifs.

5.3/ Les formations magmatiques du Hoggar central :

Les formations de ce domaine sont recoupées par des complexes plutoniques pré-, syn-, à tardi -panafricain (**Meriem. D.E, Boufassa A.** : le Hoggar (O.R.G.M)) de composition diverse. Les plus anciens sont les complexes plutoniques précoces de composition mafique et ultramafique. Les roches plutoniques panafricaines sont essentiellement des gros batholites composés de granodiorites, monzogranite à biotite rarement à amphibole et biotite de nature calco-alcaline riche en potassium (batholites HKCA). Ils occupent presque le tiers de la superficie du Hoggar central. Les complexes tardifs (post tectonique, Taourirts) (615-514) (Ma, Vitel ; 1979, Viallette et Vitel ; 1979, Bertrand et al ; 1986, Moulahoum ; 1988) sont généralement de petit plutons circulaires à subcirculaires associés souvent aux zones de cisaillement tardi à post tectonique, ils sont composés de granite à biotite et de granite à amphibole sodique et de suite géochimique sub alcaline et alcaline à hyperalcaline.

5.4/ Les épanchements volcaniques du Hoggar central :

Au Hoggar central, les roches volcaniques affleurent en plusieurs plateaux dont les principaux sont Tahalgha, Atakor, Manzaz, Taharaq, et l'Egeré. Ces districts volcaniques s'alignent suivant une direction NE-SW correspondant à un linéament tectonique (linéament de l'oued Amded). Les produits émis sont variés et vont des basaltes aux rhyolites ou aux phonolites. (Fig. I.8).

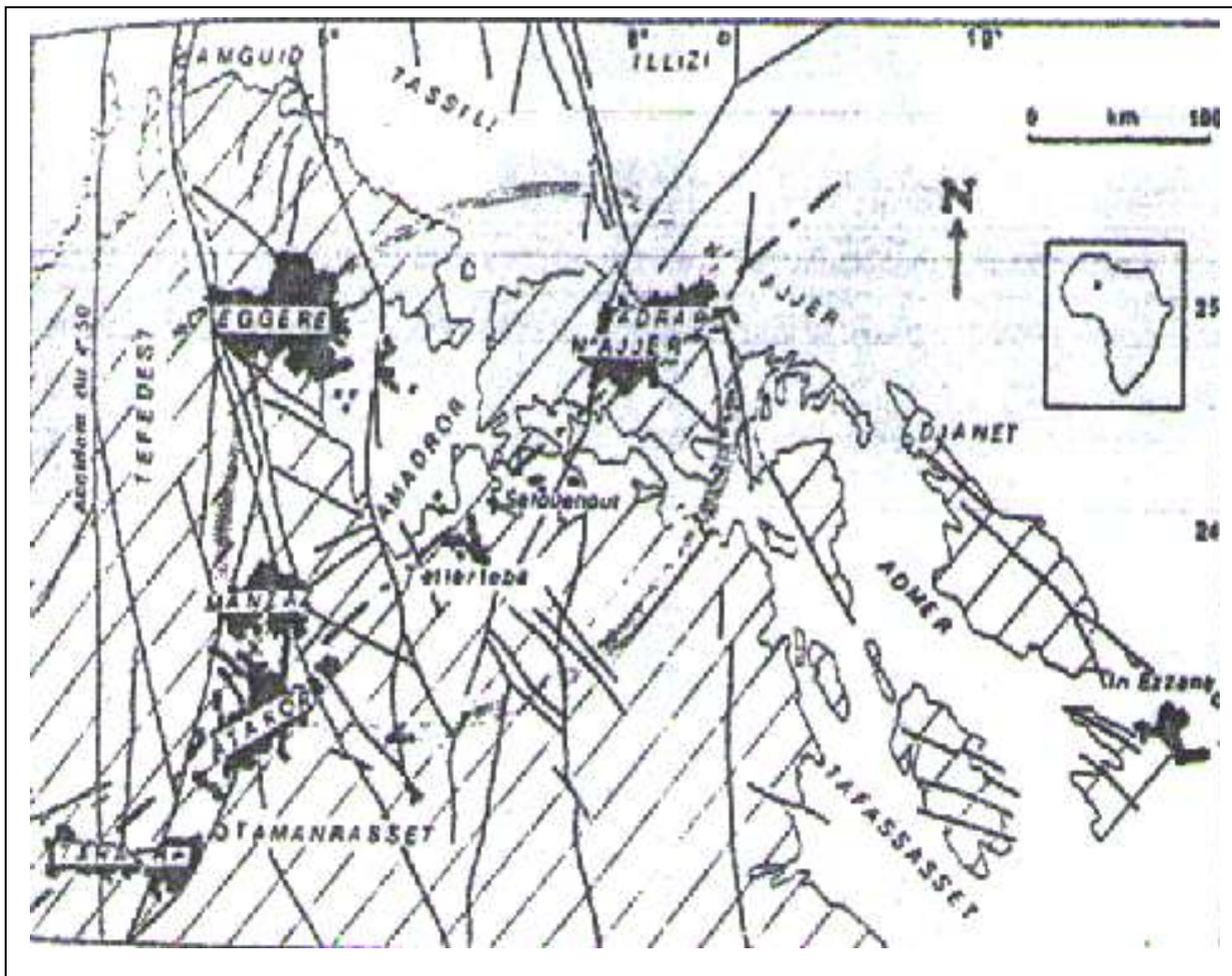


Figure I.8 : carte de distribution du volcanisme (mésozoïque à actuel) dans le Hoggar (Dauturia et Girod, 1991 modifiée).

6/ Tectonique et métamorphisme régional :

Trois événements tectoniques caractérisent le Hoggar central : l'événement Eburnéen, l'événement Kibarien et l'événement Panafricain. Ces événements ont donné lieu aux déformations souples et cassantes accompagnées par un métamorphisme à différents degrés (Meriem. D.E, Boufassa. A. le Hoggar O.R.G.M).

6.1/ L'événement Eburnéen : l'évolution de cet événement est inconnu, seulement le résultat d'ensemble qui a été observé, comme s'il n'y avait eu qu'une phase majeure de plissement représentée par une vaste chaîne plissée orientée NNW-SSE qui s'étend sur l'Egère, le Tourha, l'Aleksod, la Tazoulet et l'Arefsa (chaîne Egere-Arefsa). Il existe de nombreuses variations dans le détail des plis (Lelubre M. 1952).

6.2/ L'événement Panafricain : les formations métamorphiques et volcano -sédimentaires sont affectées au moins par deux phases tectoniques panafricaines (Meriem. D.E, Boufassa. A. le Hoggar O.R.G.M).

Les structures panafricaines sont localisées dans d'étroits couloirs, et correspondent essentiellement à des plis Couchés d'axe NW-SE à E-W (plis de la phase majeure qui est responsable d'empilements et d'écaillages majeurs et profonds des nappes crustales vers le N-NE, et de la création des grandes zones de cisaillement).

Des plis déversés d'axe variant de NE-SW à NW-SE résultent de la phase panafricaine tardive. Elle est à l'origine des charriages secondaires locaux, de déformations et rejeux des anciennes structures et de zones de cisaillement et elle a engendré des nouvelles structures et de nouvelles zones de cisaillement.

Les conséquences les plus importantes de l'événement panafricain sont le jeu des grands accidents subméridiens dont certains sont d'échelle continentale Haddoum .H (thèse doctorat).

D'après la carte géologique de Tamanrasset 1/500000 (voir annexe) et figure I.9 Ces accidents sont : l'accident du 4°50'd'échelle continentale à décrochement dextre, et l'accident d'In-Amguel de direction NNW-SSE, l'accident ouest Atakor d'orientation NNE-SSW et l'accident ouest Tamanrasset de direction NE-SW. Ils sont matérialisés par des zones mylonitiques.

La faille d'Irharhar-Arefsa (s'étend d'Amguid jusqu'Arefsa) à décrochement senestre souligné localement par des mylonites.

Le métamorphisme causé par l'ensemble de ces événement varie d'un faciès granulitique (Ouzegane ; 1981) à un faciès amphibole et localement à un faciès schiste vert (Meriem. D.E, Boufassa. A. le Hoggar O.R.G.M).

Le métamorphisme granulitique est probablement hérité de l'événement éburnéen. Le faciès amphibolique et eclogitique est essentiellement lié à la phase majeur tangentielle, le faciès schiste vert et localement le faciès amphibole caractérisent les formations volcano-sédimentaires panafricaine.

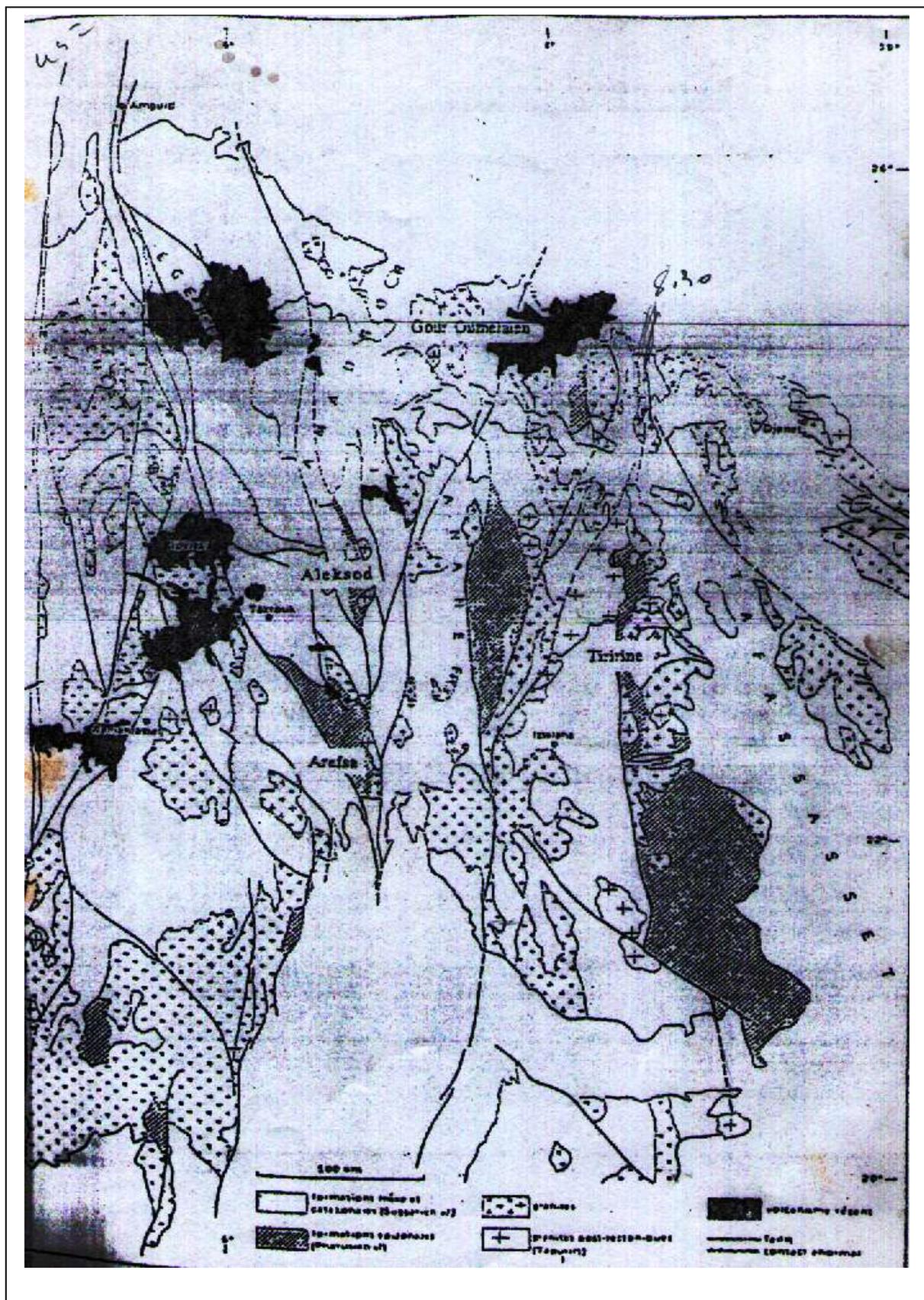


Figure I.9 : schéma structural du Hoggar central et oriental (Bertrand.JM ,1974)

7/ Géologie du site :

L'aire d'étude est localisée en bordure ouest de méta craton **LATEA** (acronyme des terranes : Laouni, Azrou-n-Fad, Tefedest, Egére-Aleksod) à cheval entre le terrane de Laouni et Tafedest

Les formations qui affleurent dans cette région sont représentées principalement par les ensembles suivants (fig. I.10) :

7. 1/ Les formations paléprotérozoïques : elles forment le socle anti panafricain et occupent la majeure partie de la région d'étude. Elles sont composées essentiellement de différentes variétés de gneiss souvent migmatisés (gneiss oillé, rubané) accompagné par des lentilles d'amphibolites, quartzite et cipolin (série archchoum). Ces formations ont subi une histoire métamorphique éburnéenne marquée par une phase prograde à 750°C-800 pour une pression de 10 ± 1.5 Kb, et une phase retrograde isotherme qui va jusqu'à 6.5 ± 1.5 kb Ouzegane (1981).

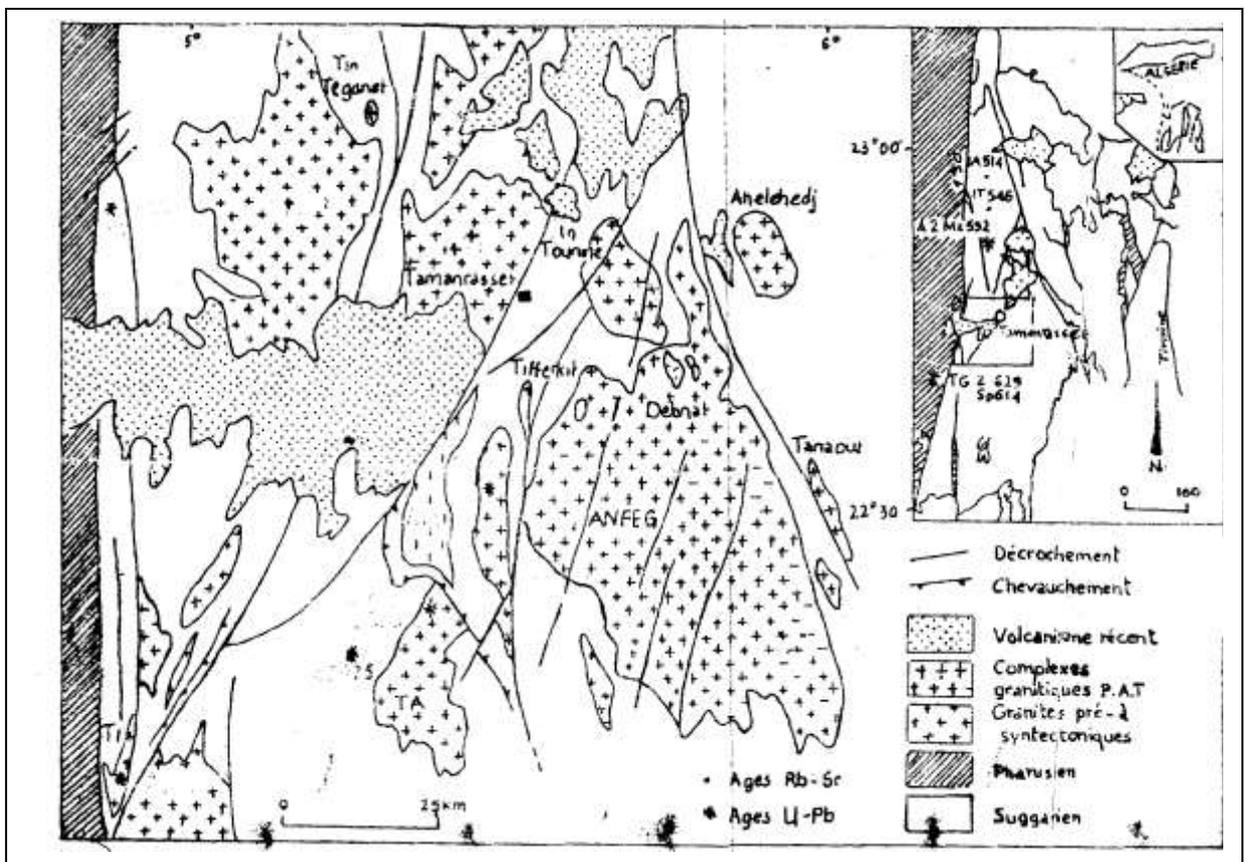


Figure. I.10 : schéma géologique de la région de Tamanrasset
(A.SCHEILLETZ et al, 1992)

7.2/ Les roches intrusives d'âge panafricain : représentées principalement par des batholites granitiques syn à post -orogénique recoupée les formations gneissiques. Les intrusions syn tectonique sont composées par des batholites granithoïde (granite HKCA). Les intrusions post orogéniques forment des plutons circulaires à subcirculaires. Elles sont composées de granites à biotite et parfois par des granites à amphibole sodique de nature subalcaline et alcaline à hyperalcalines (granite d'In-Tounine).

Ces formations précambriennes sont recoupées par un réseau filonien acide ou basique très important (quartz, microgranites, micro diorite, aplite, et pegmatite).

7.3/ Les formations volcaniques : appartiennent au massif de l'Atakor. Elles sont composées de basaltes, trachytes et phonolites.

7.4/ Les dépôts quaternaires : sont essentiellement de nature alluvionnaire représentés par des débris de roche de dimension variable et des sables localisent dans le lit de l'oued de Tamanrasset.

8/ Tectonique de site :

La carte géologique (1/500.000) de la région de Tamanrasset et le schéma structural (échelle 1/1.000.000) montrent que la région d'étude est recoupée par un ensemble de failles régionales de direction NNE-SSW avec un décrochement dextre, recoupées par une autre faille régionale de direction NNW-SSE avec un décrochement senestre, recoupé par un réseau de failles locales de direction NNE-SSW. La partie sud se présente sous forme d'un contact de nappe de direction NW-SE et le chevauchement se fait vers le NE ((Fig. I.11.). La structure globale est formée par des plis à axe N-S, droit ou déversé. Rapport (ENHYD), Juillet 2004

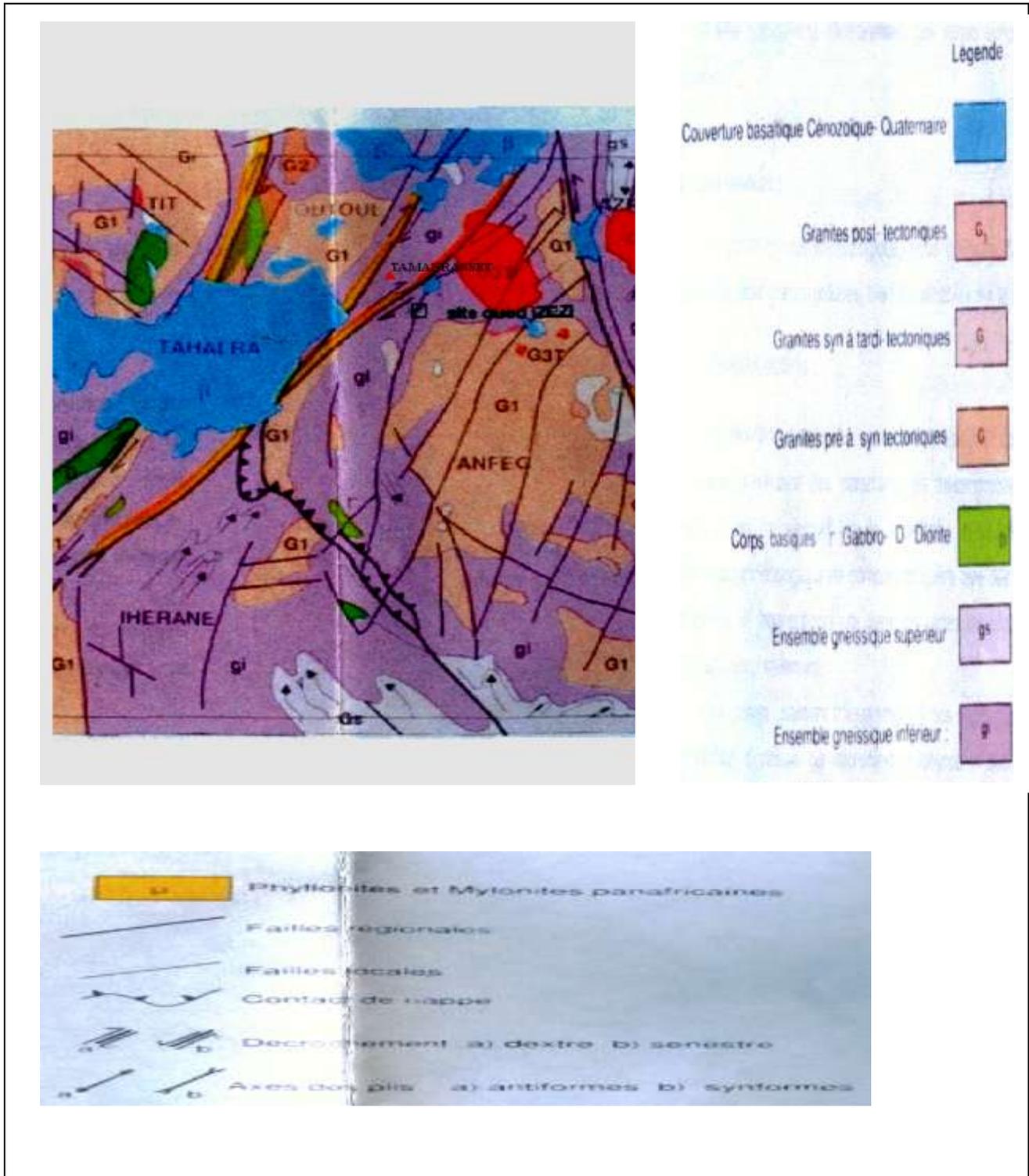


Figure I.11 : schéma structural 1/000.000de la région Tamanrasset. Rapport (ENHYD), Juillet 2004

9/ Conclusion :

Dans le Hoggar central les ensembles gneissiques du paleoprotérozoïque inférieur dominant. Ils comprennent les séries de l'Archchoum et de l'Aleksod. Les séries volcano-sédimentaires Pharusienne affleurent dans les sillons d'Arefsa et serouanout. Toutes ces séries sont affectées par la tectonique panafricaine et largement recoupé par des granitoïdes syn et post tectonique.

La région d'étude est représentée dans sa majeure partie par des formations gneissiques paleoprotérozoïques, recoupées par du granite panafricain et des épanchements basaltiques plio-quaternaires et des alluvions qui recouvrent le lit de l'oued.

Les formations précambriennes ont subi plusieurs phases tectoniques qui donnèrent naissance aux accidents subméridiens de plusieurs kilomètres de long soulignés par des mylonites et recoupés par un réseau filonien important. Ce contexte tectonique offre à cette région des caractéristiques hydrogéologiques importantes.

10/ Hydrogéologie du massif cristallin du Hoggar :

Les eaux souterraines existant dans le massif cristallin du Hoggar ont été distinguées en (fig. I.12) :

- Les eaux souterraines dans les basaltes tertiaires : Les eaux souterraines sont liées aux épanchements basaltiques de Silet et Tamanrasset. Les circulations sont fissurales.
- Les eaux souterraines du socle cristallin : ils sont liés à la croûte d'altération et aux grandes fractures.
- Les eaux souterraines des alluvions anciennes et récentes du Quaternaire : les nappes des inféro-flux liées aux alluvions contenues dans les zones d'élargissement des oueds du Hoggar, situées au pied de l'Atakor et s'étendent notablement au-dessus de 1000 m.

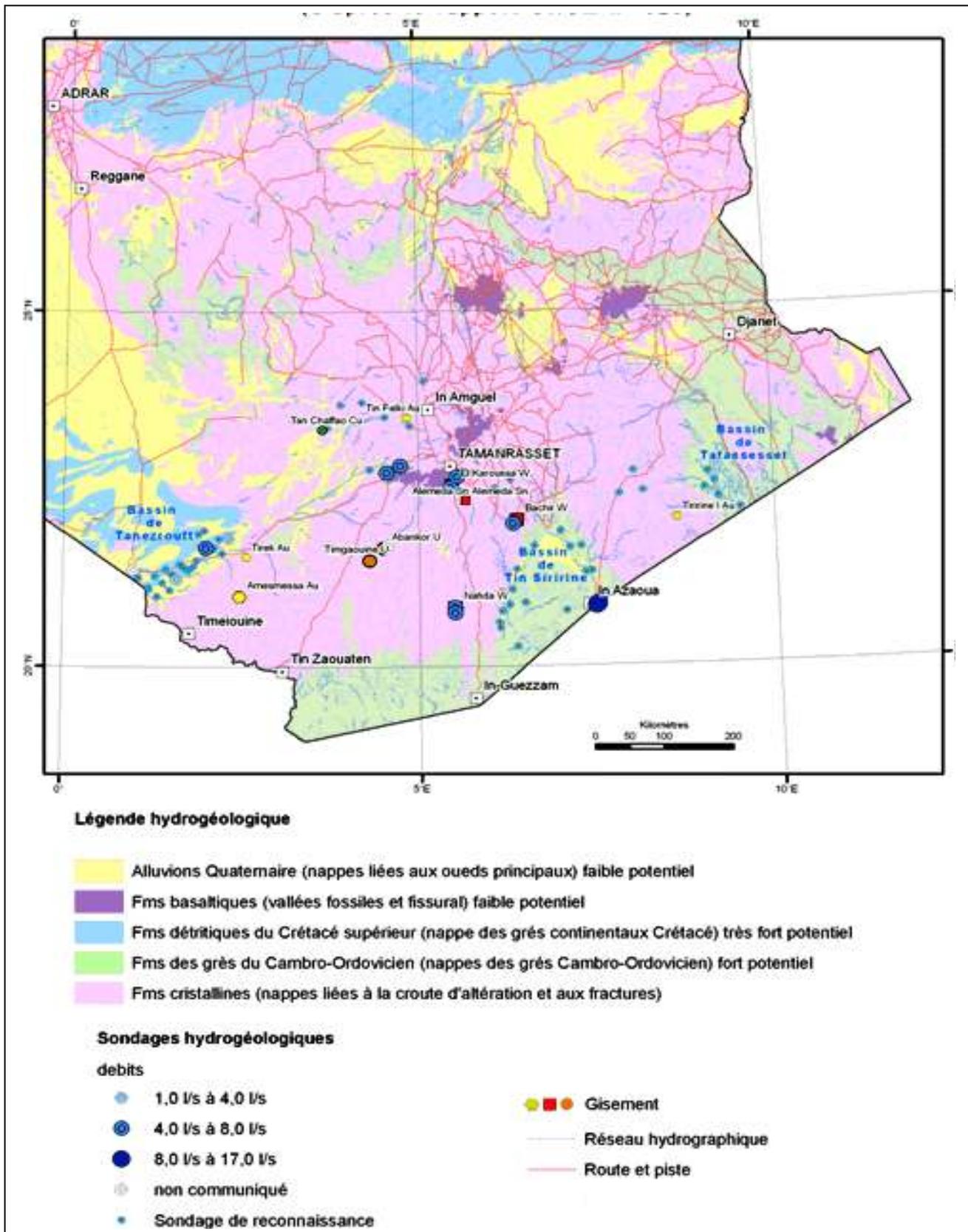


Figure I.12 : les différentes formations aquifères de Hoggar (d'après le rapport ORGM n° 620)

11/ Conséquence hydrogéologique :

Du point de vue hydrogéologique, les roches gneissiques sont caractérisées par leur nature compacte et leur faible capacité à contenir l'eau. Donc elles ne sont aquifères qu'au droit de certains accidents tectoniques accompagnés souvent par des zones d'altération qui permettent le développement d'horizons perméables au sein de cette roche, puisque les zones où préexistent des réseaux de fracture d'origine tectonique permettent la circulation de l'eau et constituent des lieux privilégiés où l'action de l'altération a augmenté. Ces effets conjugués de la fracturation tectonique, de l'altération et de fissuration ont conduit à la formation d'axes où l'altération a pénétré plus profondément. De ce fait les réserves peuvent être importantes là où la zone altérée et fissurée est épaisse. La recharge s'effectue par les zones accidentées.

Le contexte lithologique et tectonique du bassin versant de l'oued Tamanrasset permet de distinguer deux types de formations susceptibles d'être aquifères :

- La formation des alluvions quaternaires.
- La formation de socle cristallin fissuré.

Les formations du socle cristallophyllien fissuré ont une extension importante dans le bassin versant de l'oued Tamanrasset par rapport aux formations alluviales poreuses qui ont une extension limitée. Dans un tel contexte géologique les formations cristallines constituent la principale cible pour la prospection hydrogéologique. Mais les écoulements en inféro-flux dans les alluvions d'oued ont également un intérêt hydrogéologique.

III/ Géométrie de l'aquifère :

Le réservoir est caractérisé par sa nature, sa géométrie et sa structure et des conditions aux limites. La géométrie permet de définir le réservoir comme un espace fini limité à la base par le substratum et latéralement par les conditions aux limites géologiques (failles, passages latéraux de faciès).

La géométrie et la catégorie des aquifères en zone de socle dépendent du type de roche qui composent le substratum, de la tectonique et de l'altération qu'elles ont subi depuis leur mise en place.

Pour déterminer la géométrie des horizons perméables au sein de l'aquifère gneissique du bassin versant de l'oued Tamanrasset, on doit définir

- L'épaisseur des zones d'altération et de fissuration et leurs extensions latérales.
- Le type de recouvrement (perméable ou imperméable).

La connaissance des points précédents nécessite l'utilisation de méthodes appropriées qui nous amènent à localiser ces aquifères et à préciser leur géométrie.

1/ Les données de forages :

Les coupes de forages et sondages reportés sur la figure (I.13) ont été utilisés pour déterminer la lithologie des formations rencontrées (l'épaisseur des gneiss altérés et fissurés, la nature de recouvrement et la profondeur du substratum).

Les principaux niveaux relevés à partir des coupes lithologiques des forages (voir les coupes en annexe I) sont les suivants :

- Les formations de recouvrement constituées de sable, limon gravier apparaissent dans la plupart des forages à l'exception des forages qui sont implantés en dehors du lit de l'oued. L'épaisseur de cette couche est variable et toujours inférieure à 25 m.
- La couche altérée –fissurée : d'épaisseur variable entre 3 m et 30 m constituée essentiellement de gneiss altéré et fissuré, dans certain forage. ce niveau renferme des proportions d'argiles résultant de la transformation des feldspaths et mica.
- Le substratum gneissique sain est touché à une profondeur qui varie entre 11 m jusqu'à 100 m.

L'état de fissuration des gneiss (épaisseur de la zone fissurée et la densité de fractures) reste en général réduit. Les coupes des forages utilisés n'indiquent pas le degré de fissuration exacte. Par contre les sondages mécaniques réalisés au niveau de l'oued izerzi qui est l'affluent de l'oued Tamanrasset, montre que le degré de fissuration de gneiss est défini par "RQD" (rock qualité désignation).

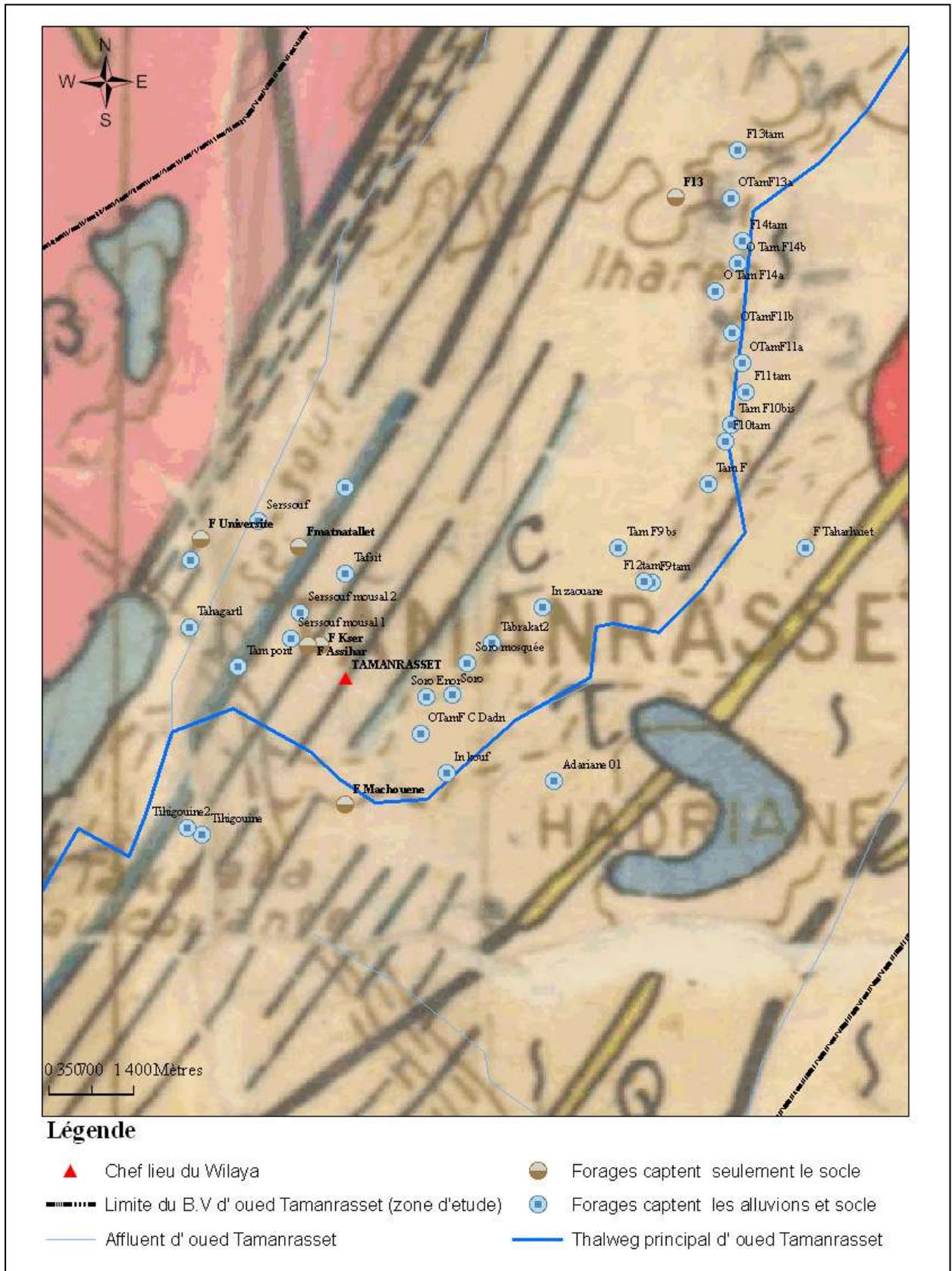


Figure I.13 : localisation des forages et des sondages mécaniques dans le bassin de Tamanrasset

Le pourcentage de récupération des carottes varient de 25 à 90%. Les valeurs du "RQD" oscillent entre 15 et 80% selon les sondages, ces valeurs correspondant à une roche de bonne qualité à moyenne, donc un faible degré de fissuration à moyenne.

Les forages et les sondages mécaniques sont les meilleurs moyens de reconnaissance directe de formations géologiques souterraines, mais les informations obtenues restent ponctuelles et ne permettent pas de déterminer leur répartition spatiale.

2 / Fracturation :

Les formations cristallines sont massives et imperméables. Le facteur principal qui peut favoriser les circulations d'eau est la déformation tectonique qui donne lieu au développement de fractures.

L'étude des réseaux de fracturation est fondamentale pour déterminer les zones susceptibles d'être le siège d'écoulements souterrains. L'existence de fractures n'indique cependant pas qu'elles sont forcément aquifères, car les fractures ont des caractéristiques géométriques différentes. Hydrogéologiquement l'importance de la fracturation est représentée dans la détermination de la nature des fractures (fractures ouvertes ou fermées) et de leur rôle dans la circulation et d'alimentation des aquifères. La densité de fracturation joue un rôle important dans la connectivité des réseaux de fractures, en effet plus le réseau est dense, la connectivité est meilleure. La densité de fracturation est définie comme la longueur cumulée des fractures par unité de surface (Engalenc, 1978).

Dans l'aire d'étude, les formations géologiques sont majoritairement constituées de gneiss migmatitique qui a subi d'importantes déformations résultant de plusieurs phases tectoniques qui mettent en évidence un réseau de fracturation important et des fractures d'échelle régionales.

2.1/ Etude de la fracturation :

La fracturation peut être étudiée au moyen de différentes méthodes telles que la géophysique et la télédétection (photographie aériennes et satellitaires).

A travers les nombreuses techniques de la télédétection qui permettent de cartographier les linéaments, L'interprétation de ces linéaments consiste à les classer suivant des directions fréquentielles et selon leur longueur cumulée suivant ces classes.

La densité des fractures des terrains métamorphiques, éruptifs et volcaniques du Hoggar a été étudiée et synthétisée (Gribi .A, Sai .N, Younsi .N : notice explicative de la carte hydrogéologique du Hoggar et des Tassilis à 1/1 000 .000) par l'interprétation de deux image satellite LANDSAT TM numéros 206 et 207 qui a fait ressortir la prédominance de trois classes de failles principales supposées ouvertes dont l'orientation est par ordre d'importance : N110°, N160° et N50°.

2.2/ Interprétation des données de fracturation de la région d'étude :

Les données des images ERTS (earth resource technologie satellites) qui recouvre une partie de la zone d'étude reposant éventuellement sur les résultats des levés aéromagnétiques sont données à la (fig. I.14).

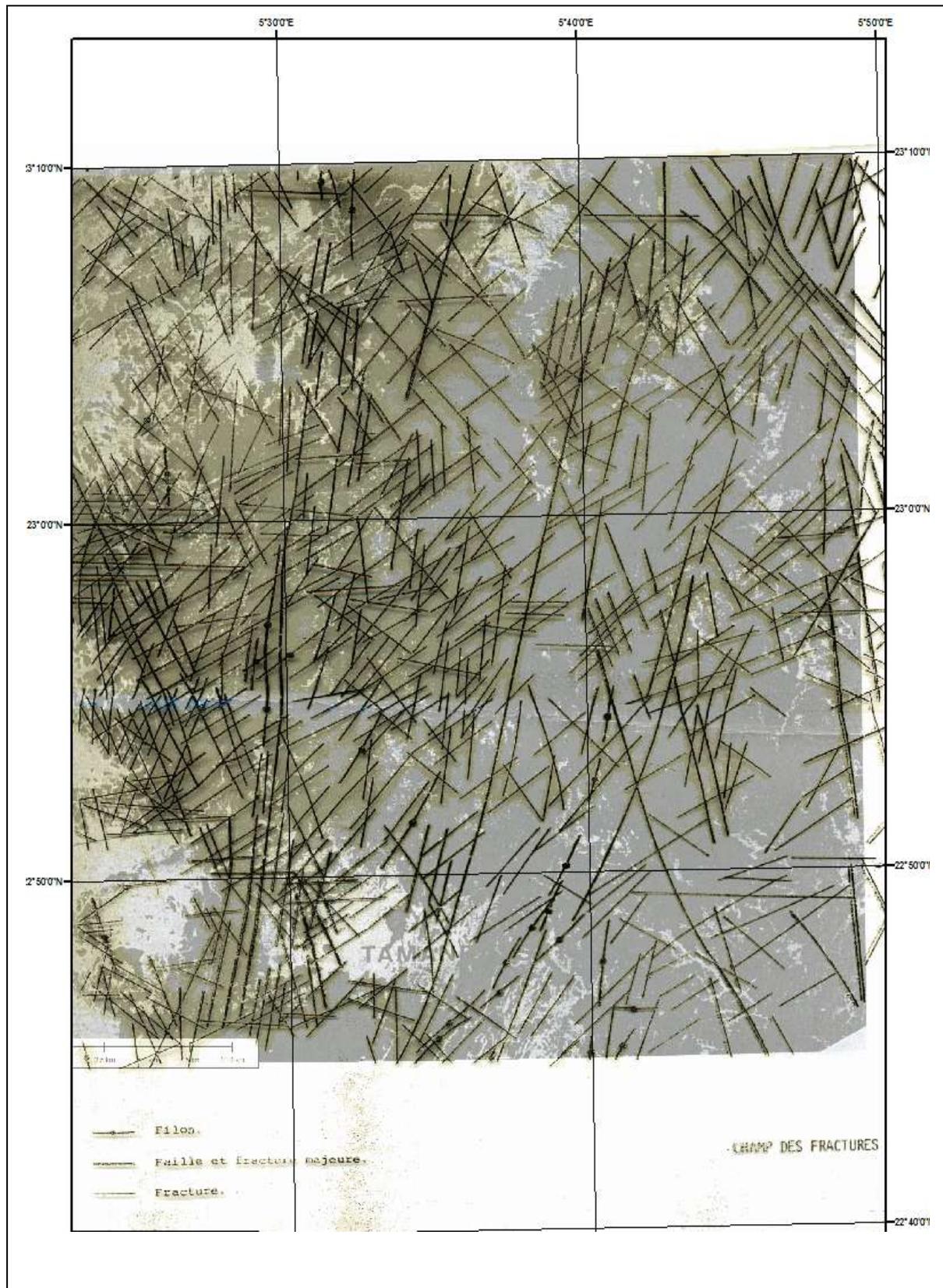


Figure I.14 : carte de fracturation de la zone de Tamanrasset (Groupe mixte SONARAM – IDROTECNECO 1975).

La carte de fracturation de la zone du Tamanrasset compte environ 665 fractures de longueur variée. J'ai regroupé ces fractures selon leur orientation en 18 classes d'orientation par croissant angulaire de 10 degrés. Ce classement permet d'effectuer La rosace directionnelle de la fracturation exprime en nombre est représenté à la (figures I.15)

La distribution directionnelle des linéaments fait ressortir que la classe de direction [N50°-60°] constitue la direction majeure de la trame de fractures. Les directions secondaires sont par ordre décroissant, les classes [N10-20], [N330-340], Ces familles de fractures peuvent être regroupées en quatre grandes familles principales qui sont NE-SW (N50-60), NNE-SSW (N10-20°) et NNW-SSE (N330-340). Ces directions peuvent être représentées la déformation de différentes phases de l'événement panafricain.

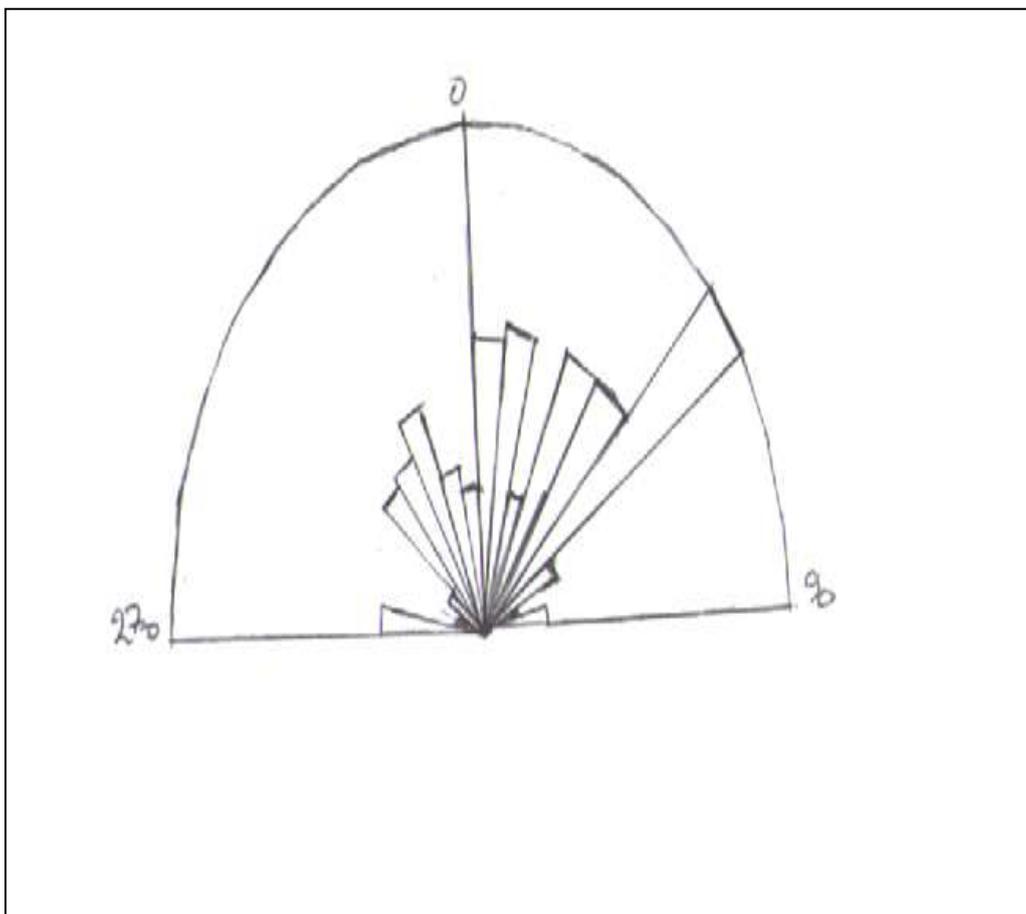


Figure I.15 : rosace directionnelle de la fracturation de socle de la zone d'étude
Fréquence en nombre (N= 665).

Selon l'interprétation des données de fracturation des formations du socle du Hoggar, les réseaux N50° est considéré ouverts.

La combinaison entre la carte du réseau de fractures et la carte de répartition spatiale des forages montre que les forages s'alignent selon deux direction N-S et NE-SW. Les forages qui ont un débit important sont proches des fractures N-S (fermées) et NE- SW (ouverte), donc la fracturation joue un rôle important à la productivité du forage mais il ya d'autres facteurs qui

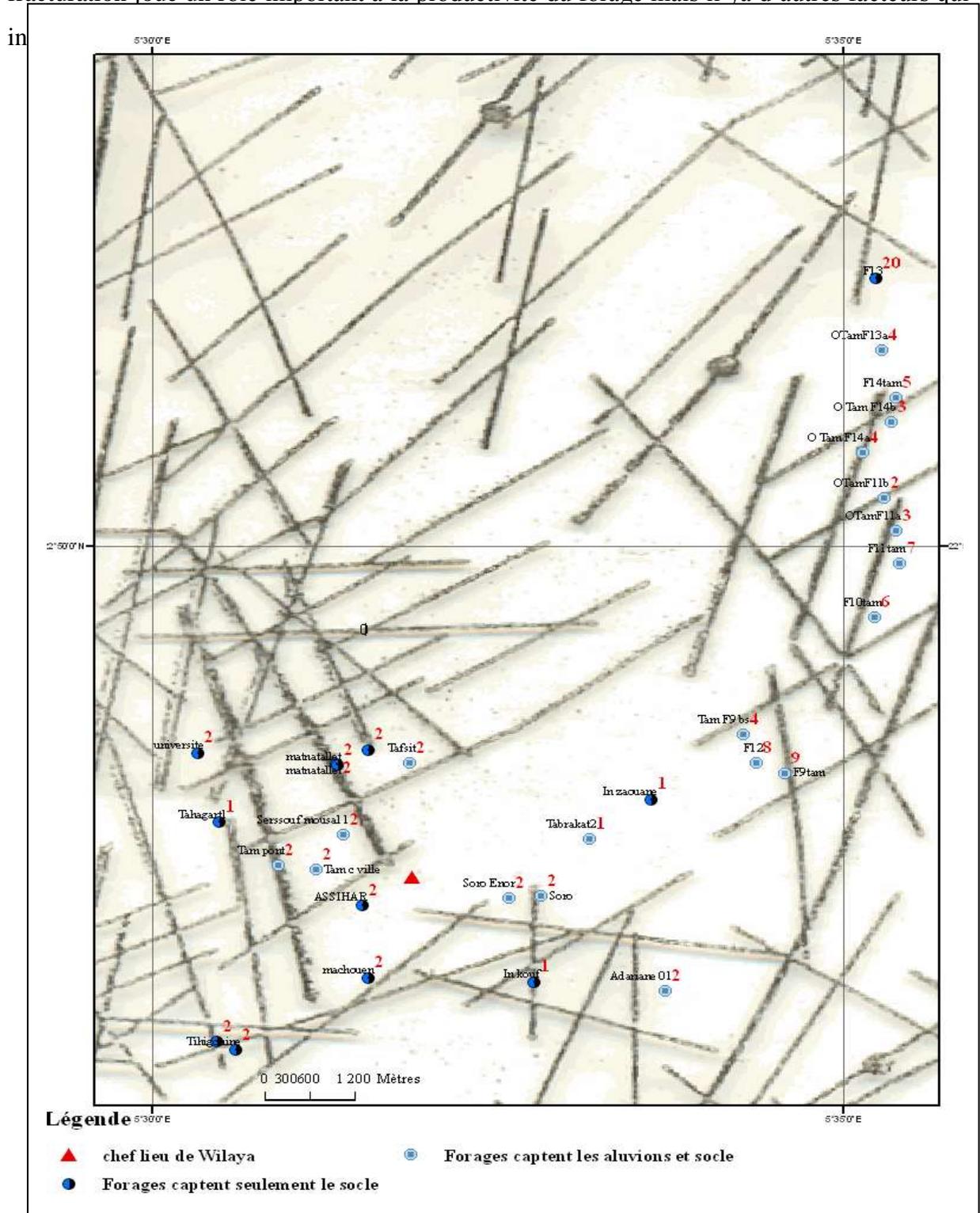


Figure I.16 : carte de fracturation et point d'eaux de la zone d'étude

3/ Prospection géophysique :

Dans l'étude géophysique, nous nous basons sur les données de deux campagnes de prospection géophysique, exécutées suivant le cours de l'oued Tamanrasset et oued Izerzi. La campagne réalisée sur l'oued Tamanrasset, en vue d'une éventuelle implantation des ouvrages de captage (effectué par le bureau d'étude : DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE juin 2001) et la campagne effectuée par l'Entreprise Nationale des études Hydrauliques (ENHYD) en décembre 2004) exécutée dans le cadre de la réalisation d'un barrage inféroflux sur l'oued Izerzi. Ces campagnes, ont utilisé deux méthodes de prospection géophysique différentes : la sismique réfraction et la prospection électrique, leur utilisation dans notre région a permis d'obtenir des informations sur :

- les différentes lithologies de la zone d'étude.
- l'épaisseur de la zone altérée et fissurée (zone préférentielle d'écoulement) et leurs extensions latérales.
- la profondeur du toit du substratum.
- la nature et l'épaisseur des formations du recouvrement (perméable ou imperméable).
- les anomalies structurales.

Les sites prospectés sont reportés sur la figure I.17 et la figure I.8

3.1/ Sismiques réfractions : La sismique réfraction est très utilisée pour l'étude des formations superficielles, en particulier pour l'étude du toit du socle sous la zone altérée, elle permet de déterminer la topographie et les variations latérales du socle.

- Quarante quatre stations sismiques réfraction de trois tirs normale-centré-inverse avec un dispositif de 12 géophones d'intertrace 5 m ont été exécutés par DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE juin 2001
- deux profils sismiques de longueur de 100 m ont été réalisés par l'ENHYD en décembre 2004 regroupant quatre tirs (deux tirs directs et deux tirs inverses). Ils sont matérialisés perpendiculairement aux rives de l'oued Izerzi

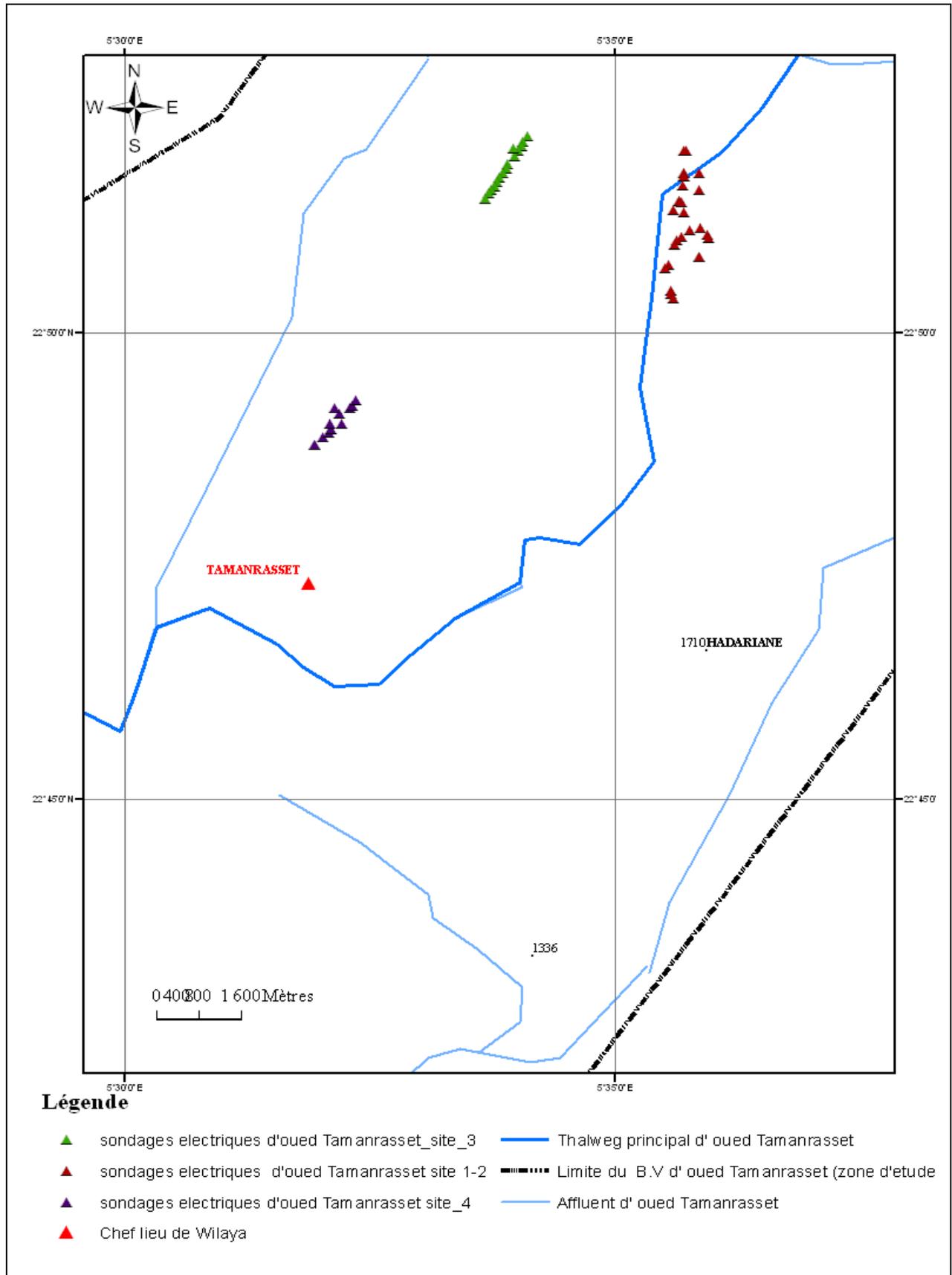


Figure I.17 : situation des sondages électriques dans l'oued Tamanrasset

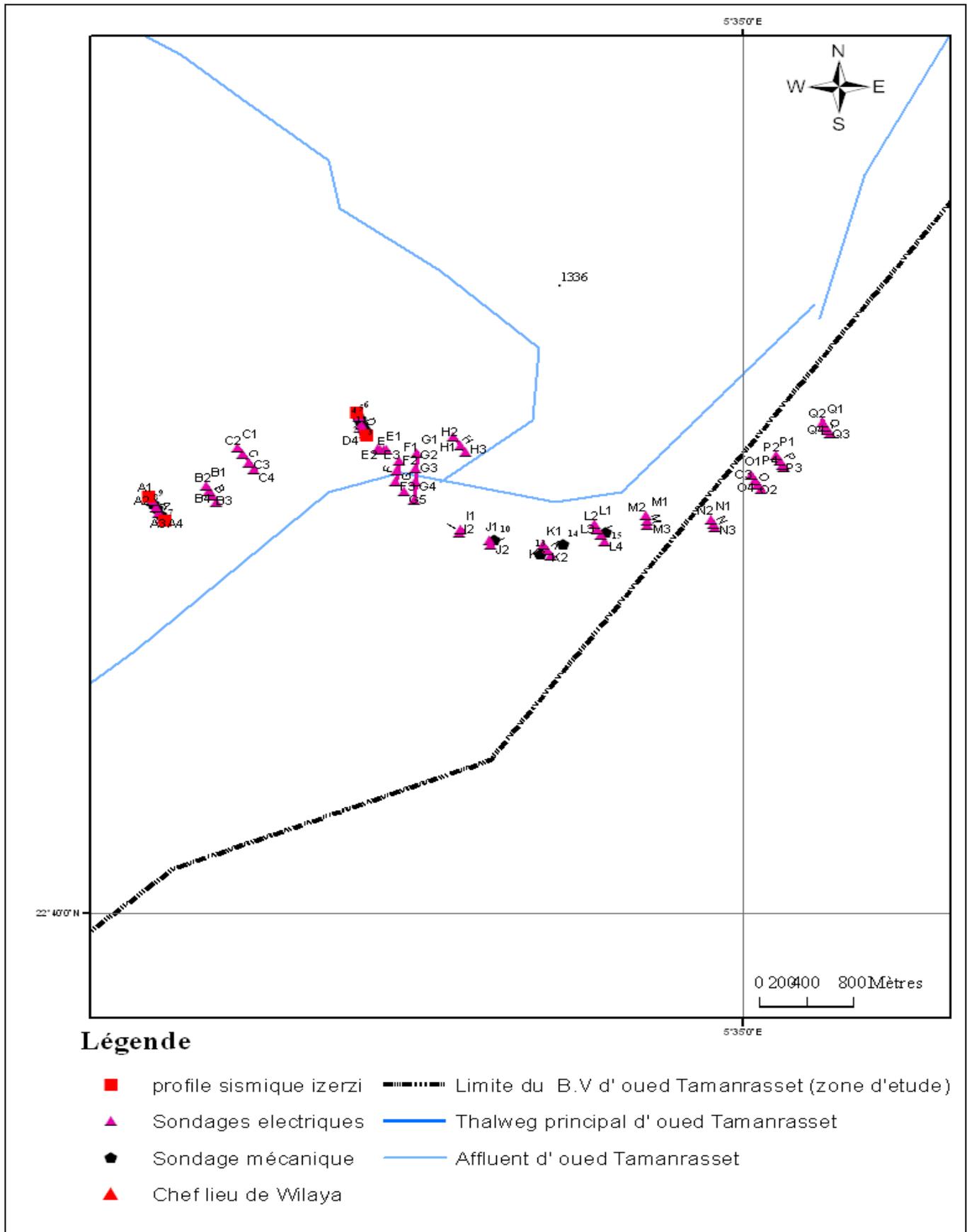


Figure I.18 : localisation des différents sondages géophysiques d'oued Izerzi

3.2/ Prospection électrique : Les deux méthodes utilisées sont les sondages électriques verticaux selon le dispositif Schlumberger pour l'investigation en profondeur et les trains électriques pour l'investigation latérale. Elle comprend au totale 125 sondages électriques.

La campagne DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE juin 2001 comporte :

- 61 sondages électriques verticaux de longueur $AB = 800$ m
- Un sondage électrique verticale d'étalonnage de longueur $AB = 800$ m au niveau de forage F13.
- De profil de trainés de résistivité par le dispositif de Wenner réalisé sur les quatre sites.

La campagne effectuée par ENHYD décembre 2004 comporte :

- 63 sondages électriques avec une ligne d'émission de courant $AB = 300$ m et $AB = 600$ m.
- Un sondage paramétrique exécuté sur les formations rocheuses du précambrien.

4/ Interprétation des données :

L'interprétation des résultats de sismique réfraction et des sondages électriques verticaux ont été corrélés aux données des forages présents dans le site d'étude.

4.1/ Interprétation des données de la sismique réfraction : (les différentes vitesses obtenues par sismique réfractations sont données en annexe D).

L'analyse de ces vitesses sismiques permet de caractériser quatre niveaux suivants :

- Niveau superficiel aéré composé essentiellement de sables limoneux, arène de gneiss de vitesse 300-500 m/s.
- Niveau sec correspondant aux alluvions sèches et au socle altéré sec d'une vitesse qui varie entre 600-1200 m/s
- Niveau formé essentiellement d'alluvions et du socle altéré humide, sa vitesse varie entre 1500 et 3500 m/s
- Substratum sain de vitesse variable (4000-6000) m/s.

4.2/ Interprétation des données des sondages électriques : (les différentes résistivités obtenues par les sondages électriques et les profils des trainés électriques sont données en annexe D).

L'examen et l'analyse des résultats des résistivités obtenus par les campagnes DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE et ENHYD mettent en évidence les difficultés d'interprétation qui peuvent être rencontrée du fait de l'équivalence des valeurs de la résistivité à savoir :

- Le socle altéré sec et les alluvions sèches peuvent avoir la même résistivité. Donc il est énormément difficile de distinguer entre eux.
- la séparation entre le socle altéré humide et les alluvions humides est délicate à cause de l'interférence des valeurs des résistivités.

Les courbes des sondages électriques définissent la succession des couches suivantes :

- **Niveau superficielle** : de résistivité supérieure à 300 Ohm .m, il est composé essentiellement des arènes de gneiss.
- **Niveau sec** : ce niveau est constitué d'alluvions et /ou de socle altéré sec. il a une résistivité assez variable.
- **Niveau conducteur** : caractérise les alluvions humides et /ou le socle altéré humide sa gamme de résistivité est assez large. Elle est comprise entre 15-60 Ohm .m. pour les alluvions humides et de 40-120 ohm. m pour le socle altéré humide.
- **Niveau résistant** : de résistivité supérieur à 700 Ohm .m caractérise le substratum sain.
- Apparition des argiles dans certains endroits, leur résistivité est de 8.6-60 Ohm .m.
- des anomalies structurales sont décelées sur la majorité des diagrammes du sondage électriques verticaux sous forme de nuage et /ou de points dispersés.

Les résultats des trainés électrique confirment ces anomalies et permettent de dégager des anomalies résistantes, qui peuvent représenter des fractures vides dans le socle sain ou la présence de formations intrusive très résistantes et d'autre anomalies plus conductrices.

5/ Les coupes géoélectriques :

Les coupes géo électrique ont été établies sur la base des données des sondages électriques. vingt coupes géo électriques ont été tracées correspondant au site (1-2), site 3, site 4 et les profils désignés par des lettres A, B, C, D, L, Q, E, K, H, et la coupe transversal(Fig. I.19).

les autre coupes sont en annexe I

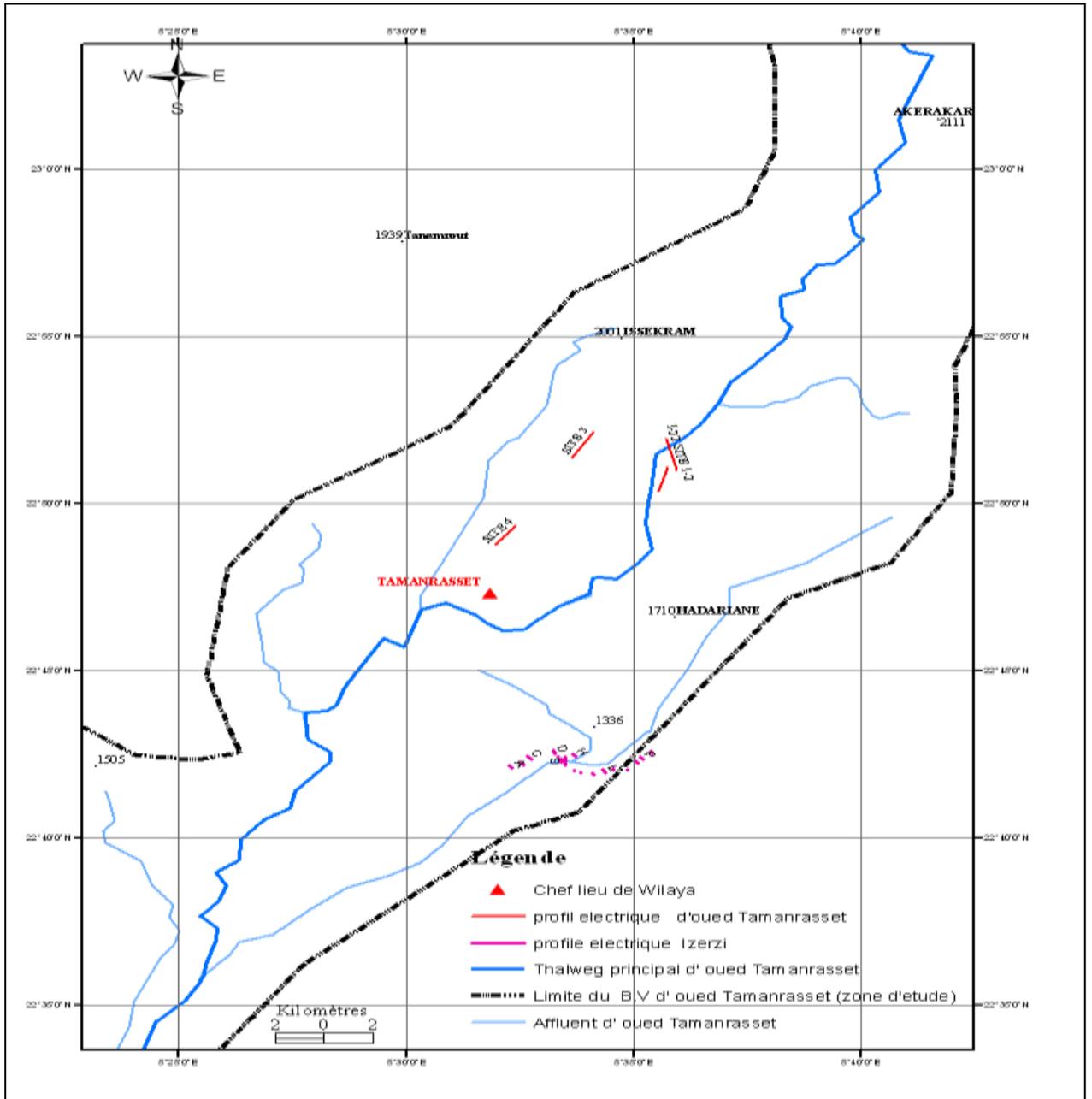


Figure I.19 : carte de situation des coupes géoélectriques

Au vu de ces coupes figure I.20, I.21 et I.22. Les principales couches rencontrées sont de bas en haut :

- Un substratum résistant essentiellement gneissique de profondeur varie entre 3 m à 60m.

L'allure générale du toit du socle est plus ou moins irrégulière du fait de l'altération.

- le socle altéré et les alluvions : montre une hétérogénéité spatiale importante de son épaisseur. Il est constitué d'alluvions humides et /ou socle altéré humide en

profondeur surmonté par des alluvions sèches et/ou socle altéré sec argileux dans certains endroits.

- une couche superficielle aérée composée essentiellement par des arènes gneissiques, du sable et limon de faible épaisseur.

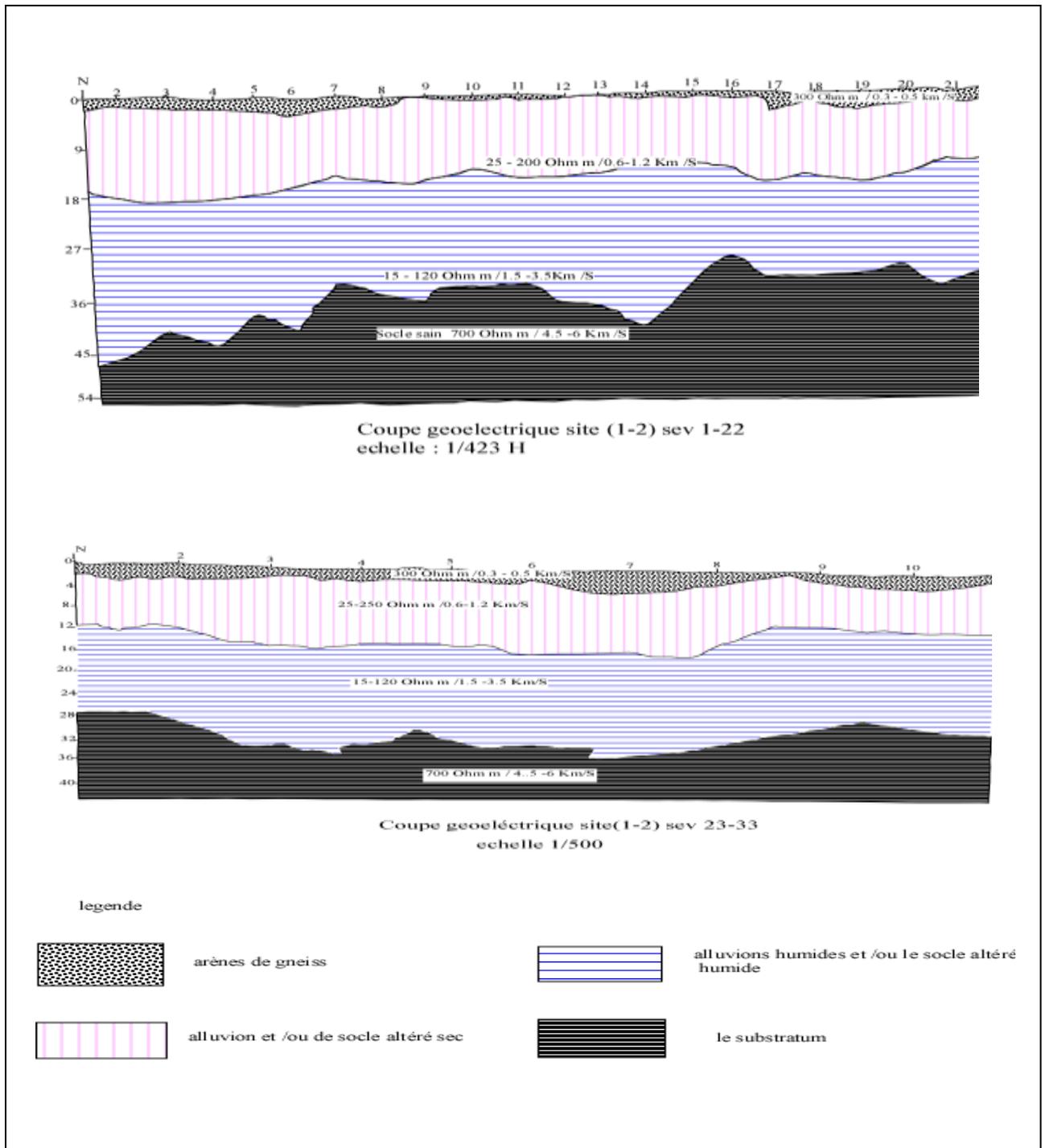


Figure I.20 : coupe géoélectrique site (1 -2) bureau d'étude DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE(2001)

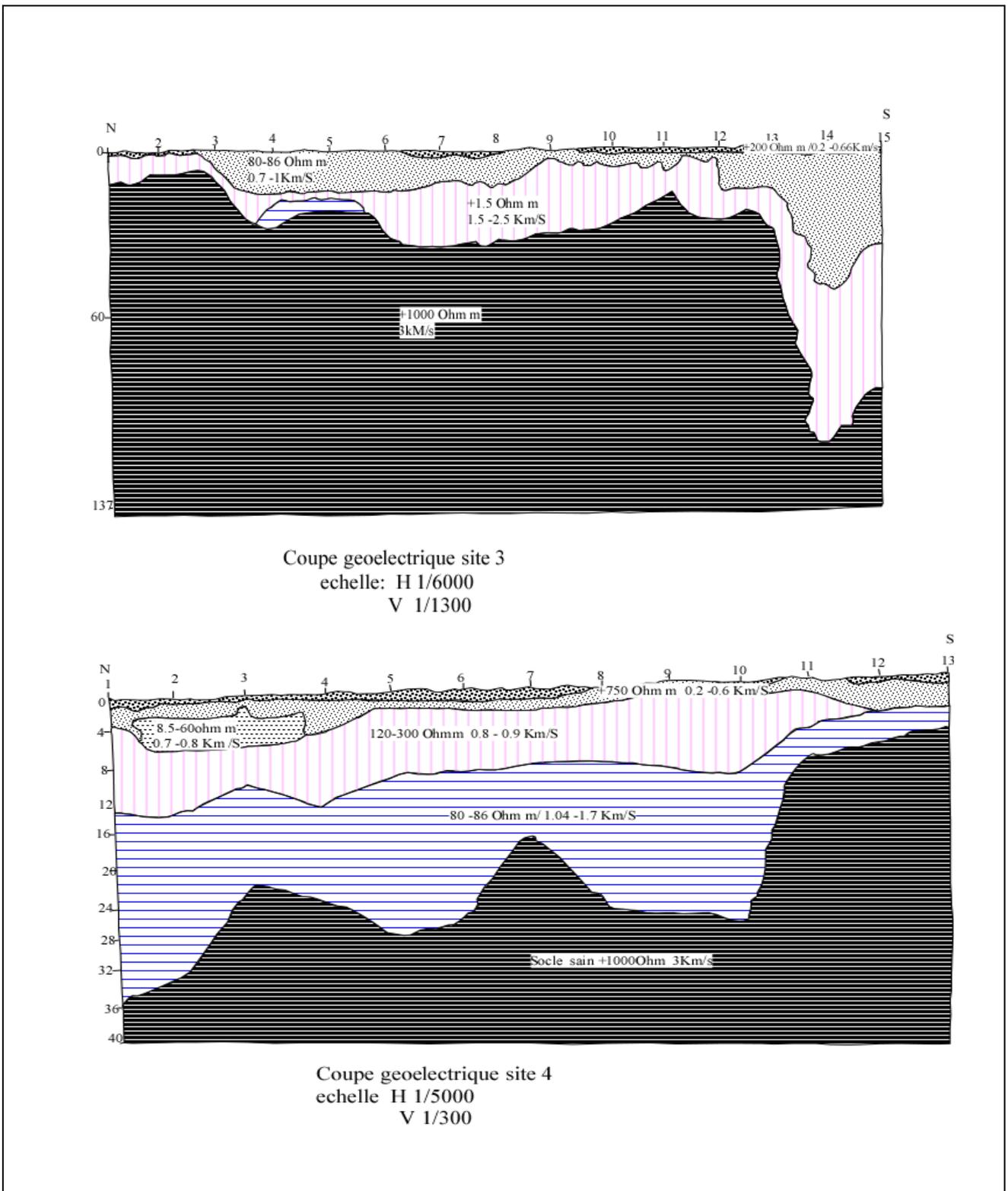


Figure I.21 : coupe géoélectrique site 3 et site 4. Bureau d'étude DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE(2001)

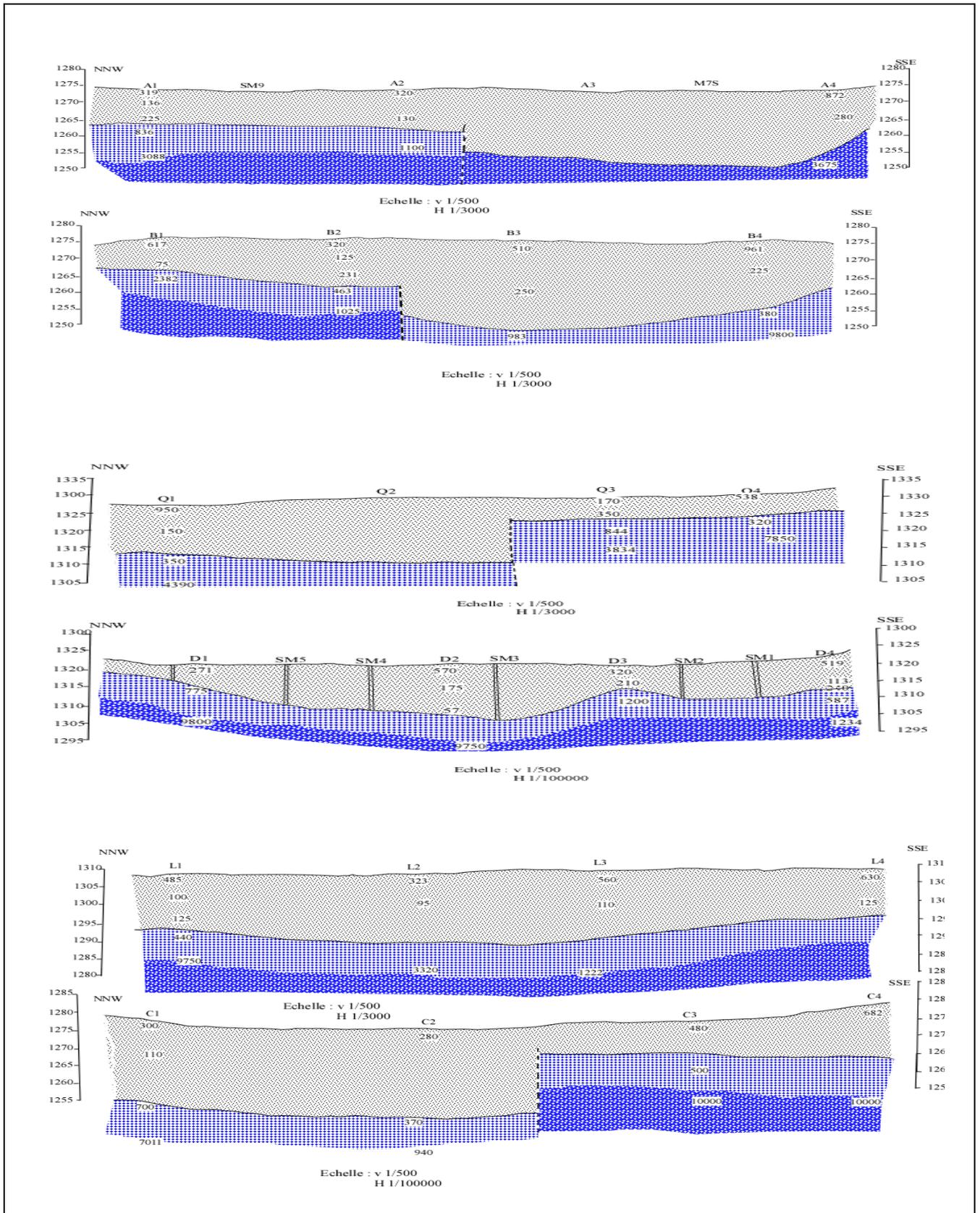


Figure I.22 : les coupes géoélectriques A, B, C, D, L, Q ENHYD (2004)

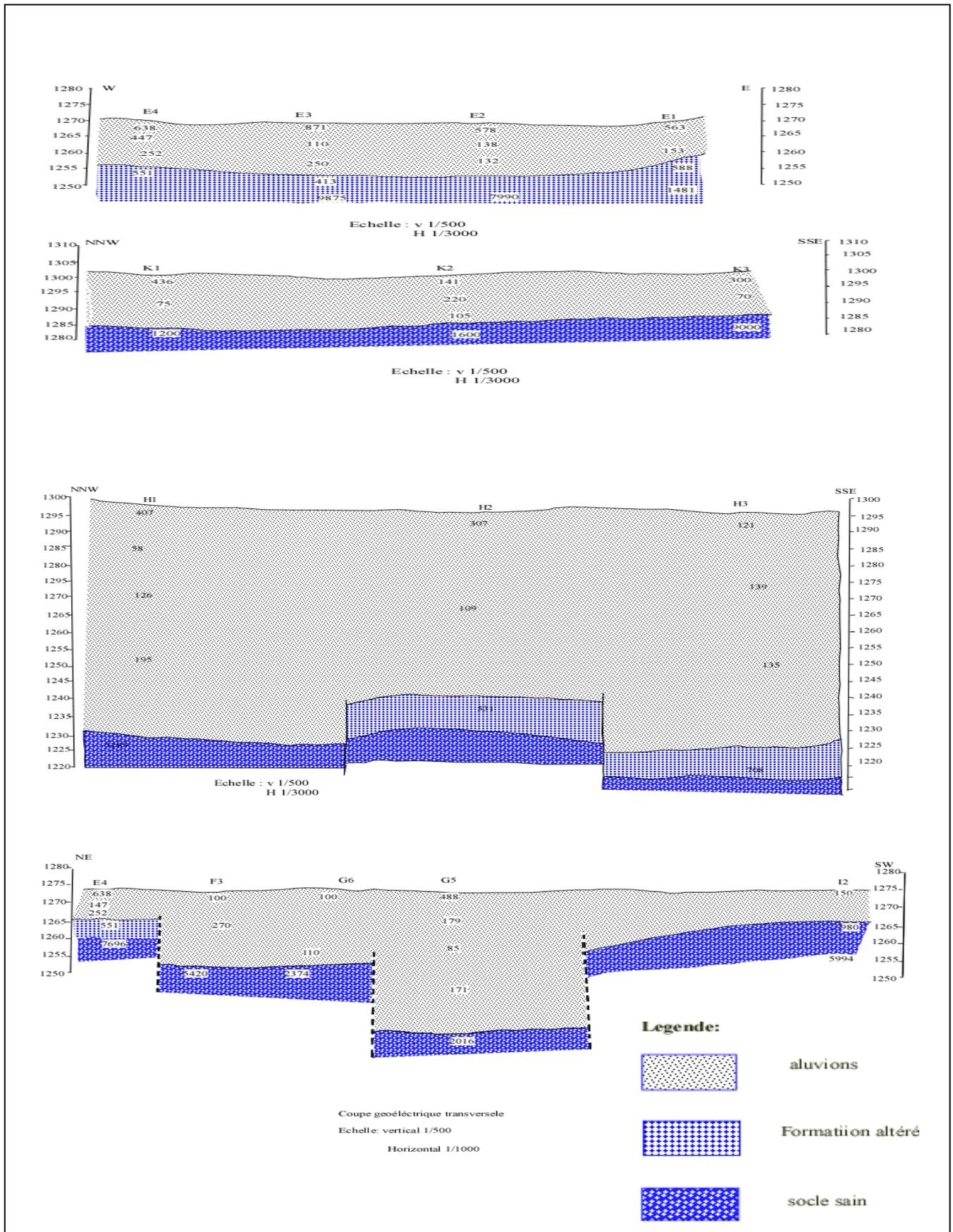


Figure I.22 : les coupes géoélectriques E K, H, et la coupe transversal ENHYD (2004)

6 / Cartes du toit de substratum :

Le toit du substratum sain est généralement peu profond sur tous les sites, dans la plus part des sondages, il ne dépasse pas 50 m.

7/ Carte de l'épaisseur de la zone altérée et fissuré :

Il est difficile de différencier le substratum altéré, des alluvions. Cependant au site quatre, la disparition des alluvions permet de déterminer l'épaisseur de niveaux altérés et fissurés.

La carte d'épaisseur du socle altéré fissuré montre une épaisseur faible varie entre 3 m et 23 m. Cette carte montre trois zones d'épaisseur : la zone situe entre 7-13m, la seconde entre 13-20m et la zone d'épaisseur relativement important de 20-23 m située au sud ouest (fig.23 a)

Au niveau du bassin versant de l'oued Tamanrasset, le manque de données géophysique à grande densité spatiale ne permet pas de déterminer l'épaisseur de la zone altéré, puis fissuré et leur répartition spatial.

A l'échelle des sites prospectés l'utilisation conjointe de la sismique réfraction et de la prospection électrique permet d'identifier les formations souterraines et les anomalies structurales rencontrées jusqu' à une profondeur inférieure à 100 m. Pourtant, ces deux méthodes se sont révélées inefficace pour distinguer entre le réservoir d'alluvions, le réservoir de la zone altérée et celui de la zone fissurée.

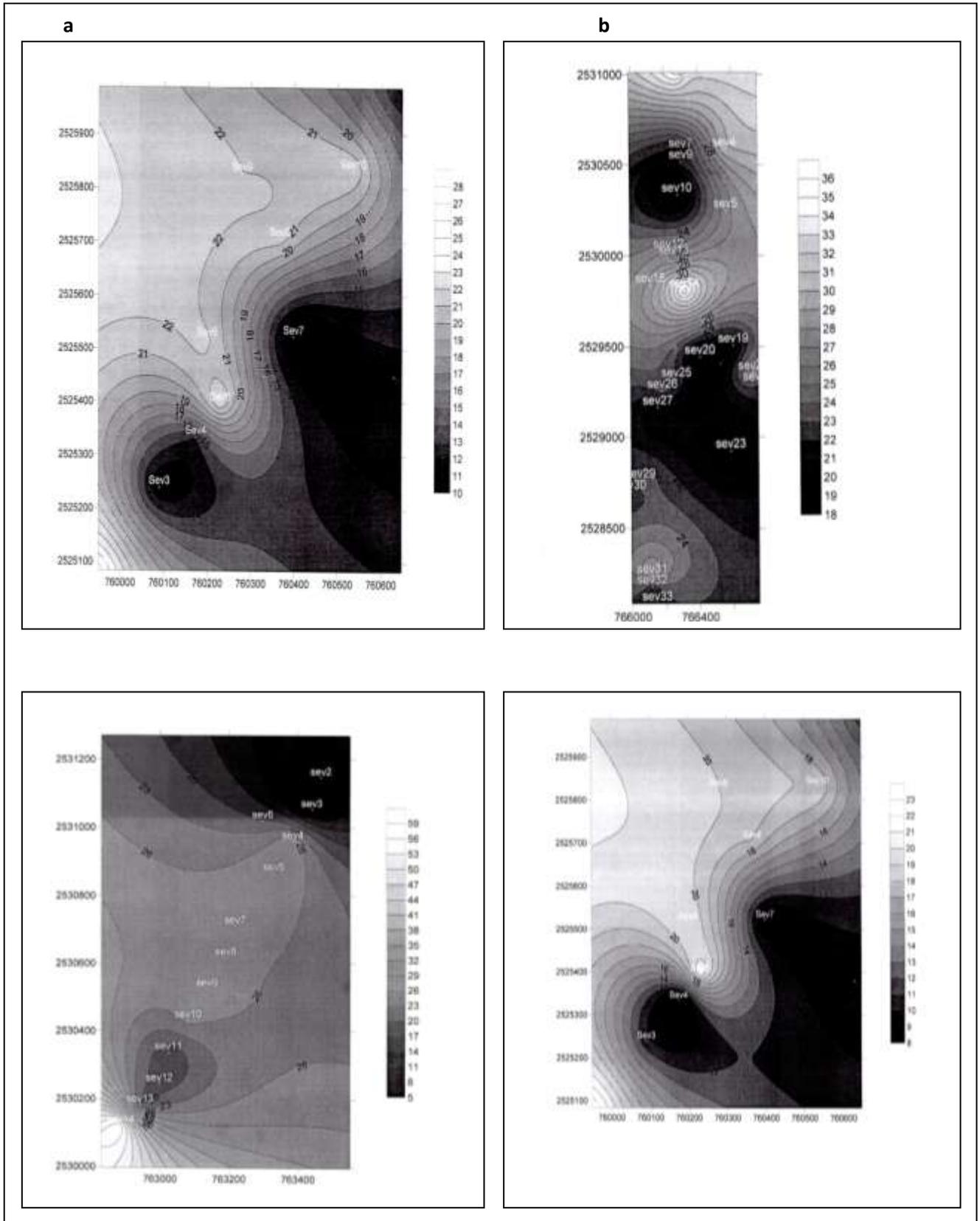


Figure I.23 : Carte du toit du substratum, **a)** carte d'épaisseur de la zone altérée site 4, **b)** carte du toit de substratum (site 1-2), **c)** carte du toit de substratum (site 3,) **d)** carte du toit de substratum (site 4).

Donc selon les coupes de forages et l'étude géophysique la structure d'aquifère de la région de Tamanrasset est constituée de la superposition de trois zones suivantes :

L'aquifère des formations meubles d'une épaisseur variable de 10 à 25 m.

L'aquifère de la zone altérée a une épaisseur moyenne oscillant entre 20 m. à 30 m

L'aquifère de socle dans la partie supérieure. Ce socle passe progressivement à la profondeur au socle sain.

8/ Conclusion :

Les résultats de prospection cités précédemment montrent que l'aquifère des gneiss est limité à la zone altérée –fissurée. L'absence de cartographie complète de fractures et la prospection géophysique qui ne recouvre pas toute la zone d'étude ne facilite pas la connaissance de la répartition spatiale de cette zone (altérée –fissurée) à l'échelle du bassin versant.

L'épaisseur des gneiss altérés –fissurés (la zone aquifère et aussi la zone non saturée) représente des grandes hétérogénéités verticales et horizontales. Cette formation aquifère est souvent recouverte par une couche alluvionnaire de faible puissance,

Les accidents tectoniques ont un rôle important au sein de ces aquifères car les forages productifs sont situés suivant les directions des fractures ou à leur proximité.

Chapitre II :
Etude
hydroclimatologique

I/ Introduction :

Ce chapitre décrit les divers paramètres qui agissent sur la recharge de l'aquifère, tel que les caractéristiques des bassins versants et les paramètres climatiques. Pour atteindre cet objectif cette partie s'articule sur les points suivants :

- La présentation des paramètres morphométriques du bassin versant d'Oued Tamanrasset.
- L'analyse des principaux éléments climatiques qui permettent de fournir certaines indications sur l'écoulement superficiel et les essais de bilan hydrique.

II/ Etude morpho métrique du bassin versant d'oued Tamanrasset :

1/description du bassin versant de l'oued Tamanrasset :

Le bassin versant d'oued Tamanrasset fait partie du grand bassin du Sahara et plus exactement du bassin de Tanezrouft (cette appellation un peu vague groupe les versants des grands oueds qui se perd dans le reg du Tanezrouft n-Ahnet (voir figure I.3).

L'oued Tamanrasset (fig. II.1) prend son origine sous le nom de **Taremmout** sur la face sud de l'Atakor dans la région de l'Askrem vers 2700m d'altitude, il est divisé en trois grands tronçons

- Un premier tronçon montagneux de 200 km suivant une direction générale orientée vers le SSW. Il représente le segment d'oued le plus important car les crues importantes se produisent dans cette partie.
- Un second tronçon de plaine encore actif de 200 km environ de long, situé à l'extrémité orientale du Tanezrouft où la vallée s'élargit et n'est plus limitée que par des berges peu marquées. Après une déviation assez brusque l'oued s'écoule centaine de km vers le NNW puis se dirige vers l'ouest où il reçoit sur sa droite trois grands affluents parfois actifs qui sont **l'Adjenet, Tinef et l'Adjelmane** (descend de l'extrémité SW de l'Ahaggar) puis l'oued **Amded** qui est l'affluent principal de l'oued Tamanrasset (l'oued Amded prend sa source dans la région du Tahat vers 2800m d'altitude sous le nom d'Ilamene, d'Afrara-nZouzdjende Tit et d'Abalessa).
- Le troisième tronçon entièrement dans le Tanezrouft est le tronçon terminal de plaine entièrement fossile. Un tel tracé donne à l'oued Tamanrasset une longueur totale de près de 800 km dont seulement 400 km sont actuellement susceptibles d'être actifs.

Notre zone d'étude est la partie amont du premier tronçon de l'oued Tamanrasset. De forme très allongée, elle s'étale sur une surface d'environ 2876 km² (la délimitation a été faite sur la carte d'état major de Tamanrasset 1/500.000).

Elle culmine au nord à 2650 m d'altitude à Tammout où l'oued prend sa source et continue son cours sur une longueur de 203km (Fig. II.2).

2/ Les caractéristiques morphométriques :

Les principales caractéristiques morphométriques d'un bassin versant ont une importance majeure car elles interviennent, et souvent de façon combinée à la modalité de recharge d'aquifère. Les caractéristiques physiques d'un bassin influencent fortement sa réponse hydrologique (écoulement superficiel et infiltration)

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencé par les facteurs morphométriques suivants (les valeurs des paramètres morphométriques sont présentées dans le tableau n° 3).

2.1/Surface :

La surface du bassin versant peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou mieux par les techniques de la digitalisation. La surface du bassin versant (zone d'étude), a été déterminée sur la carte d'état major de Tamanrasset (1/500.000) à l'aide de logiciel Global Mapper7 (voir tableau n°3)

2.2/Périmètre :

Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels. Le périmètre du bassin versant (zone d'étude), a été déterminé sur la carte d'état major de Tamanrasset (1/500.000) à l'aide de logiciel Global Mapper7 (voir tableau n°3).

2.3/ Indice de compacité de Gravelius:

L'indice de compacité (k_c) renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résulte d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à ce lui d'un cercle qui aurait la même surface. Il est exprimé par la formule suivante :

$$k_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

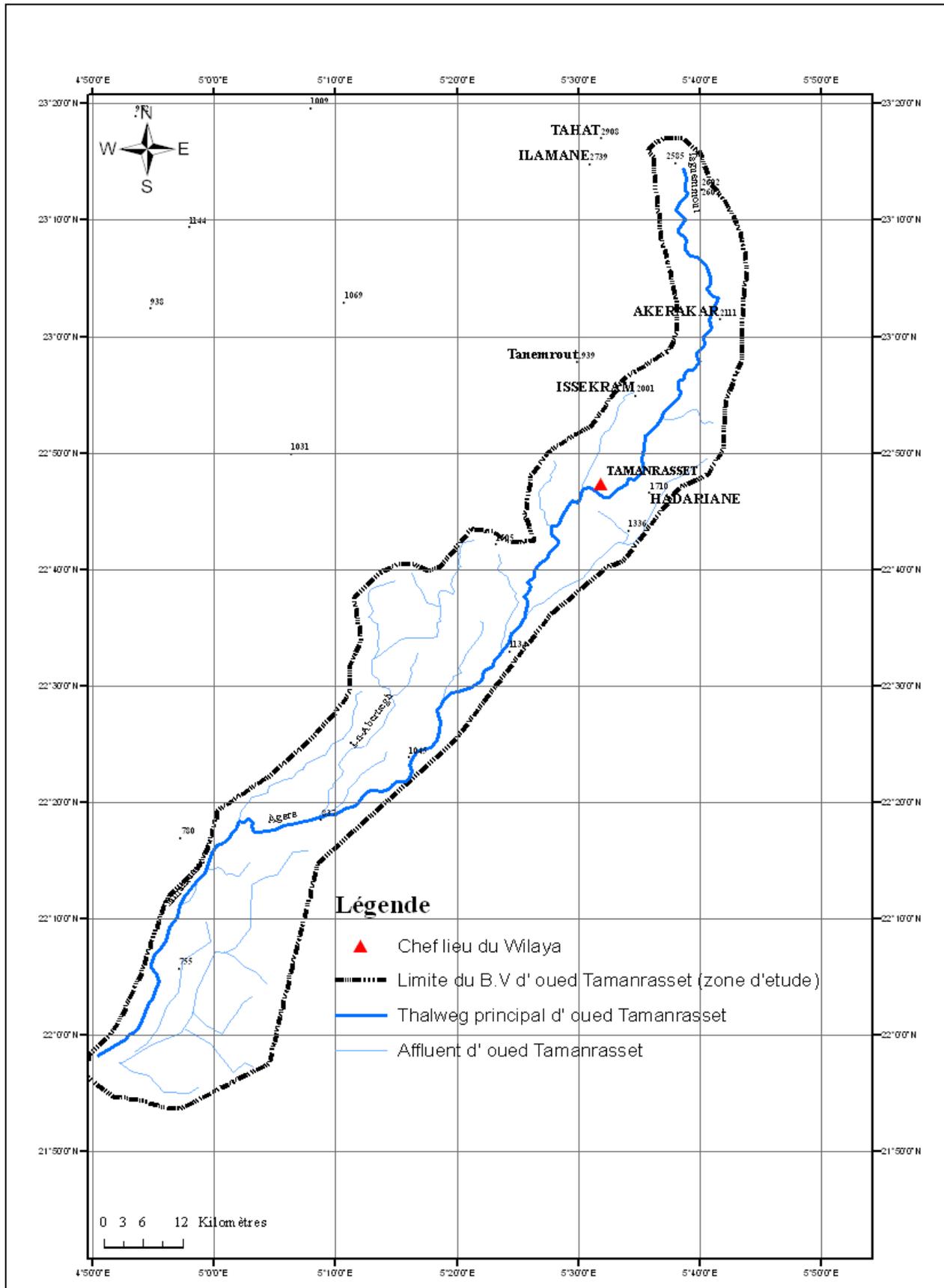


Figure II.2 : Bassin versant zone d'étude

Avec :

Kc : Indice de compacité de Gravelius

p : Périmètre en km du bassin versant

A : Superficie du bassin versant en km²

Cet indice se détermine la forme du bassin versant. Il est proche de 1 pour un bassin de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée

Pour notre bassin versant $Kc = 2.09$.

2.4/ Rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèles aux cotés du rectangle équivalent. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes (voir tableau n°3) :

La longueur L :

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left[\frac{1.12}{kc} \right]} \right]$$

La largeur l :

$$l = \frac{kc\sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left[\frac{1.12}{KC} \right]} \right]$$

Avec :

K_C : Indice de compacité de Gravelius

A : superficie de bassin versant en km²

L : longueur de rectangle équivalent en km

l : largeur de rectangle équivalent en km.

2.5/Le relief :

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement et l'infiltration des terrains. Le relief est caractérisé par la courbe hypsométrique, qui est la courbe de surface en Km² ou en pourcentage du bassin versant où les altitudes sont supérieures à une altitude **h** donnée.

La répartition du bassin versant (zone d'étude) par tranches d'altitudes est donnée dans la figure (fig.II.3) et dans le tableau suivant :

Tableau II. 1: Répartition de la surface totale en fonction de tranches d'altitudes

Classes d'altitudes (m)	Superficie (Km ²)	Pourcentage de superficie
700-900	1018	35.39
900-1100	399.55	13.89
1100-1300	473.75	16.47
1300-1500	363.64	12.64
1500-1700	206.76	7.18
1700-1900	192.80	6.70
1900-2100	68.30	2.37
2100-2300	100.60	3.49
2300-2500	45.52	1.58
2500-2700	7.08	0.24
Total	2876	100

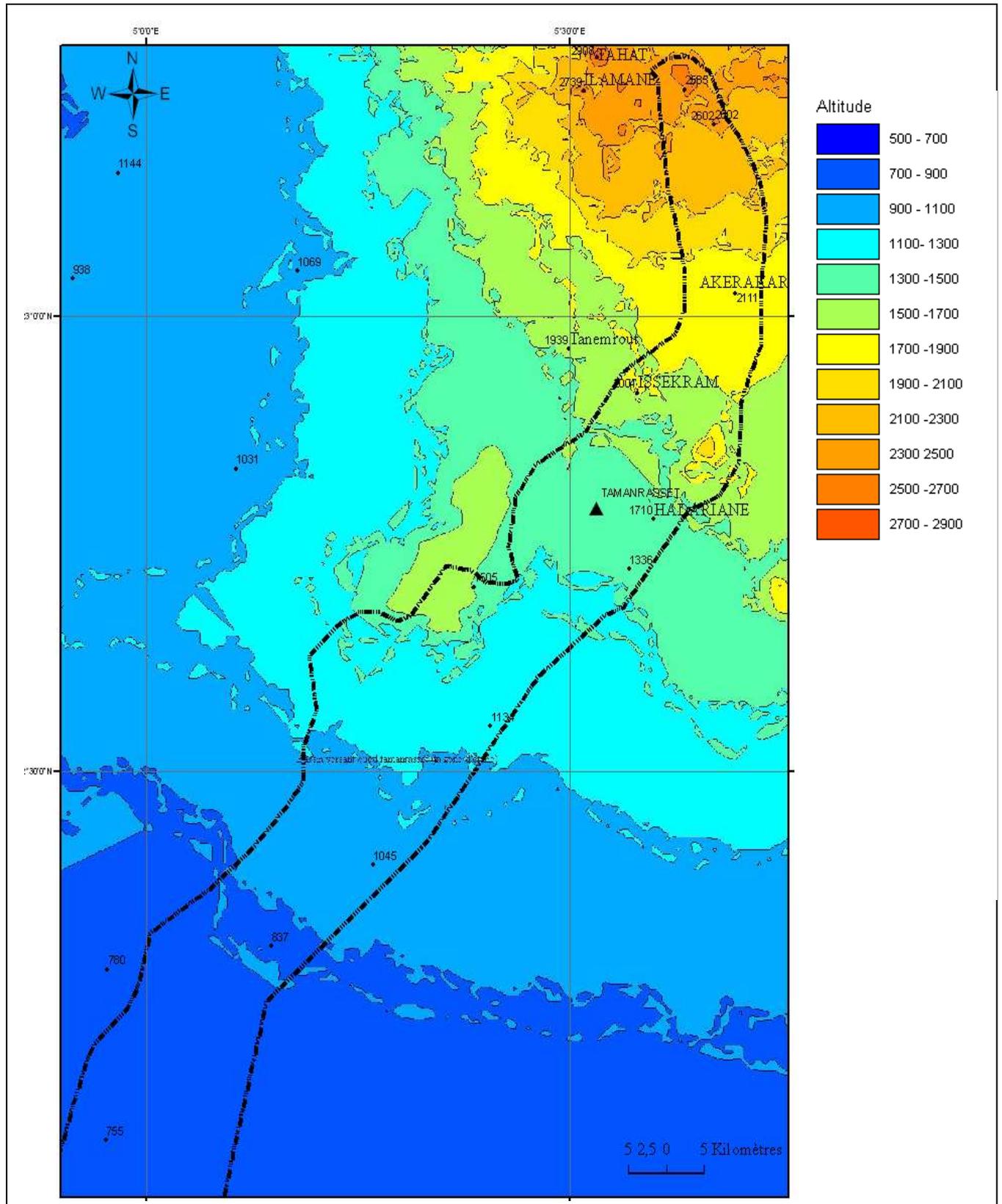


Figure II.3 : carte hypsométrique du bassin versant d'oued Tamanrasset

A partir des données de la répartition du bassin versant en tranches d'altitudes, nous avons calculé les superficies et le pourcentage de superficie supérieur à une altitude donnée.

Tableau II.2 : Superficies cumulées supérieures à une altitude donnée

Altitudes	Superficies cumulées supérieures à l'altitude (Km ²)	Pourcentage de superficies cumulées (%)
700	2876	100
900	1858	64.60
1100	1458.45	50.71
1300	984.7	34.23
1500	621.06	21.59
1700	414.3	14.40
1900	221.5	7.70
2100	153.2	5.32
2300	52.6	1.82
2500	7.08	0.24
2700	0	0

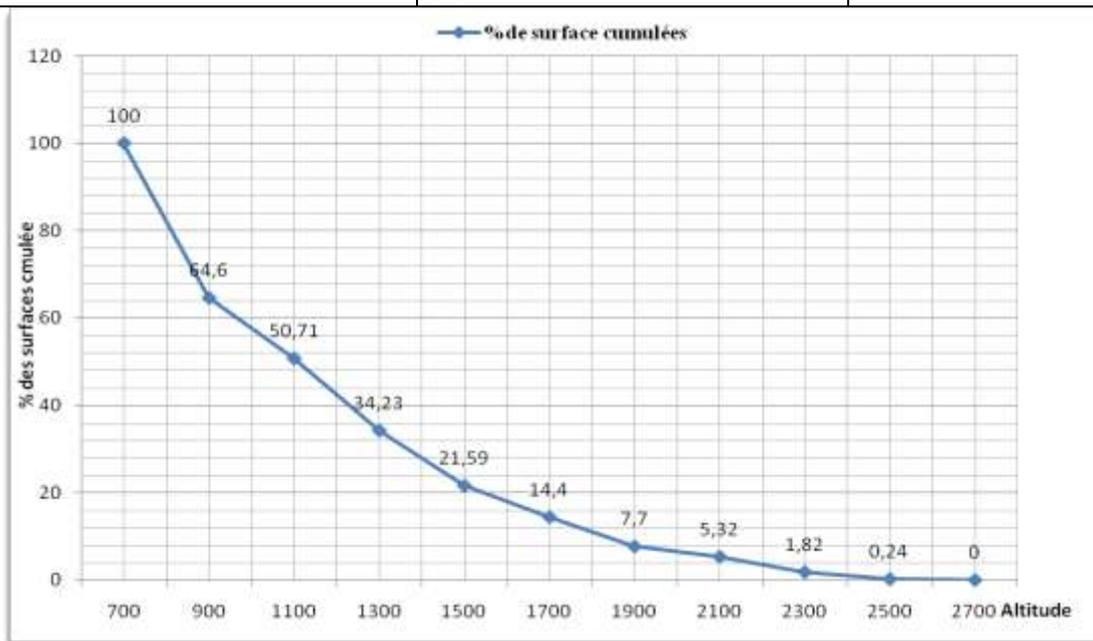


Figure II.4 : courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Tamanrasset (zone d'étude)

La courbe ci-dessus permet de définir les altitudes caractéristiques H5%, H95% qui correspondent respectivement à l'altitude de 5% et 95% de la surface du bassin versant.

L'altitude moyenne est définie comme suit :

$$H_{moy} = \frac{h_i S_i}{S}$$

Avec :

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin [m]

S_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau [km²]

$h_{i,i}$: Altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m]

S : Superficie totale du bassin versant [km²]

2.6/ Indice de pente globale : la pente globale est exprimée par la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

D : Est la dénivelée : $D = H_{5\%} - H_{95\%}$ [m]

L : Longueur de rectangle équivalent [km]

3/ Caractéristiques hydrographiques :

3.1/ Longueur du cours d'eau principal :

C'est la longueur du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux d'un bassin versant. Cette distance parcourue est exprimée en km. Elle a été déterminée à l'aide de logiciel Global Mapper7

Temps de concentration : c'est le temps que met le ruissellement d'une averse pour parvenir à l'exutoire depuis le point du bassin pour laquelle la durée parcourue est la plus longue. Il est déterminé par la formule de Giandoti

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

Avec :

T_c : temps de concentration en heures.

S : Surface du bassin versant en [km²]

L : Longueur de Thalweg principal [km].

H_{moy} : Altitude moyenne en [m].

H_{min} : Altitude minimale en [m].

Les principales caractéristiques du bassin versant d'oued Tamanrasset sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.3 : caractéristiques morphométriques du bassin versant oued Tamanrasset.

Caractéristiques du bassin versant	Valeurs
Surface du bassin versant (zone d'étude)	2876 km ²
Périmètre du bassin versant	401 km
Indice de compacité (Kc)	2.09
H 95%	720 m
H5%	2200 m
Altitude moyenne	1201.31m
Indice de pente globale	14.80m/km
Longueur du rectangle équivalent	100.05 km
Longueur du thalweg principal	203km
Temps de concentration	29.21heures

II/ Climatologie du domaine d'étude :

Le climat dans la région de l'Ahaggar est de type désertique caractérisé par des pluies rares et irrégulières et de grands écarts de température. Les écarts diurnes dépendent de l'altitude et de la saison. Un écart de 10°C est noté en été à Tamanrasset contre 7°C à l'Asskrem, alors qu'en hiver, il atteint 15°C à Tamanrasset et seulement 6.5°C à l'Asskrem (O.SAIGHI).

Le total des précipitations annuelles est très variable d'une année à l'autre. On a parfois de longues périodes de sécheresse qui dépassent souvent trois années consécutives, le maximum de pluviosité est généralement enregistré pendant les mois chauds.

Le réseau de mesure dans le Hoggar est caractérisé par peu de stations avec une courte période d'enregistrement à l'exception de la station de Tamanrasset et Askrem.

Cette étude est basée sur les données des stations de Tamanrasset, Askrem et Tit qui se situent à l'intérieur de la zone d'étude ou à proximité de leur limite (les coordonnées des stations et leur période d'enregistrement sont consignées dans le tableau et la figure ci-après :

Tableau II.4 : coordonnées des stations pluviométriques.

station	X	Y	Z (m)	periode d'enrigestrement
Tamanrasset	22°47'N	5°31' E	1362	1985-2006
Asskrem	23°16' N	5°38' E	2710	1985-2006
Tit	22°58'N	5°14' E	1137	1995 -2006

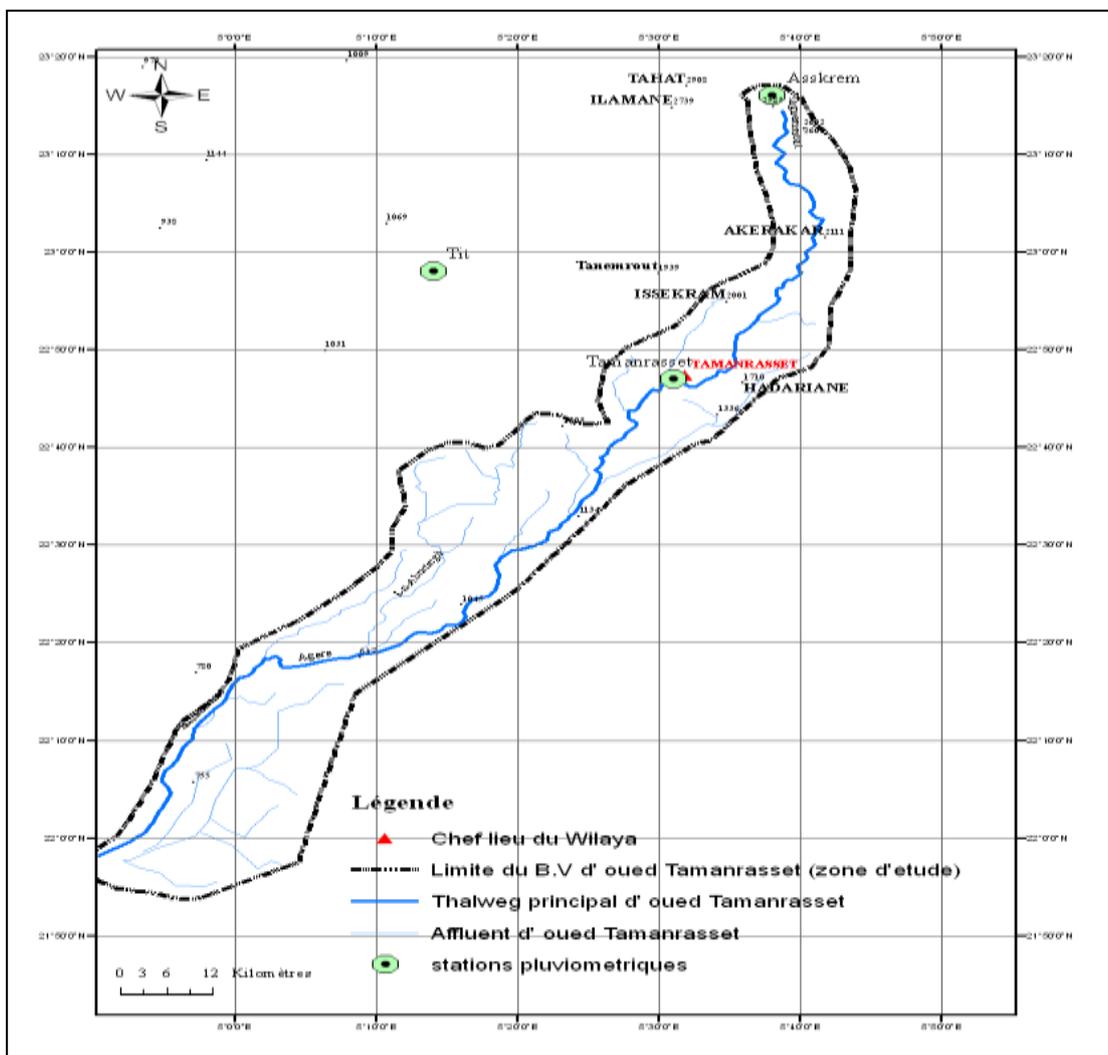


Figure II.5 : localisation des stations pluviométriques

1/Température :

Les valeurs moyennes mensuelles enregistrées dans les trois stations pendant le période 1985-2006 sont données dans le tableau suivant :

Tableau II.5: Températures moyennes mensuelles

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	moy
Tamanrasset	12,84	15,02	18,85	23,6	27,41	29,81	29,89	29,23	27,71	23,51	18,04	14,19	22.50
Askrem	6,57	7,63	10,45	14,6	17,82	19,73	20	19,33	17,94	14,43	10,51	7,868	13.90
Tit	14,07	16,21	20,57	25,47	29,64	31,38	32,17	31,41	29,96	25,53	19,67	15,89	24.33

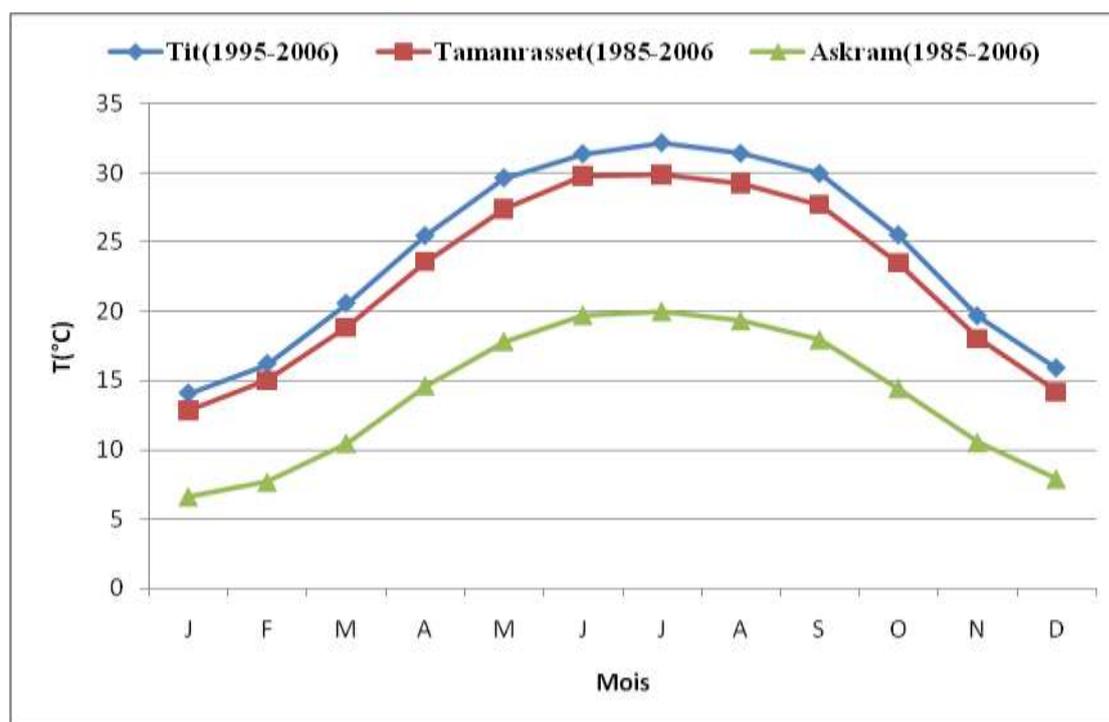


Figure II .6: Températures moyennes mensuelles

L'examen de la figure II.6 montre que les températures moyennes mensuelles diffèrent légèrement entre la station de Tamanrasset et Tit malgré la série d'enregistrement courte pour la station de Tit. L'Askrem a enregistré les températures les plus faibles.

L'écart de température entre l'été (juillet) et l'hiver (janvier) est d'environ de 17.47°C à Tit, 17.05°C à Tamanrasset et de 13.43°C à Askrem.

2/ Ensoleillement : Les valeurs moyennes mensuelles de la durée d'ensoleillement observées dans la station de Tamanrasset sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II.6 : ensoleillement mensuel moyen (heures) de station Tamanrasset (1975-2002).

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
283	282	296	299	286	251	306	278	247	276	282	275	3362

L'analyse de ce tableau met en valeur l'importance de l'insolation dans cette zone (3362 heures/an soit 9.2 heures /jour).

3/ Humidité relative :

C'est un élément important du cycle hydrologique qui contrôle l'évaporation du sol et la couverture végétale et qui représente le degré de saturation de l'air en vapeur d'eau.

Tableau II.7 : humidité mensuelle moyenne (%) (1975-2002) (station de Tamanrasset)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	moy
24	20	18	16	15	16	16	20	20	24	23	25	20

La moyenne annuelle de la région est de 20%. Les valeurs maximales sont atteintes en octobre, novembre, décembre et janvier (23 à 25%) et minimales en avril, mai ; juin, juillet (15 à 16%).

4/ Pluviométrie :

La pluie constitue le seul terme d'apport d'eau à Tamanrasset qui permet l'alimentation des nappes d'eau souterraine. L'étude de leurs distributions annuelles, mensuelles et particulièrement journalières est primordiale pour l'estimation du ruissellement et l'infiltration.

4.1/ Pluie moyenne annuelle :

La distribution des pluies annuelles observées dans les trois stations est illustrée dans la figure II.7.

A l'échelle annuelle, les valeurs pluviométriques enregistrées dans les trois stations sont caractérisées par une importante irrégularité inter-annuelle et montrent une alternance de deux ou trois années sèches suivies par une année humide dont les valeurs des précipitations peuvent atteindre le double de la valeur moyenne.

Les moyennes annuelles des précipitations excèdent 100 mm dans les zones de plus de 2500m d'altitude et 50 mm seulement au pied des massifs de Tamanrasset (1376 m d'altitude).

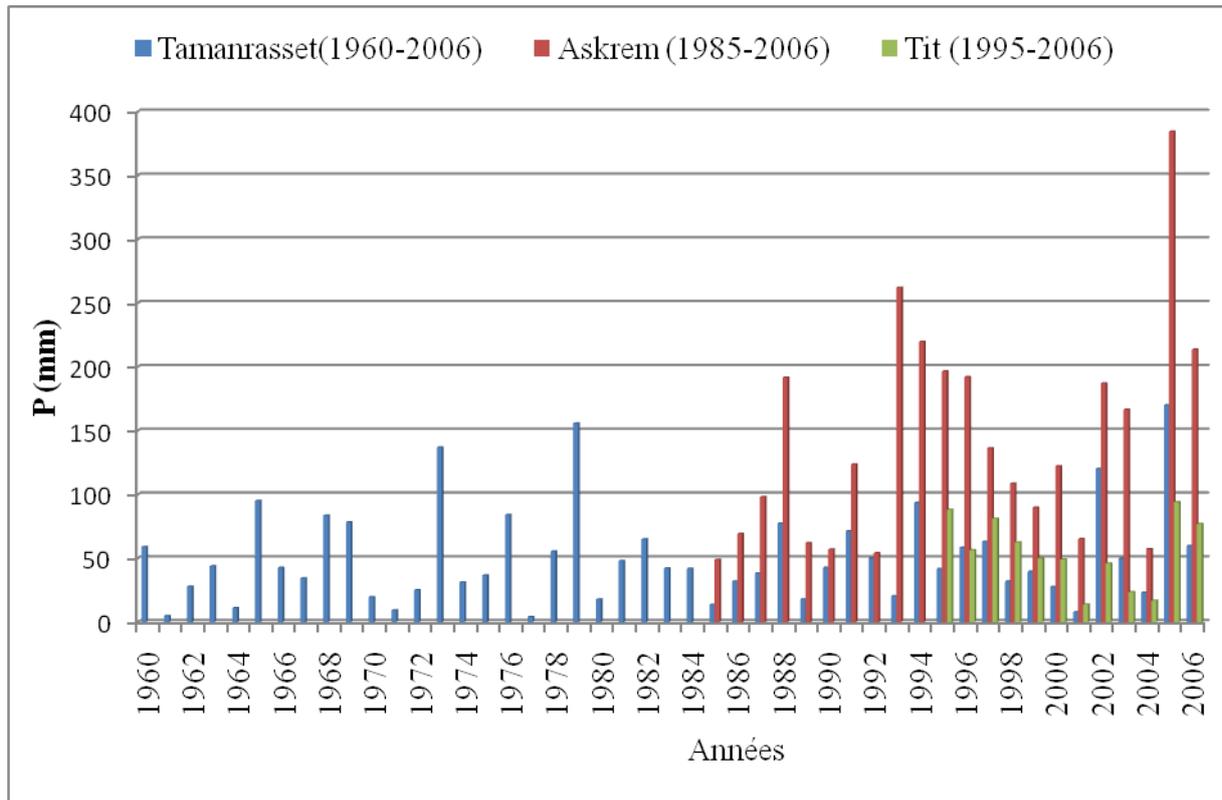


Figure II.7 : variation des pluies annuelles dans les trois stations.

4.2/ Pluies mensuelles :

A l'échelle mensuelle, elles sont très inégalement réparties dans l'espace et dans le temps. Dans l'espace on note une augmentation en fonction de l'altitude. Dans le temps la période des pluies marquée par de valeurs des précipitations les plus élevées s'étale entre juin à octobre (tableau II.8 et figure II.8).

Tableau II.8 : variations moyennes mensuelles des précipitations aux trois stations.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	moy
Tit	0,72	1,28	7,42	2,38	1,32	8,15	3,25	15,28	8,317	5,133	0,97	0,68	54.9
Tamanrasset	1,53	1,07	6,3	1,18	2,71	7,04	6,91	8,25	5,02	8,56	0,9	0,64	50.12
Askrem	3,75	1,8	15	2,72	4,91	10,98	10,5	24,77	18,81	11,05	8,96	2	115.25

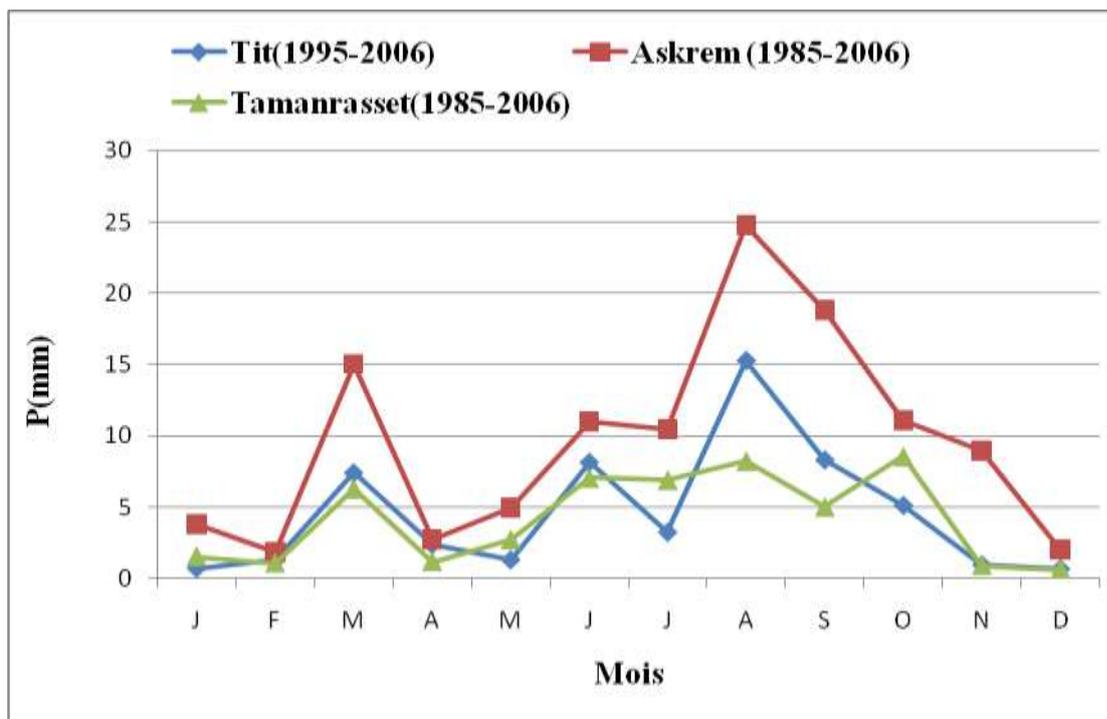


Figure II .8 : variations moyennes mensuelles des précipitations aux trois stations

D'une manière générale les pluies moyennes mensuelles sont peu significatives car les pluies tombent très irrégulièrement dans le temps sous forme d'averse d'intensités et de durées extrêmement variables.

4.3/ Les pluies journalières :

L'analyse au pas de temps journalier des données de la série pluviométrique enregistrée à la station de Tamanrasset a montré que les pluies journalières maximales sont caractérisés par de grandes hétérogénéités dans la hauteur et se produisent durant la période allant de mai jusqu'à septembre et particulièrement au mois de juillet et aout avec des hauteurs de précipitations importantes comme le montre les deux tableaux suivants :

Tableau II.9 : fréquence des mois des pluies 1960-2002 de la station Tamanrasset

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
période (1960-2002)	0	0	3	0	5	5	9	9	8	3	0	1	43
%	0	0	7	0	12	12	21	21	19	7	0	2	100

Tableau II.10 : pluies journalières maximales observées à la station de Tamanrasset (1960-2002).

Années	P _J max (mm)	Années	P _J max (mm)	Années	P _J max (mm)
1960	15,5	1975	15,5	1991	12,3
1961	1,7	1976	19,4	1992	12,7
1962	10,7	1977	1,8	1993	12,8
1963	20,5	1978	17,5	1994	33,2
1964	3,4	1979	40,1	1995	20
1965	24,5	1980	4,8	1996	14
1966	17,3	1981	24,5	1997	14
1967	19,4	1982	19,2	1998	11
1968	15,7	1984	22,5	1999	13
1969	25,8	1985	7,5	2000	8
1970	7,2	1986	12,9	2001	3
1971	2,6	1987	13,6	2002	36
1972	3,3	1988	41,3	moyenne	16
1973	34,5	1989	5,5	ecar-type	10,22
1974	14,1	1990	26	variance	

5/ Régime climatique :

A partir de l'indice de l'aridité de MARTONNE (1923) on peut définir le régime climatique.

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

Avec :

P : précipitations moyennes annuelles (mm)

T : température moyennes annuelles (°C)

Pour A < 5 : climat hyperaride

5 < A < 7,5 : climat désertique

7,5 < A < 10 : climat steppique

10 < A < 20 : climat semi aride

20 < A < 30 : climat tempéré.

Pour les trois stations l'indice de l'aridité est de 1.53 à Tamanrasset, 1.59 à Tit et 4.82 à Asskrem. Ce qui donne un climat hyperaride (fig. II.9)

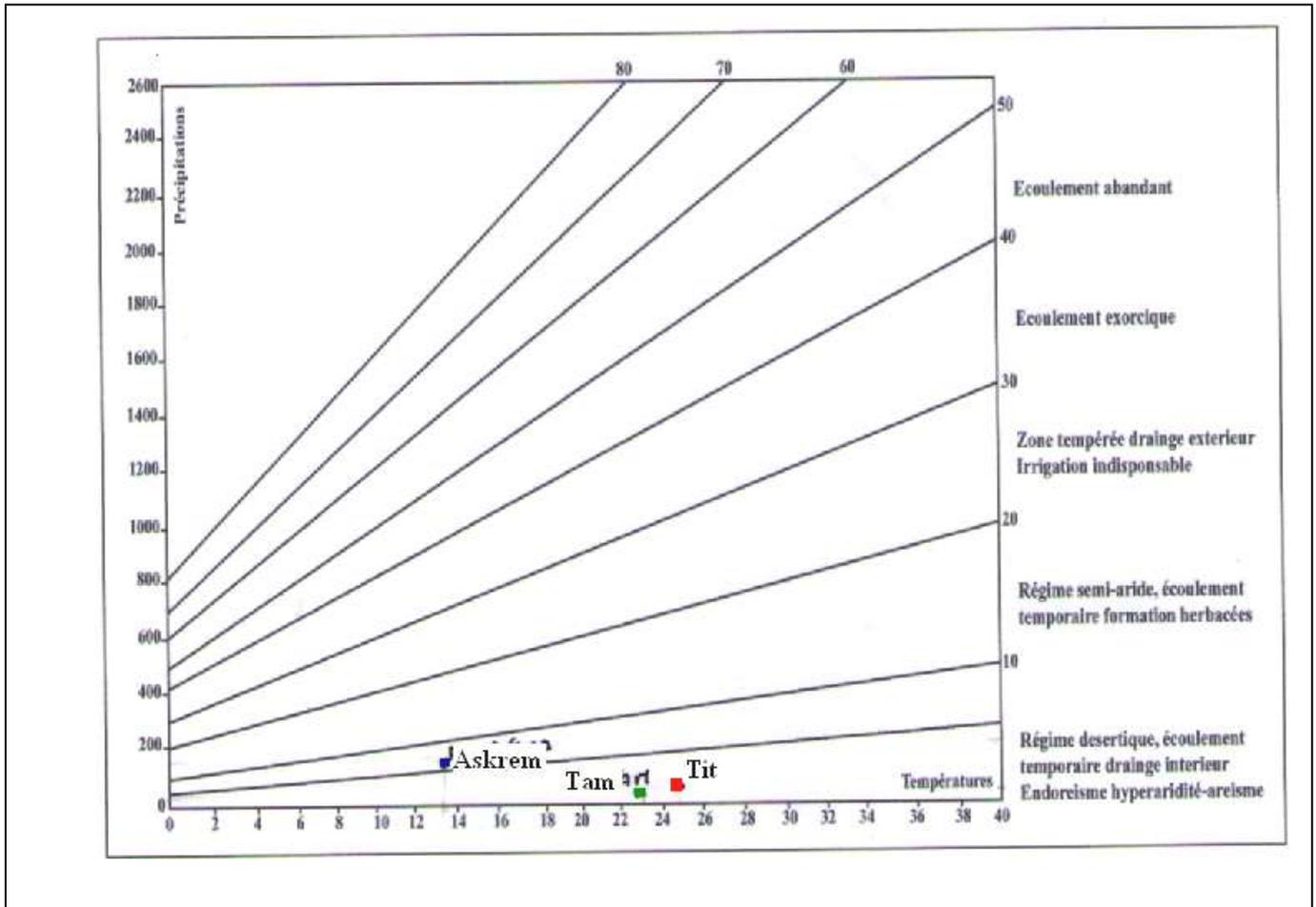


Figure II.9 : indice d'aridité des stations

6/ Répartition statistique des pluies journalières maximales :

Tableau II.11 : Répartition statistique des pluies journalières maximales

Valeur	Rang	Fréquence	Valeur	Rang	Fréquence
1,7	1	0,01162791	14,1	23	0,52325581
1,8	2	0,03488372	15,5	24	0,54651163
2,6	3	0,05813953	15,5	25	0,56976744
3	4	0,08139535	15,7	26	0,59302326
3,3	5	0,10465116	17,3	27	0,61627907
3,4	6	0,12790698	17,5	28	0,63953488
4,8	7	0,15116279	19,2	29	0,6627907
5,5	8	0,1744186	19,4	30	0,68604651

7,2	9	0,19767442	19,4	31	0,70930233
7,5	10	0,22093023	20	32	0,73255814
8	11	0,24418605	20,5	33	0,75581395
10,6	12	0,26744186	22,5	34	0,77906977
10,7	13	0,29069767	24,5	35	0,80232558
11	14	0,31395349	24,5	36	0,8255814
12,3	15	0,3372093	25,8	37	0,84883721
12,7	16	0,36046512	26	38	0,87209302
12,8	17	0,38372093	33,2	39	0,89534884
12,9	18	0,40697674	34,5	40	0,91860465
13	19	0,43023256	36	41	0,94186047
13,6	20	0,45348837	40,1	42	0,96511628
14	21	0,47674419	41,3	43	0,98837209
14	22	0,5			

L'ajustement des pluies journalières maximales par la loi du Gumbel permet l'estimation des pluies journalières maximales à différentes fréquences (décennale et centennale).

L'équation qui représente la loi de Gumbel est

$$:x = \frac{1}{\alpha}y + x_0$$

Avec :

y : Variable réduite de Gumbel

α, x_0 : coefficients d'ajustement

$$x_0 = \overline{P}_{jmax} - 0.577/\alpha$$

$$\frac{1}{\alpha} = 0.780 \delta$$

$$x = 7.98 y + 11.40$$

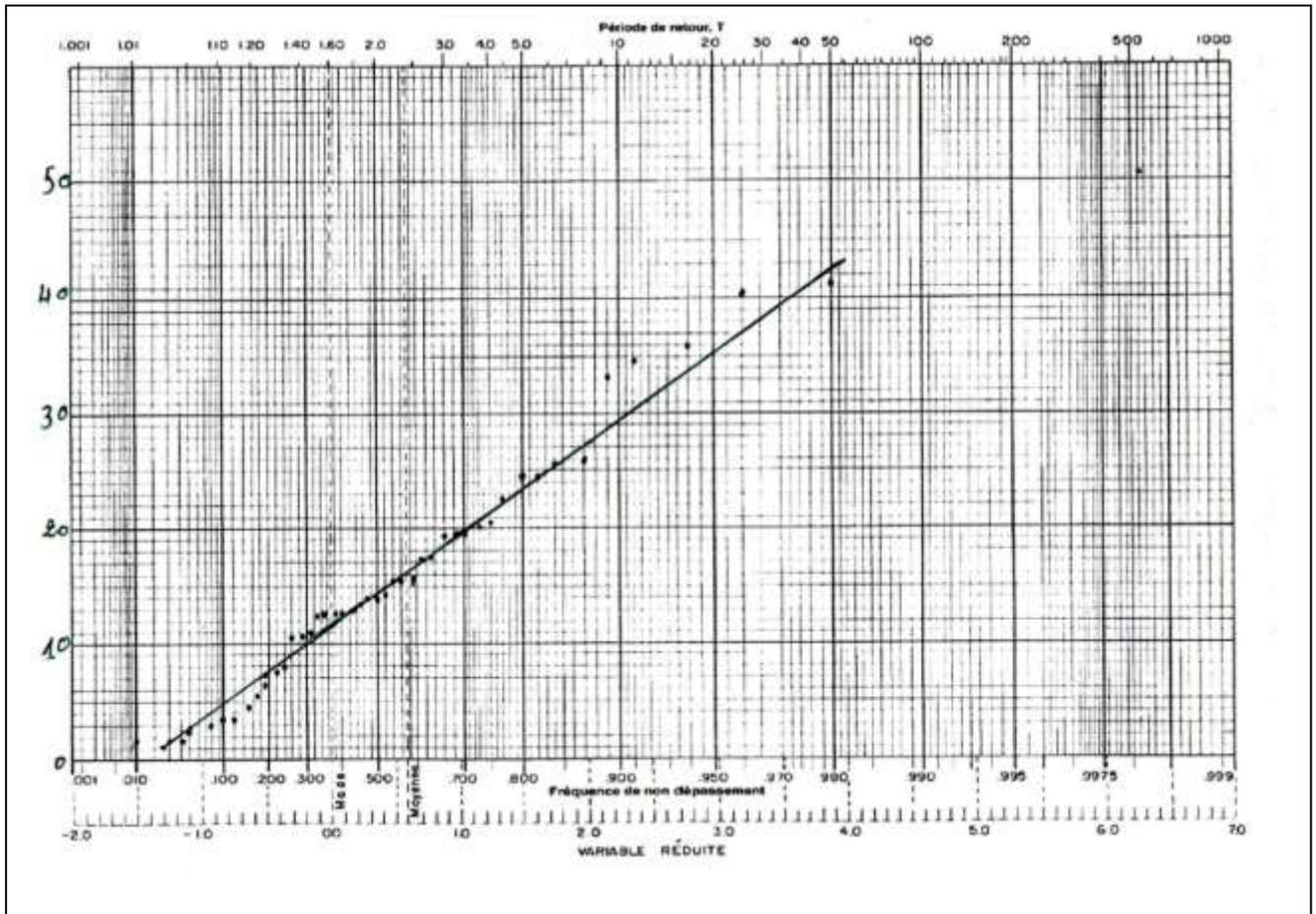


Figure II.10 : Ajustement de la loi de Gumbel à l'échantillon des $P_{J\max}$ observés à Tamanrasset.

Les précipitations journalières maximales de durée T_C sont calculées par la formule suivante :

$$P(T_C) = P_j \left[\frac{T_C}{24} \right]^b$$

b : exposante climatique = 0.14 pour la station de Tamanrasset selon BODY.

Les pluies maximales de 24 heures fréquentielles et les pluies de durée de temps de concentration ainsi que les intensités maximale correspondante au bassin de l'oued Tamanrasset sont données au tableau suivant :

Tableau II.12 : pluies journaliers maximales, pluies fréquentielles de temps égale au temps de concentration et les intensités correspondantes aux différentes périodes de retour.

Fréquence au non dépassement %	Temps de Retour an	Pluie journalier maximale mm	Pluie fréquentielle de durée égale au temps de concentration mm	Intensité maximale de dure égale au temps de Concentration mm/heures
50	2	14.3	13.9	0.48
80	5	23.3	22.6	0.79
90	10	29.4	30.21	1
95	20	35.1	36.07	1.2
98	50	42.5	43.68	1.4
99	100	48.1	49.44	1.6
99.9	1000	66.5	68.35	2.2

7/L évaporation et Evapotranspiration :

La connaissance de l'évaporation est importante dans l'étude du bilan hydrique car elle constitue l'un des mécanismes de la perte des eaux.

7.1/ Evapotranspiration potentielle :

Quantité maximal d'eau susceptible d'être évaporée sous un climat donné par un couvert végétal continue bien alimenté en eau. Elle correspond donc a l'évaporation du sol et a la transpiration des végétaux d'une région donnée pendant le temps .elle s'exprime en hauteur d'eau.

ETP a été calculée pour la période 1995-2006 par la méthode de Turc. Qui convient aux régions à climat aride.

$$ETP = 0.40 \frac{(I_g + 50)t}{t + 15}$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

I_g : Radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale (quelques calories/cm²/jour).

t : Température moyenne mensuelle du mois considéré (°C).

L'humidité relative mensuelle de l'atmosphère est inférieur à 50%, on multiple

l'ETP calculée par le facteur correctif suivant $(1 + \frac{50-Hr}{70})$ Où : Hr est l'humidité relative moyenne de l'air pendant le mois considéré (%).

Tableau II.13 : évaporation moyenne mensuelle calculée par la méthode de Turc

mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ig calorie/ cm ² /j	42057,4 163	50980,8 612	58588, 5167	63062 ,201	62488 ,0383	61148 ,3254	65478 ,4689	59258 ,3732	54784 ,689	49401 ,9139	43947 ,3684	38636 ,3636
h	1.37	1.39	1.45	1.49	1.49	1.45	1.48	1.39	1.38	1.34	1.36	1.36
T	13,22	14,95	19,09	24,34	27,89	29,49	30,02	29,44	28,09	23,08	18,13	14,61
ETP	10877 .33	14177 .4	19045. 3	23294 .96	24283 .70	23643 .62	25942 .55	21939 .93	19793 .21	16167 .98	13125 .42	10384 .09

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle calculées sont très élevées par rapport aux précipitations. Elles reflètent le type de climat de Tamanrasset (climat hyperaride).

8/ Evaporation :

Les valeurs moyennes mensuelles mesurées sous abri à l'évaporimètre Piche de Tamanrasset (1975-2002) sont données dans le tableau suivant :

Tableau II.14 : évaporation moyenne mensuelle (sous abri) station Tamanrasset

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
258	278	386	464	541	526	562	523	448	381	291	250	4911

De même ces valeurs sont très fortes, et les valeurs les plus élevées sont enregistrées pendant la période de la pluie (de mai jusqu'à août).

9/ Bilan hydrologique :

L'expression générale de bilan hydrique est : $P = R + I + ETR$, Avec :
 P : précipitation moyennes annuelles en mm, I : infiltration moyenne annuelles en mm,
 R : ruissèlement moyen annuel en mm, ETR : évapotranspiration réel moyenne.

A partir de l'expression du bilan hydrologique, Il est bien évident qu'il n'y aura ni ruissellement ni infiltration à l'échelle annuelle ni mensuelle.

Du fait que les précipitations de la région de Tamanrasset se tombent sous forme d'averse d'intensité et de durée variable. Elles peuvent donner lieu à un ruissellement important dans des oueds secs résultant d'une crue de courte durée (d'un jour à quelques jours). Qui ne peut pas être négligée ni en fréquence ni en quantité.

9.1/ Estimation du ruissèlement :

Au Sahara, et particulièrement dans la région de Tamanrasset les mesures des débits de crues sont inexistantes. Tous ce que l'on peut faire c'est 'estimé la lame d'eau ruisselée.

La méthode d'estimation de lame ruissellée a été adoptée par Jean Dubief dans son étude « essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara ».

Un résultat sensiblement analogue a été obtenu en Egypte où l'estimation de la quantité de précipitation capable de ruisseller est donnée par la formule suivante :

$$Lr = 0.75 (P-8) \quad I < 30 \text{ mm / heures (1)}$$

$$Lr = P \quad I \geq 30 \text{ mm / heures (2)}$$

Avec:

Lr : lame ruisselé en mm,

P : pluie journalière maximale (mm)

I : Intensité maximale (mm /heures)

Si on considère que la durée de l'averse correspond au temps de concentration du bassin versant de l'oued Tamanrasset.

On constate que l'intensité maximale est toujours inférieure à 30 mm/heures, d'où le ruissellement sera calculé par la formule (1).

La lame d'eau ruissellée de la série étudiée et pour les différentes périodes de retour sont présentées dans le tableau ci dessous :

Tableau II.15 : la lame d'eau ruisselée pour différentes périodes de retour du bassin versant d'oued Tamanrasset.

Période de retour ans	Série observée (43 ans)	2	5	10	20	50	100	100
Lame ruisselée mm	25	4.72	11.47	16.1	20.3	25.9	30.1	43.9

La lame d'eau ruisselée pendant 43ans (1960-2002) est plus proche de la valeur de la lame ruisselle pour la période de retour 50ans

10/Crués : Des crues importantes ont été signalées à l'oued de Tamanrasset mais leurs débits et leurs fréquences sont inconnues. Figures II.11 et II.12.

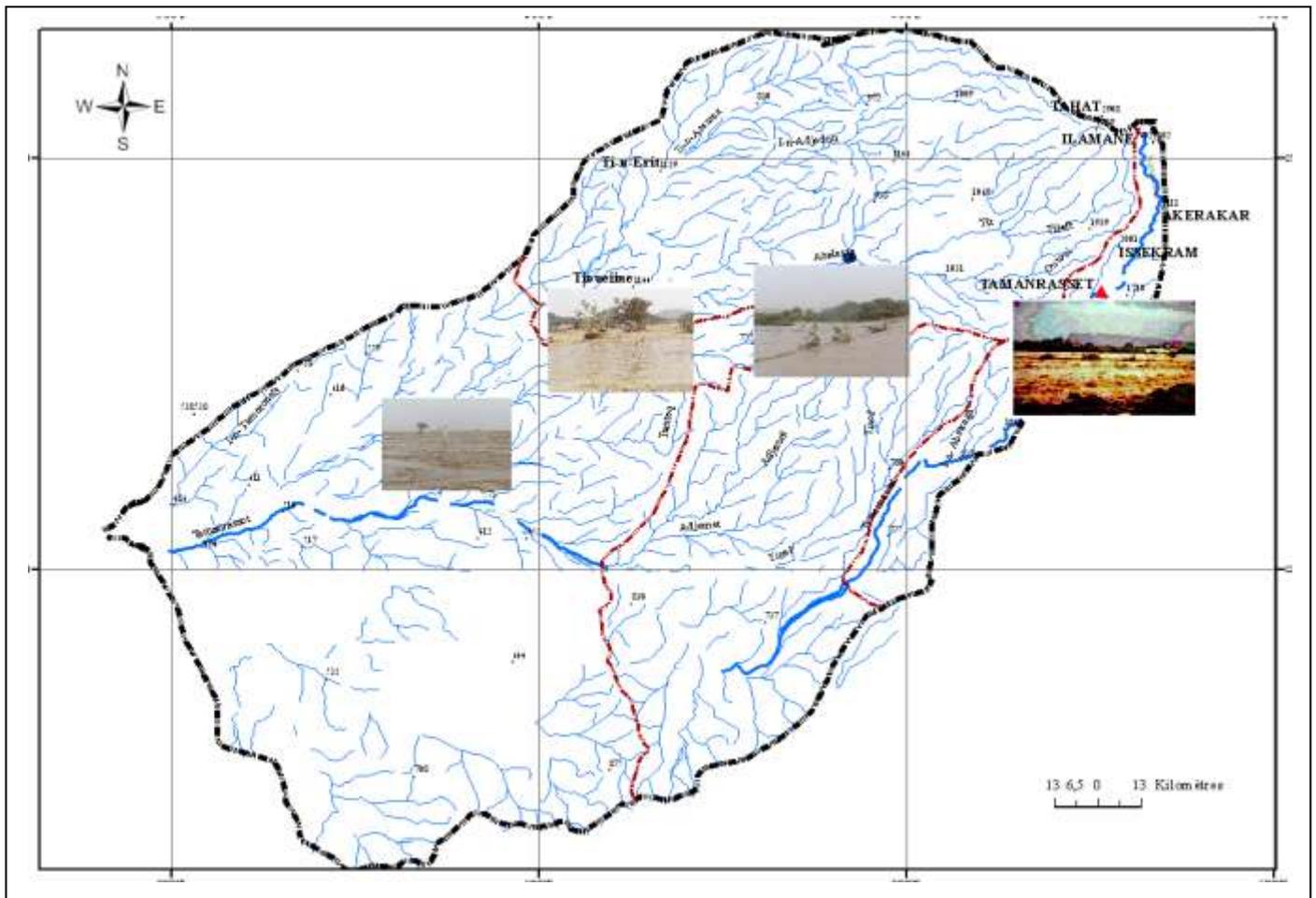
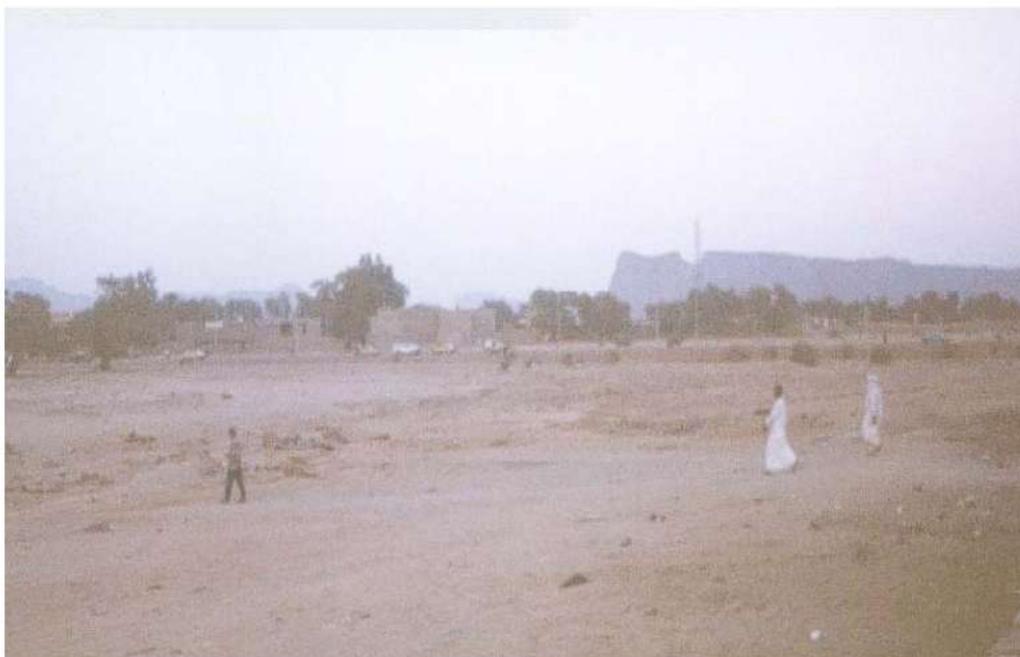


Figure II.11 : situation des points des crues

Oued Tamanrasset (D.E .Zouakh)



Oued Tamanrasset en crue (D.E .Zouakh)

Crue au niveau d'oued Ablessa aout 2008



Crue au niveau d'oued Amded aout 2008



Figure II.12 : crue au niveau d'oued Tamanrasset et ses affluents

Le débit de crues sont estimés à partir des pluies journalières maximal de différents périodes de retour est calcule par la méthode rationnelle

$$Q = \frac{1}{3.6} CIS$$

Q : Débit de crues (m^3/s)

C : Coefficient de ruissellement qui varie avec le période de retour T .

I : Intensité maximale (mm/heures).

S : Surface du bassin versant (km^2)

Le coefficient de ruissellement c'est le rapport de la lame ruissellée pour une fréquence donnée par la pluie correspondante.

Les résultats des calcule sont données au tableau suivant :

Tableau II.16 : débit de crue de l'oued Tamanrasset

T (ans)	I (mm/heures)	C	Q (m^3/s)
2	0.48	0.33	126
5	0.79	0.49	309
10	1	0.55	439
20	1.2	0.58	556
50	1.4	0.61	682
100	1.6	0.63	805
1000	2.2	0.66	1160

11/ Infiltration (recharge) :

L'infiltration est une variable difficile à quantifier, car elle dépend de nombreux facteurs (intensité de précipitation, topographie et nature des formations à l'affleurement).

A partir de la carte de zone de recharge qui été établie à l'aide d'un indicateur de recharge calculé à l'échelle mondiale par P. Döll et al (2005) figure II .10.

La recharge totale est calculée par la formule suivante :

$$R_A = fr. fs. fg. fp. R_T$$

- fr : est le facteur de réduction lié au relief ($0 < fr < 1$)
- fs : est le facteur de réduction lié au type de sol ($0 \leq fs < 1$)
- fg : est le facteur de réduction lié à la géologie ($0 < fg < 1$)

- f_p : est le facteur de réduction lié à la présence de permafrost ($0 \leq f_p \leq 1$) pour les zones concernées par le permafrost.
- R_T : écoulement total calculée au pas de temps journalier basé sur les données temporelles du période 1961-1990.

Tamanrasset correspondant une zone de recharge inferieur à 5 mm.

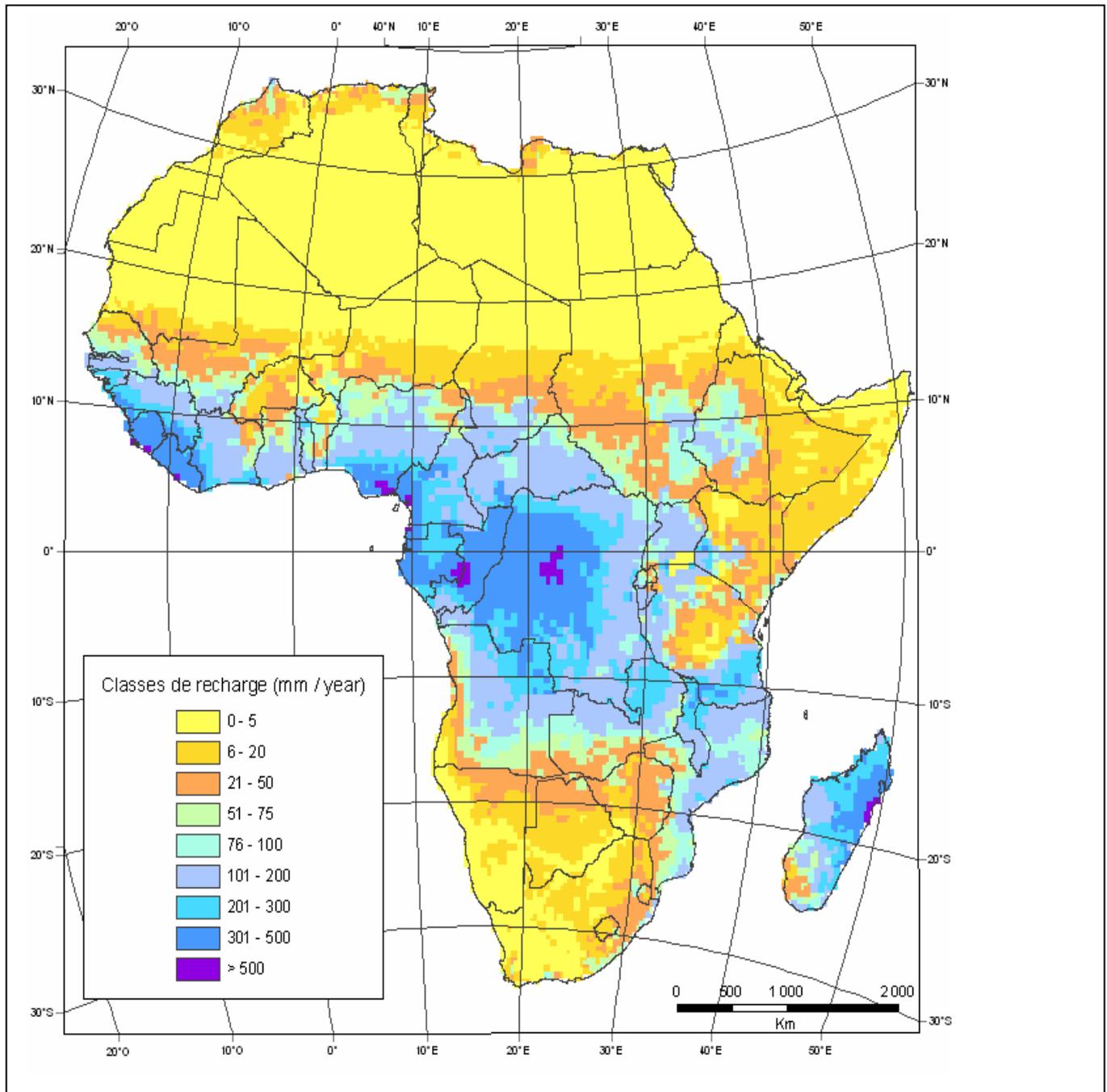


Figure II.13 : valeur de recharge calculée sur une grille à mailles de 0.5°

(P. Doll ; M.Florke).

12/ Conclusion :

Le bassin versant de l'oued Tamanrasset a des caractéristiques morphométriques qui favorisent le ruissellement lors des périodes de pluies qui sont de courte durée. Les précipitations sont faibles et apparaissent sous la forme d'orages de mai à septembre. Durant cette période les températures atteignent leur seuil maximal, d'où des valeurs de l'évaporation très élevées. Il est noté que ces orages donnent naissance à des crues importantes. Ce qui permet de recharger les aquifères dans le lit de l'oued où sont déposés les alluvions qui ont une bonne perméabilité.

CHAPITRE III :
Caractérisation
hydrogéologique des aquifères
du bassin versant d'oued
Tamanrasset

I/ Introduction :

Dans la zone d'étude, l'extension limitée et la faible puissance des formations poreuses et l'affleurement important de socle cristallophyllien qui n'est aquifère qu'au sein de sa frange superficielle altérée et fissurée, est associée avec la faiblesse et l'irrégularité des précipitations et la très forte évaporation. Ces conditions réunies ne permettent pas de maintenir ces réservoirs d'eau souterraine à saturation. Pour bien gérer ce réservoir et assurer sa pérennité, la caractérisation hydrogéologique est nécessaire. Elle permet

- D' identifier les différents aquifères existants dans la zone d'étude.
- Déterminer les profondeurs des eaux souterraines de chaque aquifère et analyser leurs variations temporelles à travers des relevés piézométriques.
- Estimer les différents paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité et coefficient d'emmagasinement par le biais des essais de pompage et essais hydrauliques.

Du fait de la grande hétérogénéité de circulation en milieu fissurée, la description et la caractérisation des aquifères de socle est importante pour une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique de ces aquifères. A ce titre nous proposons une revue bibliographique sur les aquifères de socle.

1/ Les aquifères de socles:

Les aquifères de socle sont constitués de roches cristallines d'origine plutonique (granite..) et métamorphiques (gneiss, schistes, micaschistes ...etc.). Hydrogéologiquement, il s'agit de roches dures qui se caractérisent principalement par une perméabilité de fissures et de fractures. Les " aquifères" qu'elles constituent sont considérés comme "discontinus", en raison de l'importante variabilité spatiale de leurs propriétés hydrodynamiques.

Compte tenu de leur perméabilité et porosité relativement faible, la productivité de ces aquifères est modeste (débit de quelque m³/h à quelques dizaines de m³/h) comparée aux autres types d'aquifères. En climat tempéré, ces "aquifères" permettent par exemple de renforcer la disponibilité des ressources en eau superficielle existant notamment en étiage. La mise en valeur de ces aquifères apparaît dans les zones arides et semi arides où le manque d'eau dans ces régions conduit à exploiter toutes les ressources disponibles.

Les roches de socle (roches plutoniques et métamorphiques) ne sont aquifères qu'au sein de leur frange superficielle, sur les 100 premiers mètres environ sous la surface du sol qui a été soumise à des processus d'altération supergène.

2/Model conceptuel du profil d'altération type d'aquifères de socle (thèse KOITA) :

Dans la littérature, plusieurs zonations sont décrites pour les séquences lithologiques reposant sur le socle cristallin, celles-ci étant basées sur des caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques, géodynamiques ou paléomorphologiques (Geirnaert et al. 1984; Wright, 1992 ; Taylor et Howard, 2000 ; Freyssinet et Farah, 2000 ; Dewandel et al. 2006). Depuis les années 50, période à laquelle les premiers profils d'altération sur granite sont décrits par Ruxton et Berry (1957), jusqu'à nos jours, l'analyse et la description des profils d'altération connaissent des progrès significatifs.

Le profil d'altération typique, résultant de l'altération de la roche en place, est défini comme l'ensemble des séquences lithologiques au-dessus de la roche saine non fracturée (Wright, 1992). Plusieurs modèles conceptuels sont proposés pour décrire ce profil.

Des descriptions plus détaillées et plus complètes des profils d'altération sont proposées par de nombreux auteurs. Ces études qui utilisent des techniques d'interprétations robustes, spécifiques aux milieux fracturés, proposent des modèles conceptuels de la géométrie du profil d'altération mais décrivent aussi l'hydrodynamique dans les couches altérées des aquifères associés. En plus de la simple description structurale des profils, ces modèles conceptuels proposent une évolution des profils en fonction du paléoclimat et des événements tectono-morphologiques (Taylor et Howard, 1988, 2000) subis par la roche. Taylor & Howard (1998, 2000), Wyns et al. (2004), Dewandel et al. (2006), montrent que l'évolution à long terme des terrains profondément altérés est associée à des cycles d'altération et d'érosion contrôlés tectoniquement. Les phases tectoniques de surrection induisent des épisodes d'érosion, alors que l'inactivité tectonique est à l'origine d'une altération profonde. Ces derniers résultats indiquent que les profils d'altération typiques peuvent être scindés en deux catégories : i) les profils issus de l'altération monophasée (Wyns et al. 1999 et 2004) et ii) les profils issus de l'altération polyphasée (Dewandel et al. 2006).

De la base au sommet, ces modèles peuvent être décrits comme suit (fig. III.1 et III.2)

- La roche saine (non altérée) fracturée et perméable localement où elle est affectée par la fracturation. Sa capacité d'emmagasinement est limitée à l'échelle locale (Chilton et

Carington, 1984; Lachassagne et al. 2001; Dewandel et al. 2006). A l'échelle du bassin et pour des applications à la recherche de ressources en eau, la roche saine peut être considérée comme imperméable et d'une capacité d'emmagasinement très faible (Maréchal et al. 2004).

- Au dessus du socle sain fracturé, se situe une couche altérée fissurée dont la densité de fissuration augmente vers le sommet. La partie inférieure de cette couche est dominée par une fissuration verticale alors qu'une fissuration horizontale devient prépondérante dans sa partie supérieure. L'origine de ces fissures fait l'objet de nombreuses discussions dans la littérature. Wright (1992), Taylor et Howard (1998; 2000) expliquent que l'origine de ces fissures est associée à un processus de décompression lithostatique. Cependant, de récentes et nombreuses observations à l'échelle des lithologes et à l'échelle du minéral (Wyns et al.1999, 2004, Dewandel et al. 2006) suggèrent que cette fracturation est causée par l'altération des minéraux phyllosilicatés (biotite en particulier). Une conséquence de ce processus d'altération est que cette zone altérée fissurée est parallèle aux paléosurfaces (Wyns et al.1999). L'intensification de la fissuration au sommet de cette couche, qui constitue la zone laminée sus jacente, assure la fonction capacitive principale de l'aquifère composite. C'est cette zone que draine par la plupart des puits creusés en zone de socle.
- Au sommet du profil se trouvent les formations d'altérite (ou saprolite) riche en argile. L'épaisseur de cette couche est la moitié de celle de la zone fissurée. Les altérites peuvent être subdivisées en deux sous couches, les allotérites et les isaltérites, selon le changement de volume et la préservation de la structure originelle de la roche (Wyns et al.1999). Dans la couche inférieure (isaltérite) qui repose directement sur la zone laminée, la structure de la roche originelle est préservée tandis que dans la couche supérieure (allotérite) essentiellement argileuse, elle ne l'est plus.

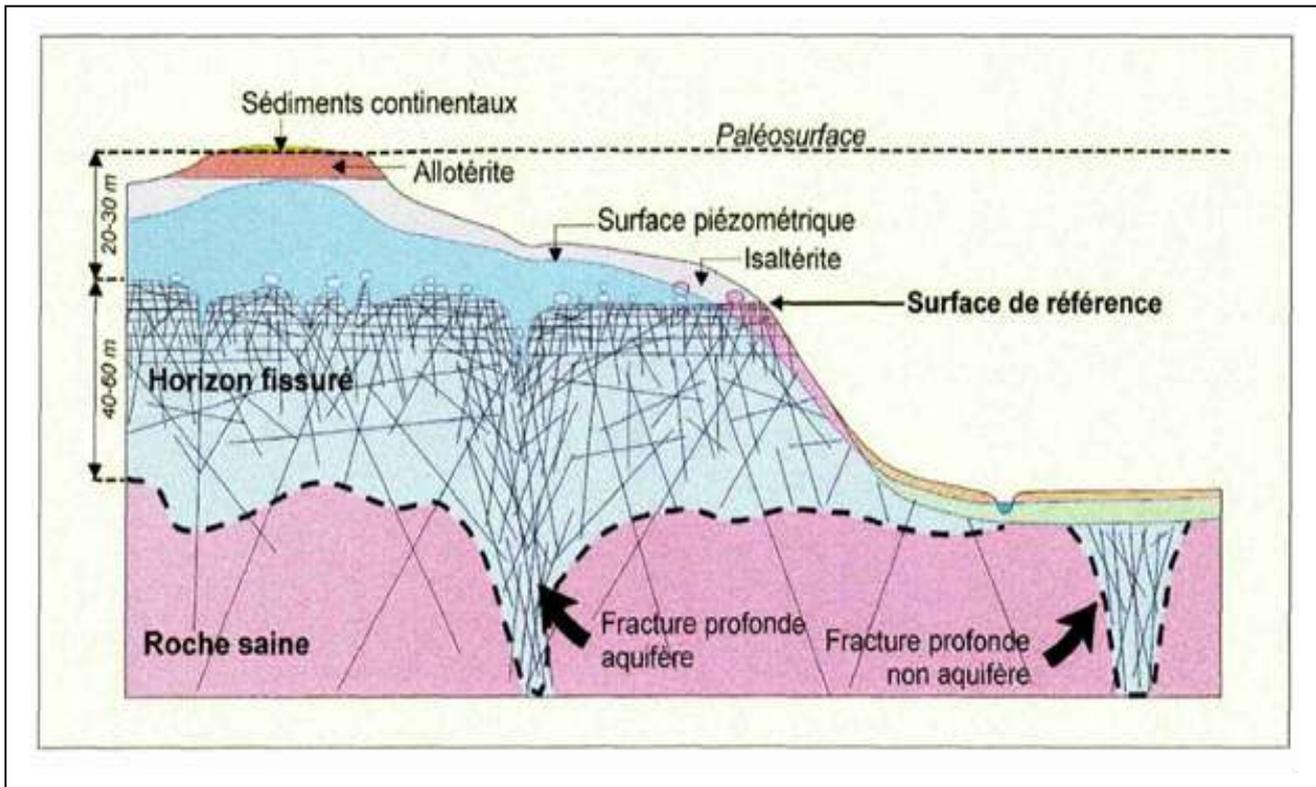


Figure III.1 : Schéma conceptuel de formation d'altération de roche de socle (Wyns 1999)

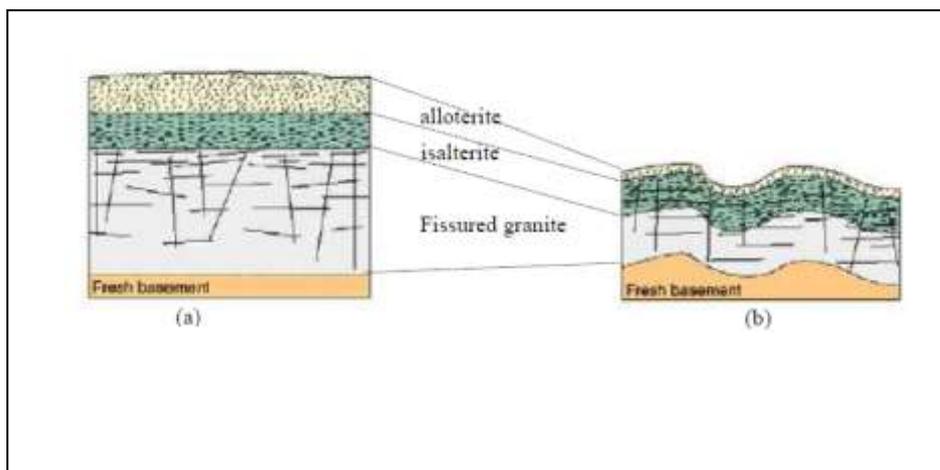


Figure III.2. (a) Profil d'altération monophasée sur granite (Wyns et al. 1999) et (b) profil d'altération polyphasée sur granite (Dewandel et al. 2006).

II/ Identification des aquifères captés dans la région de Tamanrasset :

Selon les coupes lithologiques des forages, deux types d'aquifères sont distingués :

1/ L'aquifère des alluvions du quaternaire (les nappes d'inféro-flux) : cette nappe est limitée dans le lit d'oued d'épaisseur qui ne dépasse pas 26 m. Elle est alimentée quasi exclusivement par les crues d'oued Tamanrasset.

2/ L'aquifère du socle altéré et fissuré : cette nappe est limitée au niveau altéré et fissuré d'épaisseur moyenne qui varie entre 20 à 30 m. cet aquifère présente une spécificité d'avoir une porosité interstitielle et fissurale.

Ces aquifères sont généralement superposés (la superposition d'un réservoir poreux (alluvions) et un réservoir de socle discontinu). L'aquifère des alluvions est considéré comme une nappe libre qui reçoit les eaux des précipitations par infiltration directe, et l'aquifère de socle, on peut le considérer comme une nappe semi-libre.

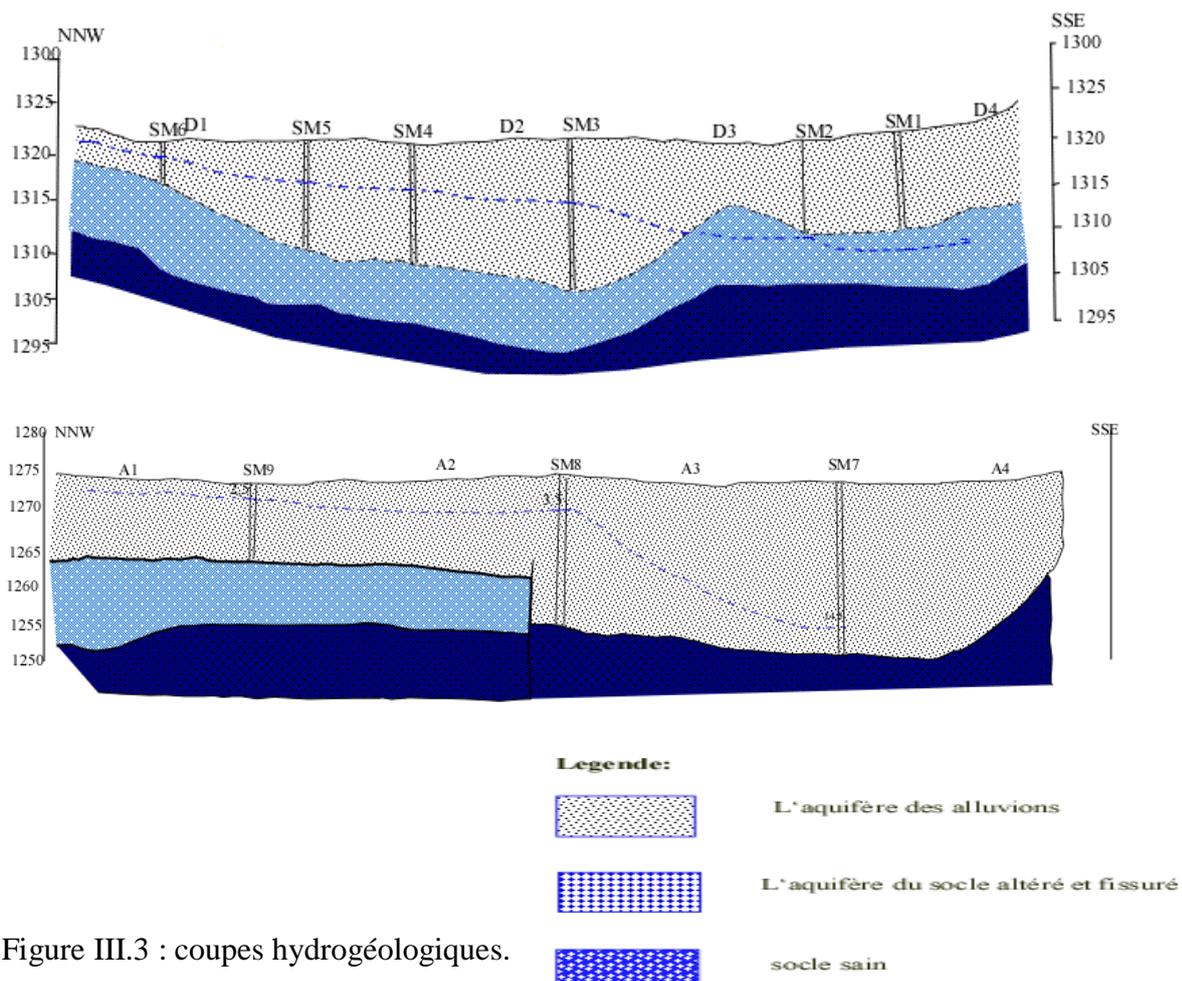


Figure III.3 : coupes hydrogéologiques.

III - Piézométrie :

Les données piézométriques sont notamment requises pour définir les directions et la vitesse d'écoulement des eaux souterraines tant en condition naturelle, que durant le pompage et d'identifier les zones de recharge et d'émergence.

L'inventaire des points d'eau (sources, puits, forages, piézomètres) est basé sur l'exploitation des données fournies par la direction de l'hydraulique de Tamanrasset, et aussi par les points recensés lors des campagnes piézométriques.

Dans le bassin versant de l'oued Tamanrasset les points de mesure du niveau statique de la nappe comprennent :

- les forages recoupant les deux unités hydrogéologiques (les dépôts meubles et la formation de socle),
- les forages captant seulement le socle rocheux,
- les puits qui captent dans leurs majorités les eaux de formations meubles (fig.III.4).

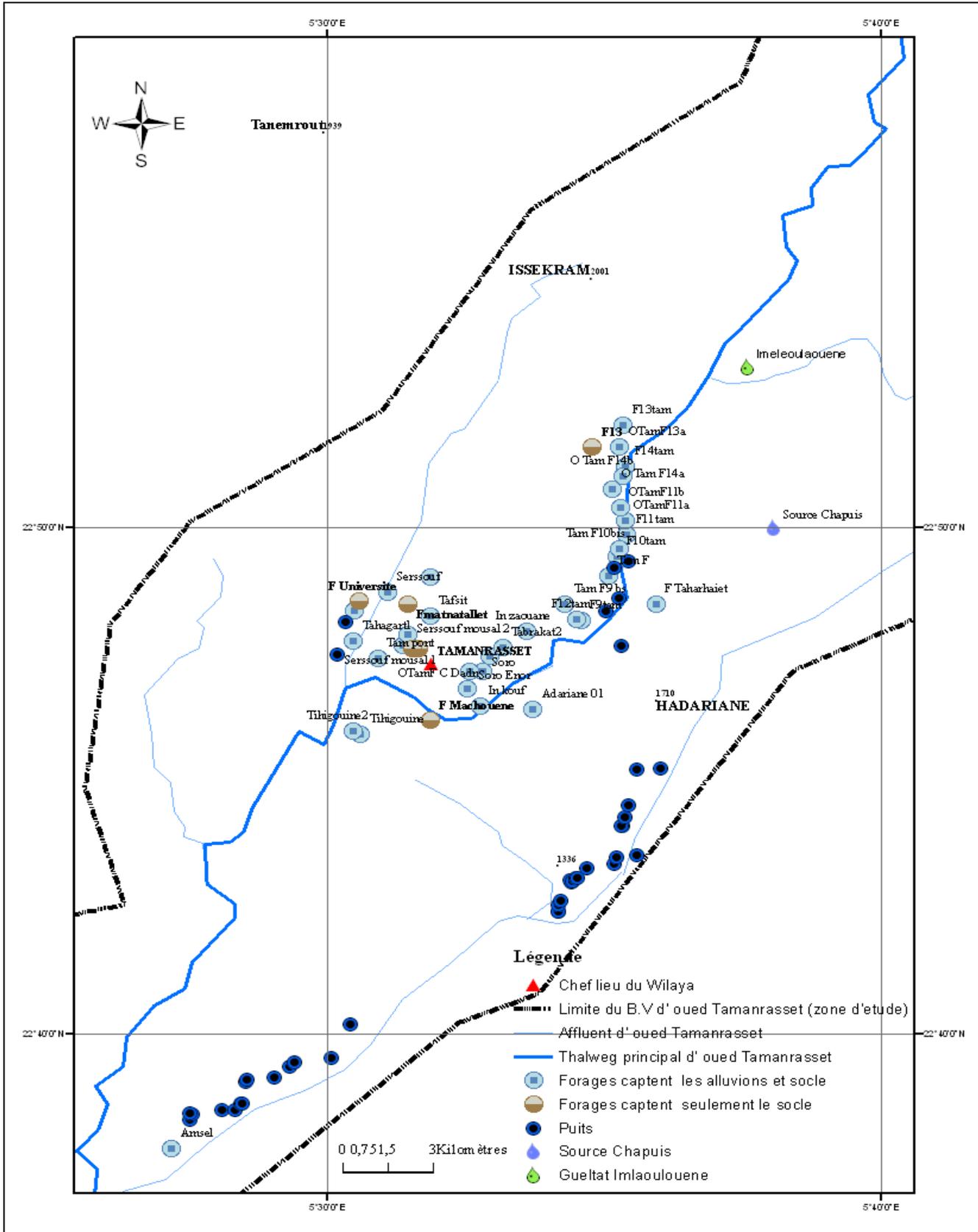


Figure III.4 : localisation des points d'eau dans le bassin versant d'oued Tamanrasset (zone d'étude (2008)).

Les suivis piézométriques mensuels de la nappe phréatique du bassin versant de Tamanrasset sont inexistant. J'ai effectué quatre campagnes piézométriques durant l'année 2007-2008. (04-08-2007, 16-03-2008, 26-03-2008 et 01-04-2008) et aussi j'ai utilisé les données de deux campagnes piézométriques (08-08-2007, 26-08-2007) qui sont effectuées par la DHW de Tamanrasset.

Les relevés piézométriques sont présentés en annexe II.

1/ Les cartes piézométriques :

L'exploitation des mesures piézométriques se traduit par la confection de cartes piézométriques.

2/Interprétation des cartes piézométriques :

2.1/La carte piézométrique de la campagne 08-08-2007 : les mesures ont été effectuées avant la crue de l'oued (les points de mesure sont situés dans le lit de l'oued). La surface piézométrique se retrouve à environ 1401 m jusqu'à 1436 m et l'écoulement se dirige vers le sud.

Les isohypses sont caractérisées par un espacement régulier dans la partie nord et sud de la carte et indiquant un gradient hydraulique égale 0.02 (Fig. III.5).

2.2/ Campagne 26-08-2007 : Les mesures sont effectuées après la crue de l'oued. Le niveau statique varie entre 6 m à 14 m dans l'ensemble des points de mesures. On note une augmentation dans le niveau des forages F₁₄ (+0.37m), F_{14a} (15.3m) et F_{11a} (0.48m). Dans la partie sud les isopièzes montrent un espacement régulier avec un gradient hydraulique de l'ordre de 0.03 La direction générale d'écoulement est orientée vers le sud (Fig. III.6).

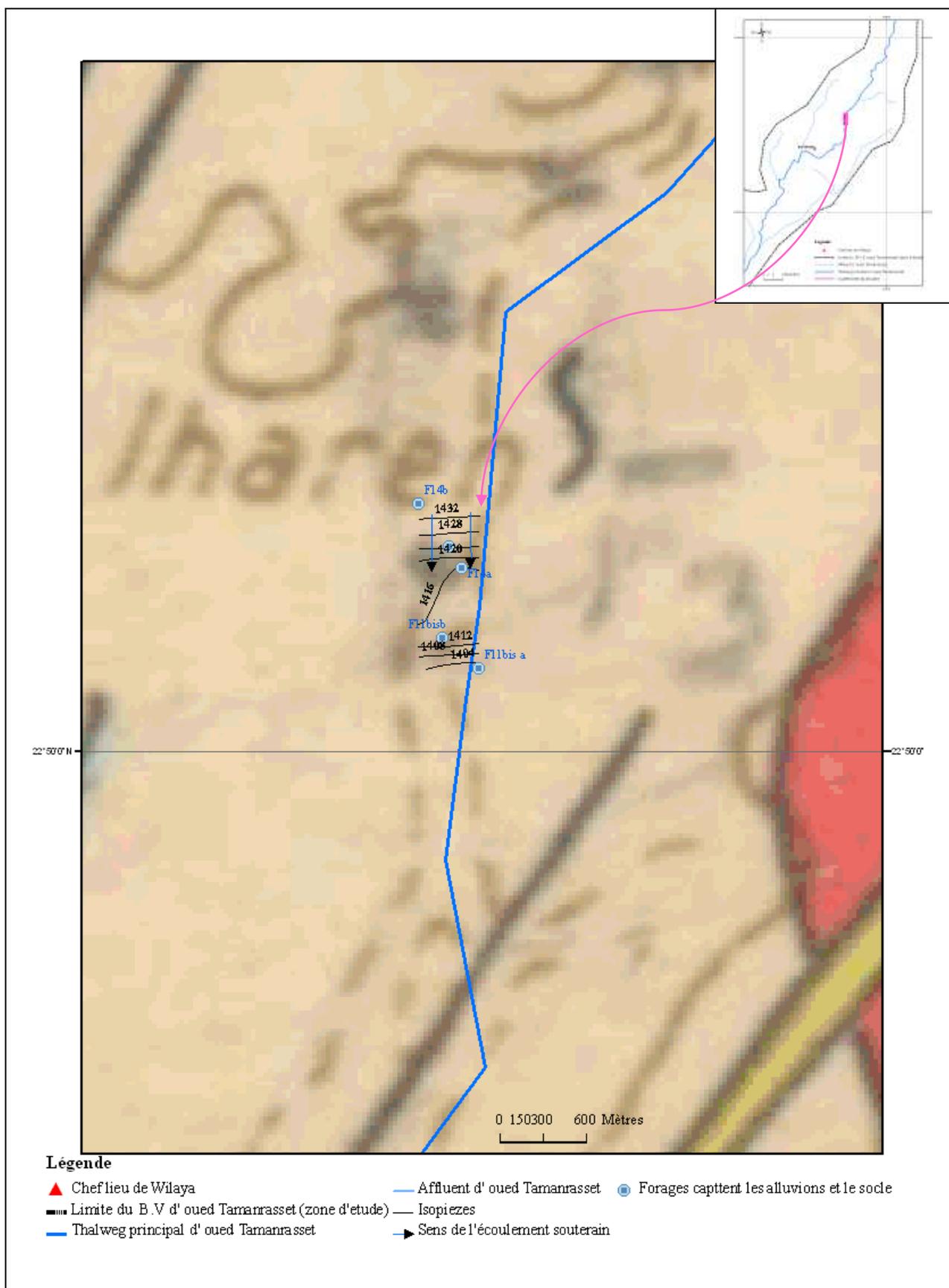


Figure III.5: carte piézométrique (campagne piézométrique 08-08-2007).

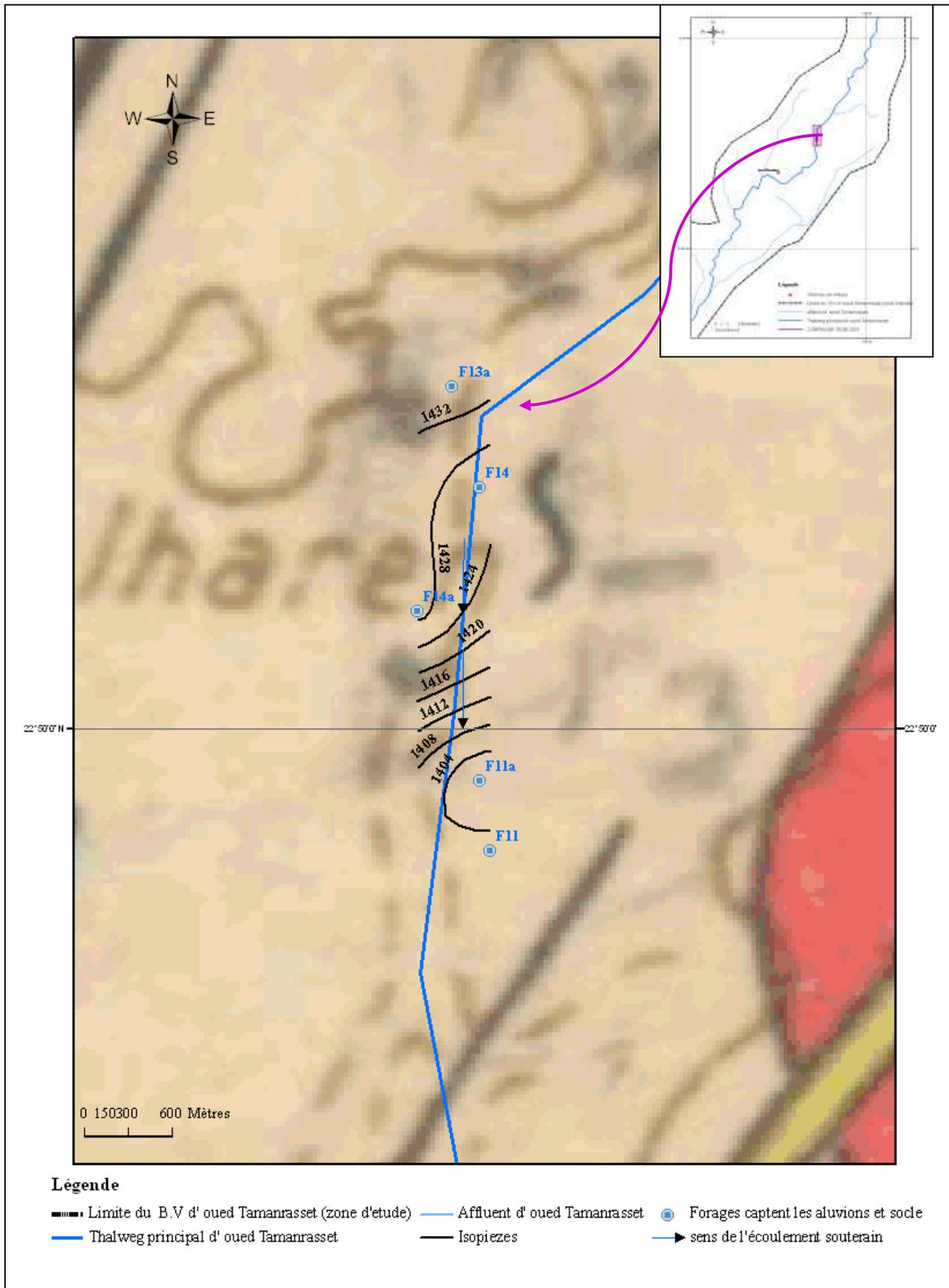


Figure III.6 : Carte piézométrique (campagne 26-08-2007)

2.3/Campagne du 16-03-2008 :

Après 7 mois de la crue on note une diminution dans les forages F₁₄ (-0.78m), F_{14a} (-15.6 m) et F_{11a} (-1.86 m). Les isopièzes présente un espacement régulier au nord et au sud de la carte et montre un gradient hydraulique de l'ordre de 0.016. Entre le forage F14a et F14b elles sont espacées ce qui donne un gradient hydraulique faible de 0.005 donc une forte perméabilité. La direction de l'écoulement est orientée vers le sud.

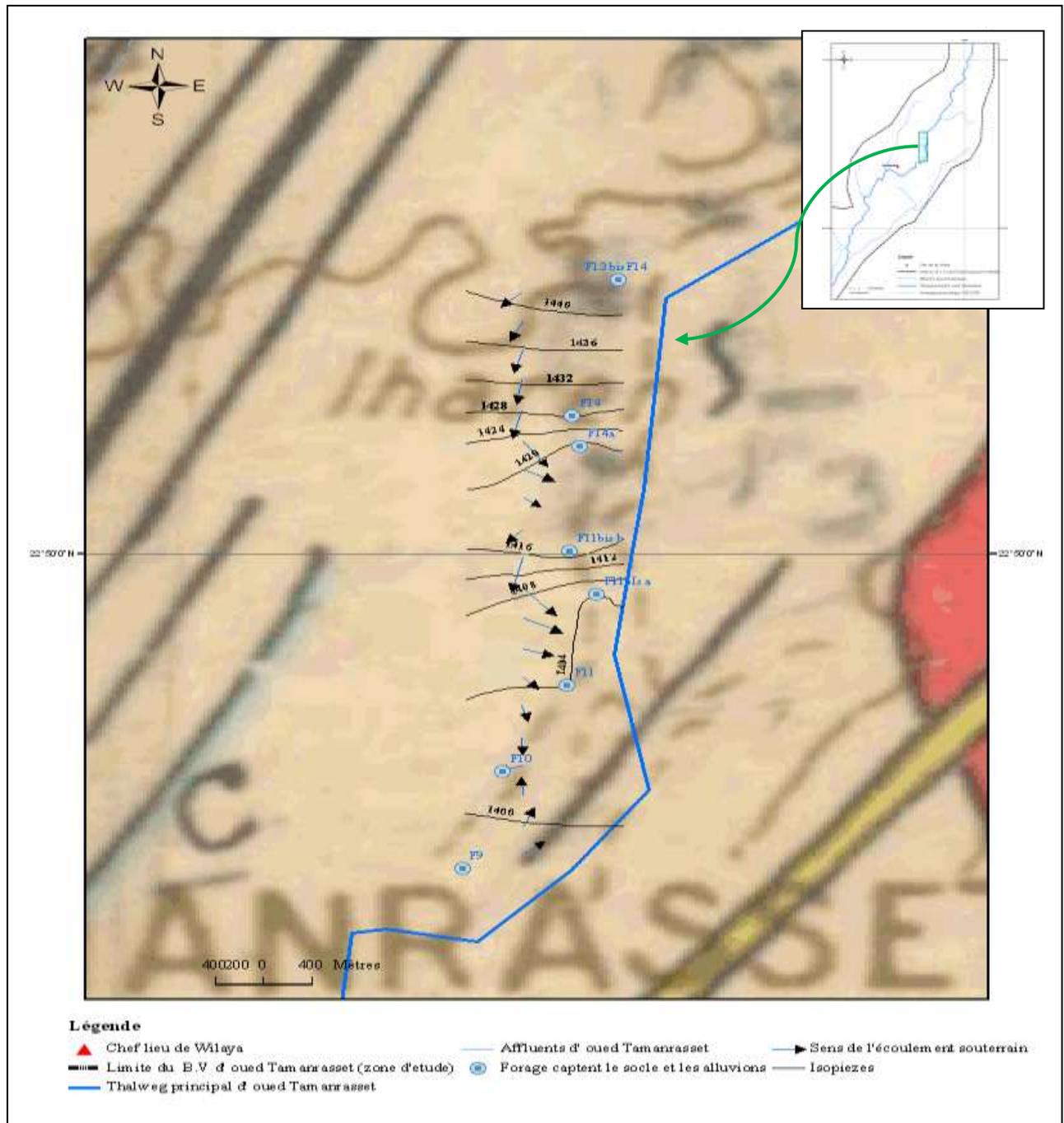


Figure III.7 : Carte piézométrique (campagne 16-03-2008)

2.4/La carte piézométrique de la campagne du 26-03-2008 :

Les mesures piézométriques comprennent seulement les forages qui captent le socle rocheux. La profondeur du niveau d'eau varie entre 14 m et 35m. Le gradient hydraulique est approximativement égal à 0.01. Au milieu de la carte le gradient hydraulique est faible, il est de l'ordre de 0.005 ce que reflète une forte perméabilité. L'effet de pompage est net, il se traduit par une dépression, et le sens d'écoulement est essentiellement dirigé vers cette dépression.

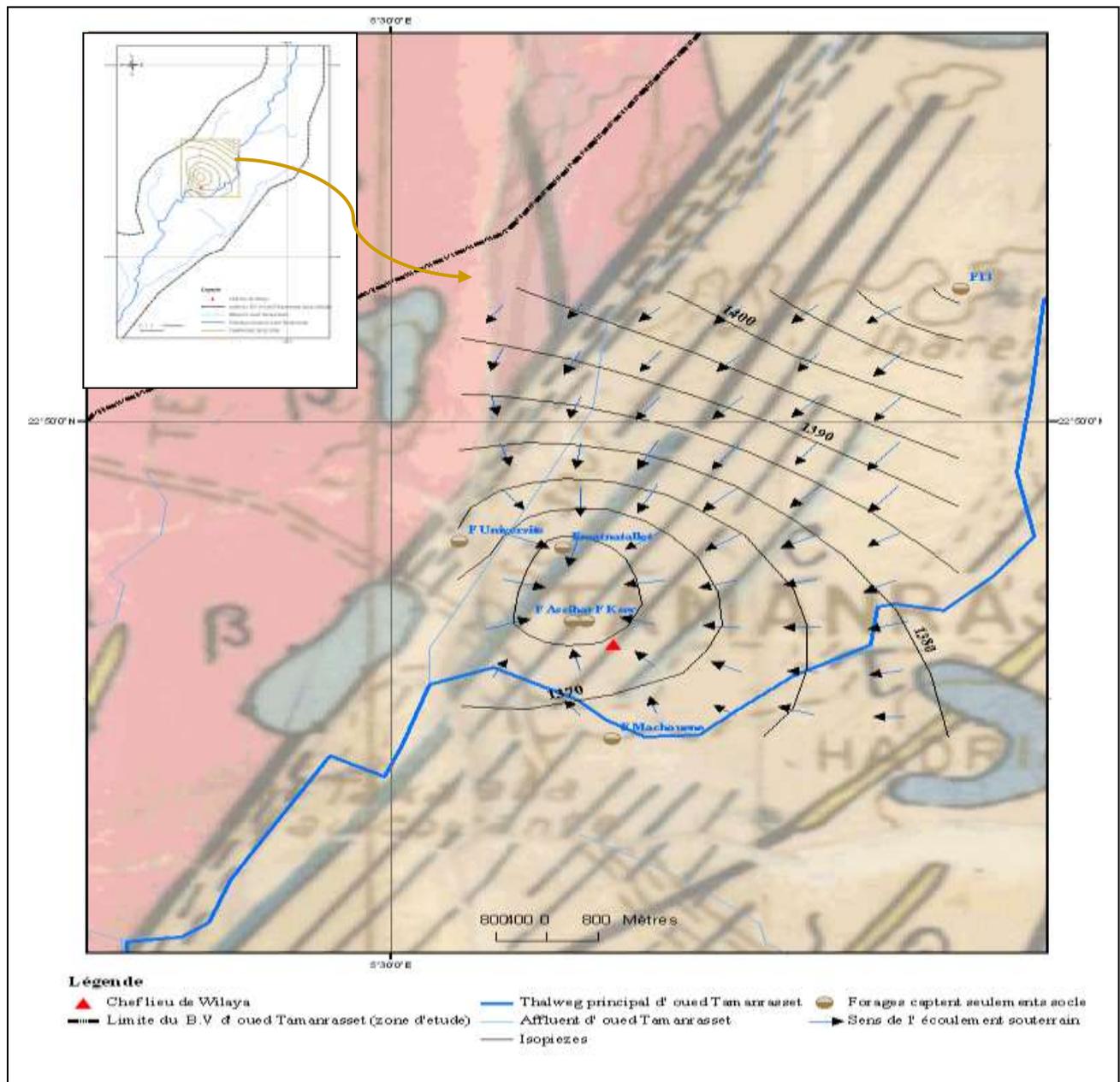


Figure III.8: carte piézométrique (campagne piézométrique 26-03-2008)

2.5/La campagne piézométrique de 01-04-2008 :

Les mesures piézométriques sont effectuées au niveau de l'affluent de l'oued Tamanrasset (Izerzi) partie amont et (Amsel) partie aval. Elle comporte les puits qui captent seulement les formations meubles.

2.6/Carte piézométriques des puits Izerzi:

La carte piézométrique des puits montre un espacement régulier entre les isopièzes ce qui interprétées par un gradient hydraulique égal à 0.03. Au sud ouest les isopièzes sont très resserré, elles montrent l'effet de pompage. L'écoulement se dirige vers le sud ouest (fig. III.10).

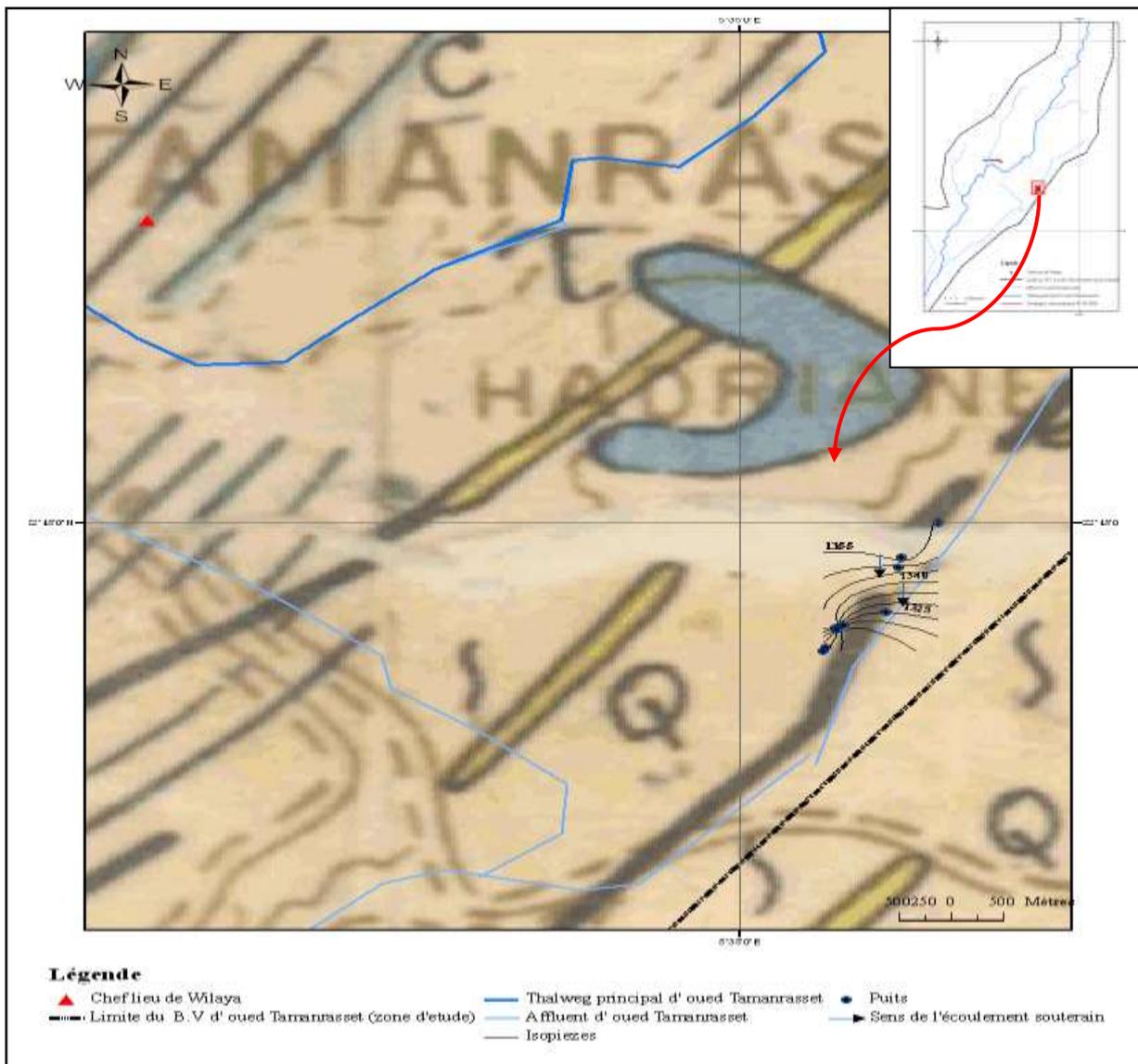


Figure III.9 : Carte piézométrique 01-04-2008 (Izerzi)

2.7/ Carte piézométrique des puits Amsel :

La carte piézométrique des puits Amsel montre des dépressions qui sont liées au pompage. L'écoulement est dirigé vers le sud ouest.

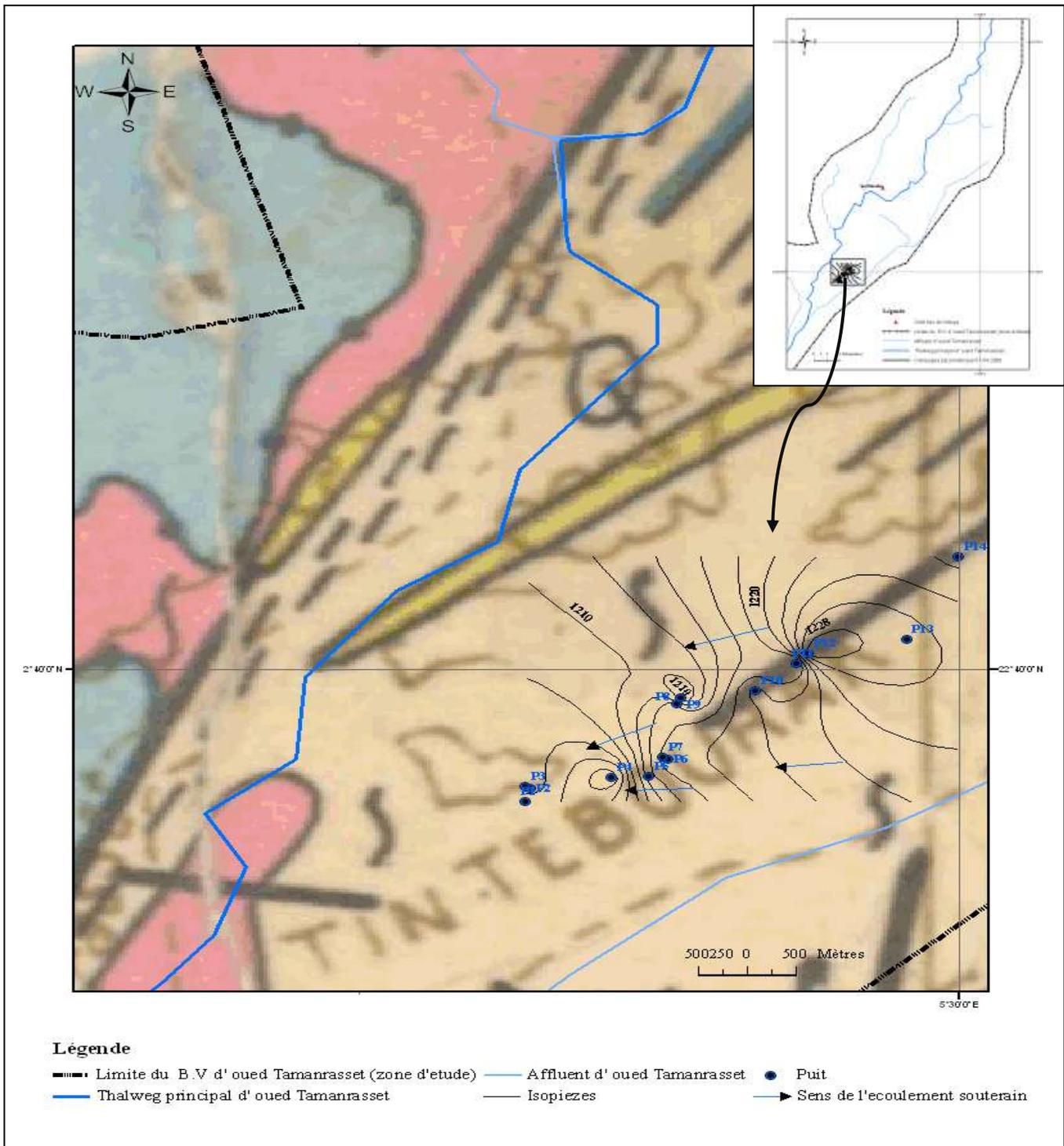


Figure III.10 : Carte piézométrique 01-04-2008 (Amsel).

La carte piézométrique qui comporte les puits Izerzi et Amsel montre une direction d'écoulement vers le sud ouest.

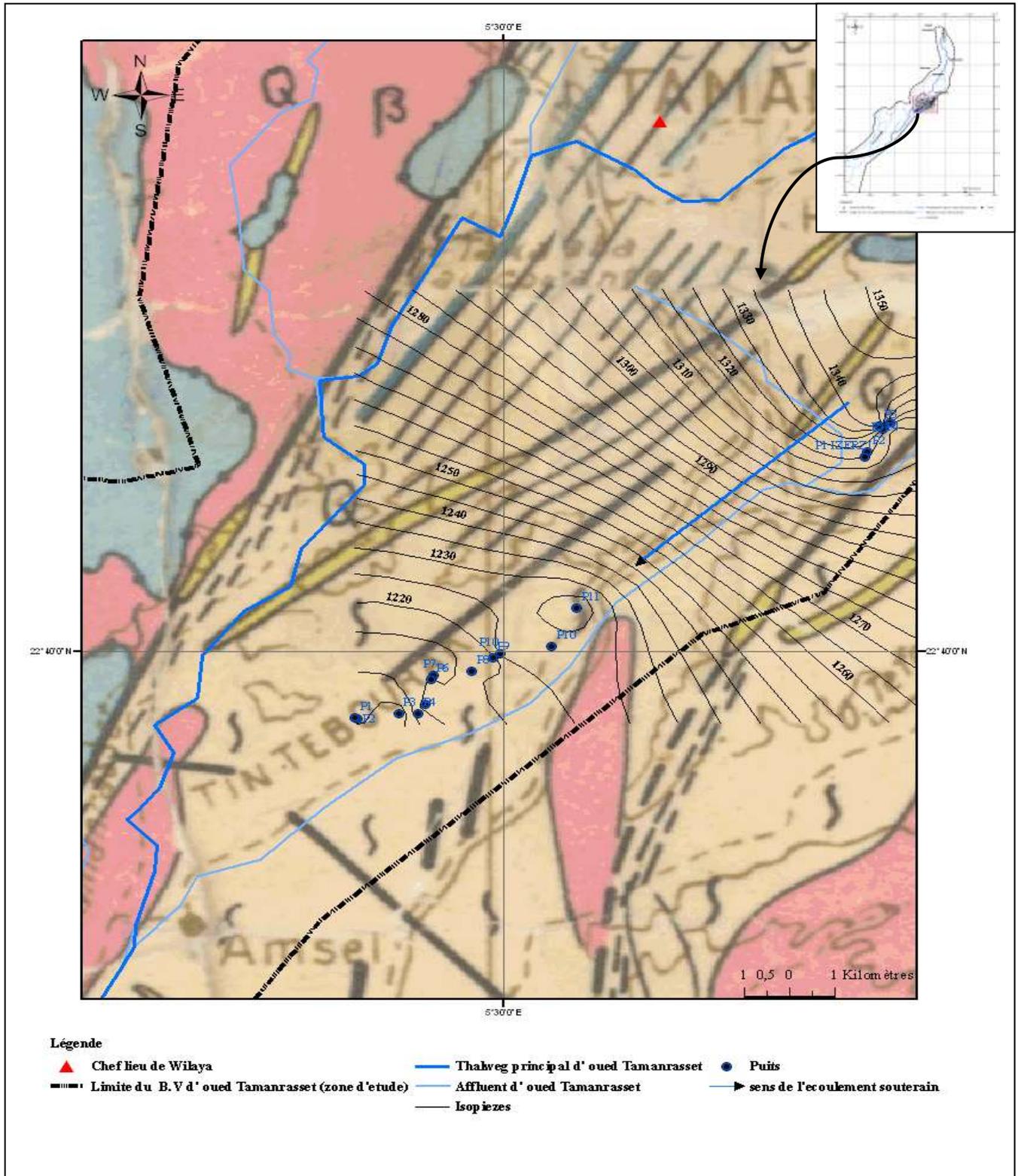


Figure III.11 : Carte piézométrique 01-04- 2008

2.8/ Carte piézométrique des puits d'Ablessa :

Les relevés piézométriques sont réalisés au niveau d'oued Ablessa (sous bassin qui appartient au bassin versant de l'oued Tamanrasset). La carte présente deux dépressions montrant l'effet de pompage sur le niveau piézométrique. Le gradient hydraulique est de l'ordre de 0.006. L'écoulement est orienté vers l'ouest.

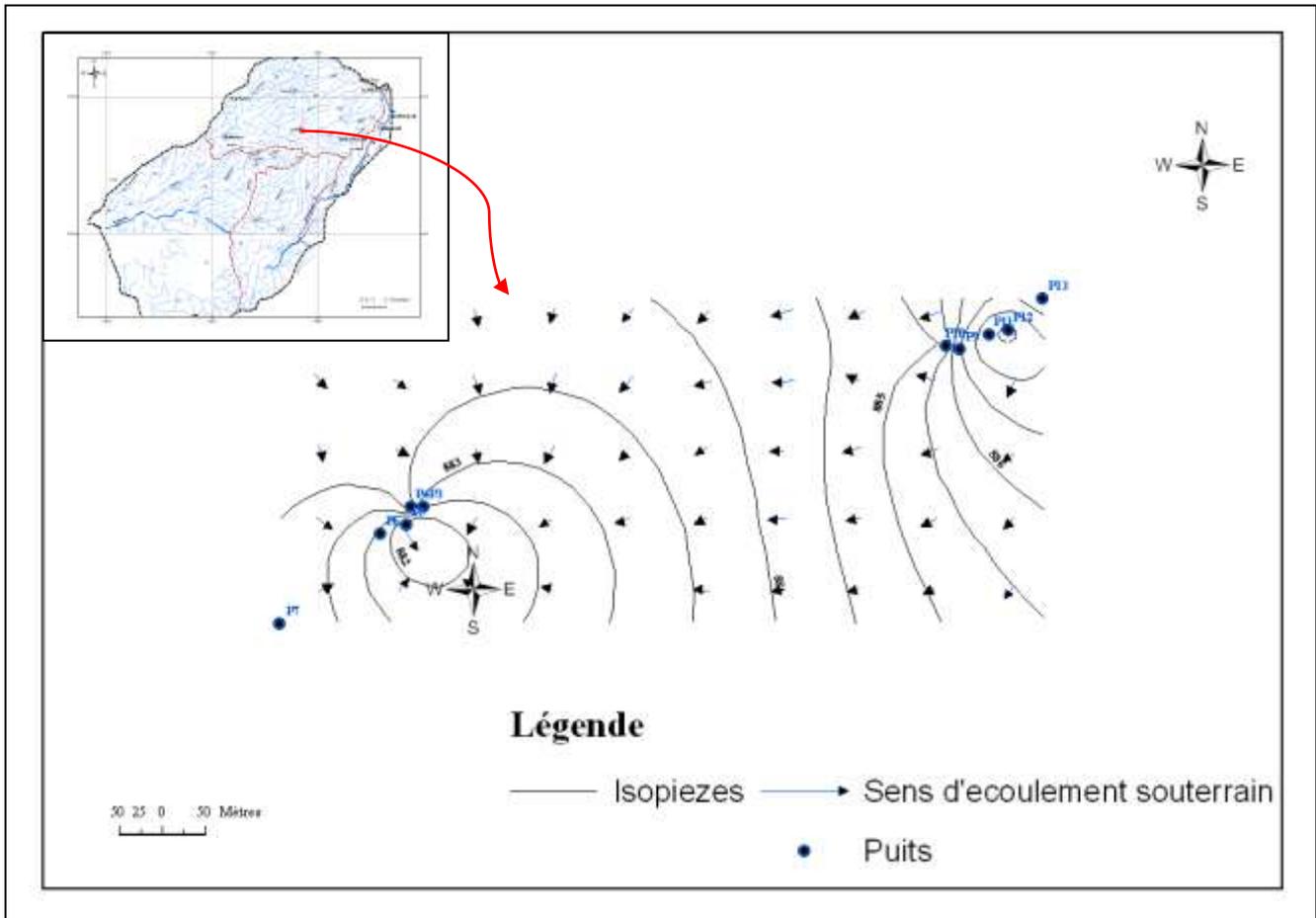


Figure III.12 : Carte piézométrique puits Ablessa 04-04- 2007

3/ Fluctuation piézométrique :

La surface piézométrique de la nappe phréatique subit des fluctuations saisonnières et interannuelles qui sont dues à plusieurs paramètres tels que, les paramètres naturels (évaporation, pluviométrie) et anthropiques (pompages intenses).

Les cartes piézométriques ne couvrent pas le même espace, ce qui ne permet pas de connaître la variation entre ces deux périodes de mesure.

La nappe inféro-flux est alimentée quasi exclusivement par les crues, qui agissent directement sur le niveau piézométrique de la nappe. Le niveau piézométrique de la nappe de

l'oued Abalessa (affluent du oued Tamanrasset) est remonté de plus de 1.5 m après la crue de 1^{er} juin 1979((A.Yahin ; 1975) A. Gribi, N. Sai, N. Younsi : notice explicative de la carte hydrogéologique du Hoggar et des Tassilis à 1/1 000 .000.), une baisse de près de 4 m a été enregistrée pendant la période globalement sèche de 1972-1983.

4/Conclusion :

Le suivi de la surface des niveaux d'eau indique que le niveau piézométrique dans les forages qui recoupent les formations meubles sont proches de la surface (6 m à 21 m), par contre les forages qui captent le socle montrent un niveau piézométrique un peu plus profonde (varie de 14 m jusqu' à 35 m).

Les données piézométriques sont peu nombreuses. Elles ne permettent pas d'exprimer la profondeur exacte de la nappe à grande échelle, en plus ces niveaux ont été relevés dans certains cas au voisinage de forages en subissant un pompage influence l'écoulement et les niveaux piézométriques

IV Caractérisation hydrodynamique des aquifères du bassin versant de l'oued Tamanrasset :

Différentes méthodes directes telles que les essais de pompages et les essais hydrauliques (Lugeon, essais Lefranc, slug test) ont été utilisées pour obtenir les différents paramètres hydrodynamiques caractérisent l'aquifère (perméabilité (K), transmissivité (T) et le coefficient d'emmagasinement (S)).

1/ Pompage d'essai :

Le pompage d'essai consiste à suivre les variations de profondeur d'eau dans le puits et si possible dans un ou plusieurs piézomètres à proximité, pendant et après le pompage. Le pompage d'essai répond à deux objectifs distincts :

- Déterminer les propriétés hydrodynamiques des aquifères par le biais d'un essai de nappe.
- Il permet également d'obtenir des renseignements sur les caractéristiques du puits.

2/ Présentation des données de pompage d'essai :

Pour les données des essais de pompage j'ai suivis deux essais de pompage effectués dans les forages qui recoupent seulement le socle altéré et fissuré avec un débit constant en 2008, et les données de deux essais de pompage par palier de débits enchainés ont été effectués durant l'année 1978, dans les forages qui captent seulement les formations meubles par la direction de l'hydraulique de Tamanrasset.

Pour tous ces essais aucun piézomètre d'observation n'était disponible.

3/ Interprétation des essais de pompages :

Plusieurs méthodes d'interprétation des essais de pompages existent dans la littérature. Tout ces méthodes s'appuient sur un certain nombre d'hypothèses et s'appliquent dans des conditions bien définies. Le choix de la méthode d'interprétation tient en compte des conditions de terrains en nappe libre ou captive et du régime d'écoulement transitoire ou permanent.

Les méthodes d'interprétation de pompage d'essais d'usage courant tel que (**Theis** (1935), **Jacob** (1947), qui sont appliquées aux nappe captives. Cependant, elles sont applicables aux

nappes libres mais avec des conditions supplémentaires. Les méthodes spécifiques des nappes libres et semi libre avec un débit retardé (**Bolton** et **Neuman**) sont difficilement applicables aux pompages d'essais de la région d'étude à cause des hypothèses de validité de ces méthodes et des exigences en termes de piézomètres.

Les mesures de rabattement sont effectués seulement au niveau des puits de pompage ce qui limite l'interprétation de ces essais.

Les hypothèses de base valables pour toutes ces méthodes sont :

- L'aquifère a une extension latérale illimitée.
- L'aquifère est homogène, isotrope et d'épaisseur uniforme dans la zone influencée par le pompage d'essai.
- Avant le pompage, la surface piézométrique est horizontale dans la zone influencée par le pompage d'essai.
- On pompe à un débit constant.
- Le puits d'essai pénètre entièrement l'aquifère et l'eau arrive en écoulement horizontal sur toute l'épaisseur de la nappe.

Le problème des aquifères à nappe libre est différent est plus complexe que celui résolu par Theis pour les nappes captives, par ce que certains hypothèses ne sont pas valides dans la nappe libre tels que :

- L'épaisseur constante de l'aquifère parce que pendant l'essai de pompage une partie de l'aquifère à nappe libre passe progressivement de l'état saturé à l'état non saturé.
- -Écoulement horizontal, dans la nappe libre les équipotentielles s'inclinent au voisinage des puits et ne sont plus cylindriques. La trajectoire de l'eau ne reste pas horizontale mais elle s'incurve en s'approchant du puits.
- Dans l'aquifère à nappe libre, l'eau provenant du stockage dans l'aquifère est relâchée très lentement par drainage vertical en conditions non saturées.

Donc on ne peut pas appliquer la méthode de Theis sur nos données de pompage d'essai (la méthode de Theis et celle de Boulton sont décrites en annexe II).

3.1/ Méthode de Jacob (l'approximation de Cooper-Jacob) :

La méthode (**Cooper-Jacob 1946**) s'appuie sur la méthode de Theis. Cependant ses conditions d'application sont plus restrictives. Elle doit satisfaire les conditions suivantes :

- Les mêmes conditions d'application de la méthode de Theis.
- Les valeurs de u sont faibles ($u < 0.01$) c'est-à-dire que r est petit ou que t est grand.

Quand u est petit les termes à droite de $\ln u$ dans la fonction

$$w(u) = 0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots$$

Deviens négligeable. Le rabattement s'exprime par :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-\ln u - 0.5772)$$

Après arrangement et passage au logarithme décimal la formule de Jacob est :

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

Avec :

s : Rabattement mesure dans un piézomètre situe à une distance r , de puits de pompage (**m**).

Q : Débit de pompage, en **m³/s**.

S : Coefficient d'emménagement, sans dimension.

T : Transmissivité de l'aquifère, en **m²/s**.

t : Temps depuis le début du pompage, en **s**.

Dans la nappe libre la méthode de Jacob est valable sous certaines conditions tel que l'épaisseur constant de l'aquifère et l'écoulement horizontale. Ces dernier limitent la validité de la méthode et impose la présence d'un piézomètre. En pratique il faut connaître la hauteur **h** de la nappe puis :

- Pour un rabattement inférieur à 10% ($s < 10\%h$) l'équation de Jacob reste valable.
- Pour un rabattement limite entre 10% et 30% ($10\%h < s < 30\%h$) il est possible

d'utiliser l'équation de Jacob avec un terme correctif suivant $S_c = \frac{s^2}{2h}$ dans laquelle :

s_c : rabattement corrigé en m, s : rabattement mesuré dans le puits en m, h : épaisseur de l'aquifère en m.

L'équation de Jacob devient avec s corrigée :

$$s_c = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S}$$

- Pour un rabattement supérieur à 30% ($s > 30\%h$) on utilise une formule dérivée des formules de Jacob et Dupuit :

$$h^2 - b^2 = \frac{0.366Q}{k} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S}$$

$b = h - s$: Épaisseur de l'aquifère durant le pompage au temps t .

k : Perméabilité de l'aquifère en m^2/s

Mode opératoire :

La méthode de Jacob consiste à porter les valeurs de s en fonction de temps correspondant sur un papier semi logarithme, et on trace la droite passant par les points obtenus.

La pente C de la droite obtenue correspondant à la variation de s_r par cycle log de temps, permet de déduire T

$$T = \frac{0.183Q}{C}$$

3.2/ Méthode de rabattement résiduel (courbe de la remontée) :

Une fois le pompage est arrêté, le niveau d'eau cesse de descendre pour remonter vers sa position d'origine. Le rabattement résiduel S_r est la différence entre le niveau original de l'eau avant le pompage et le niveau mesuré à certains moments t' de la remontée.

Dans les mêmes conditions de validité de la méthode de Jacob la formule de rabattement résiduel est :

$$s_r = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{t + t'}{t'}$$

Avec :

S_r : rabattement résiduel en(m), t : temps depuis le début de pompage(s), t' : temps depuis l'arrêt de pompage(s)

Le mode opératoire consiste à porter sur un papier semi logarithme les rabattements résiduel en fonction de $\frac{t+t'}{t'}$.

La pente de la droite qu'on obtient permet de calculer T selon la formule de Jacob

$$T = \frac{0.183Q}{C}$$

Application sur le forage (F2) :

On suppose que la nappe répond aux hypothèses de la méthode Jacob

La coupe du forage F2 (voir annexe II) montre que le forage atteint une profondeur de 25 m et capte seulement les alluvions.

Les courbes de rabattement en fonction de temps de descente et de remonté sont présentées à la figure III.13 et à la figure III.14.

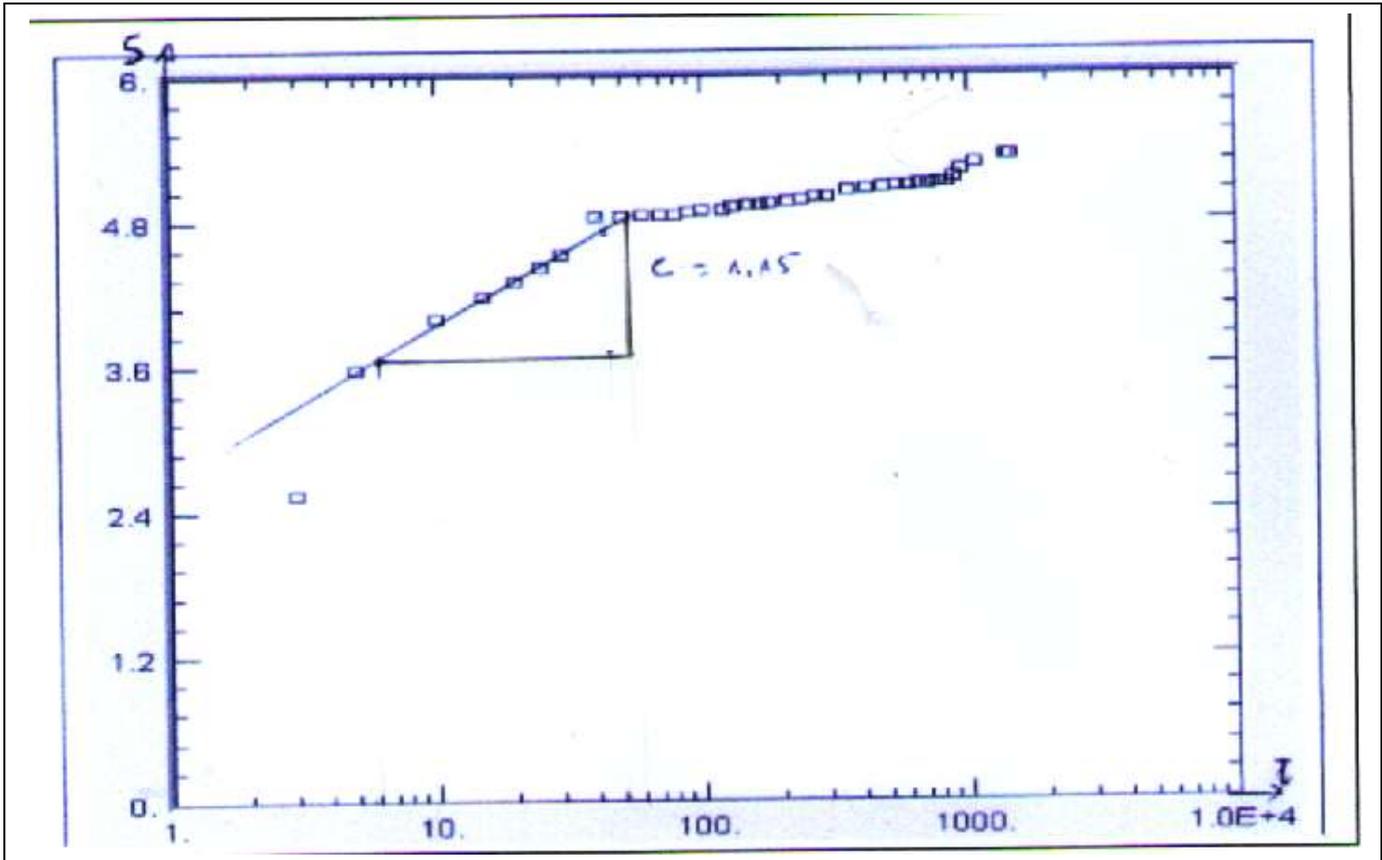


Figure III.13. : Courbe de descente -forage F2

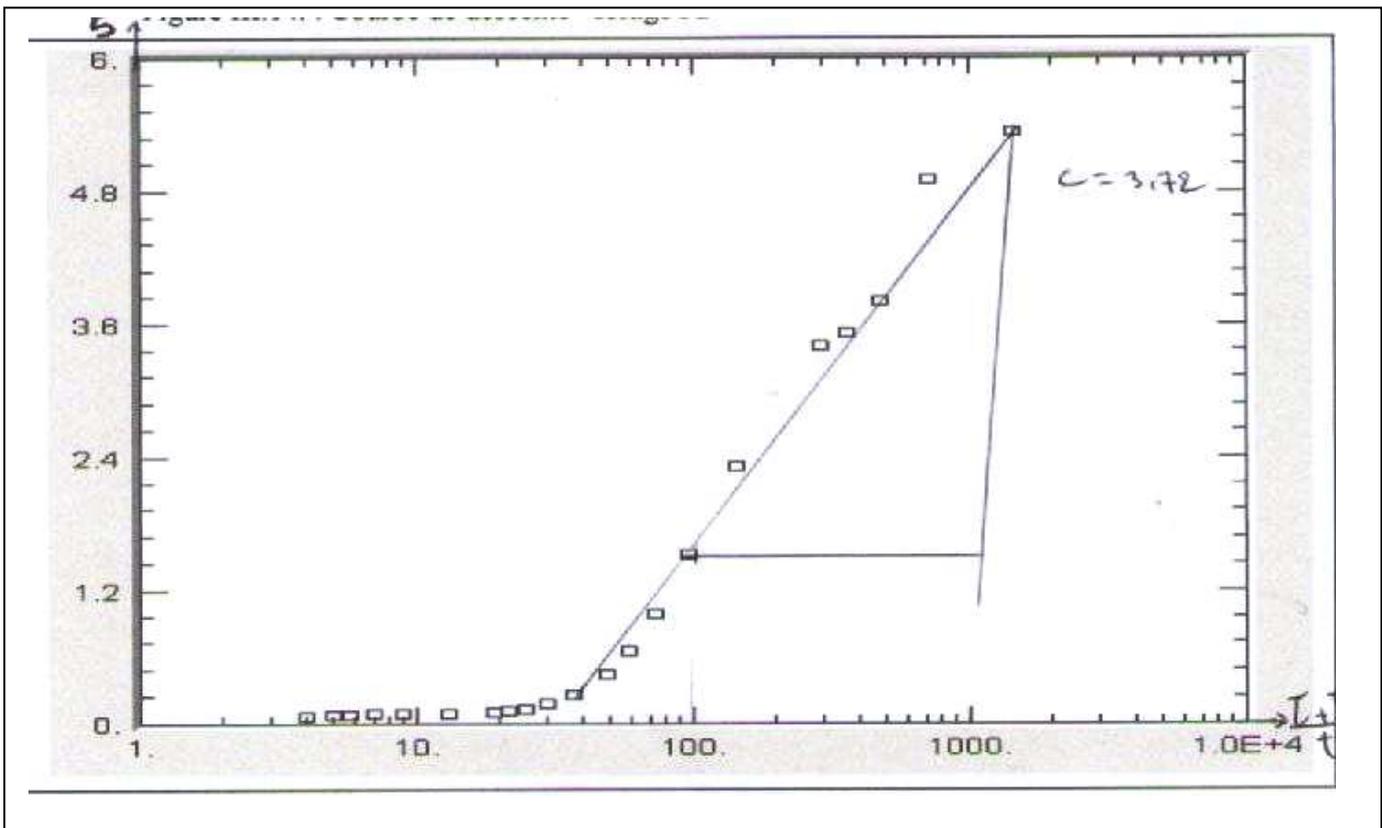


Figure III.14 : Courbe de remontée forage F2

3.3/ Pompage par palier de débits enchainés :

Un essai de pompage par palier consiste à enchaîner une série de débits sans remontées intermédiaires.

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

La méthode d'interprétation consiste à reporter sur un papier semi logarithmique le rabattement spécifique (s/Q) en fonction du temps cumulé depuis le début de pompage

$$C = \frac{0.183}{T} \rightarrow T = \frac{0.183}{C}$$

Application sur le forage 05 :

Le forage F05 atteint une profondeur de 23 m. Il est soumis à un pompage par palier de débit suivant : $Q_1 = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ et $Q_2 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

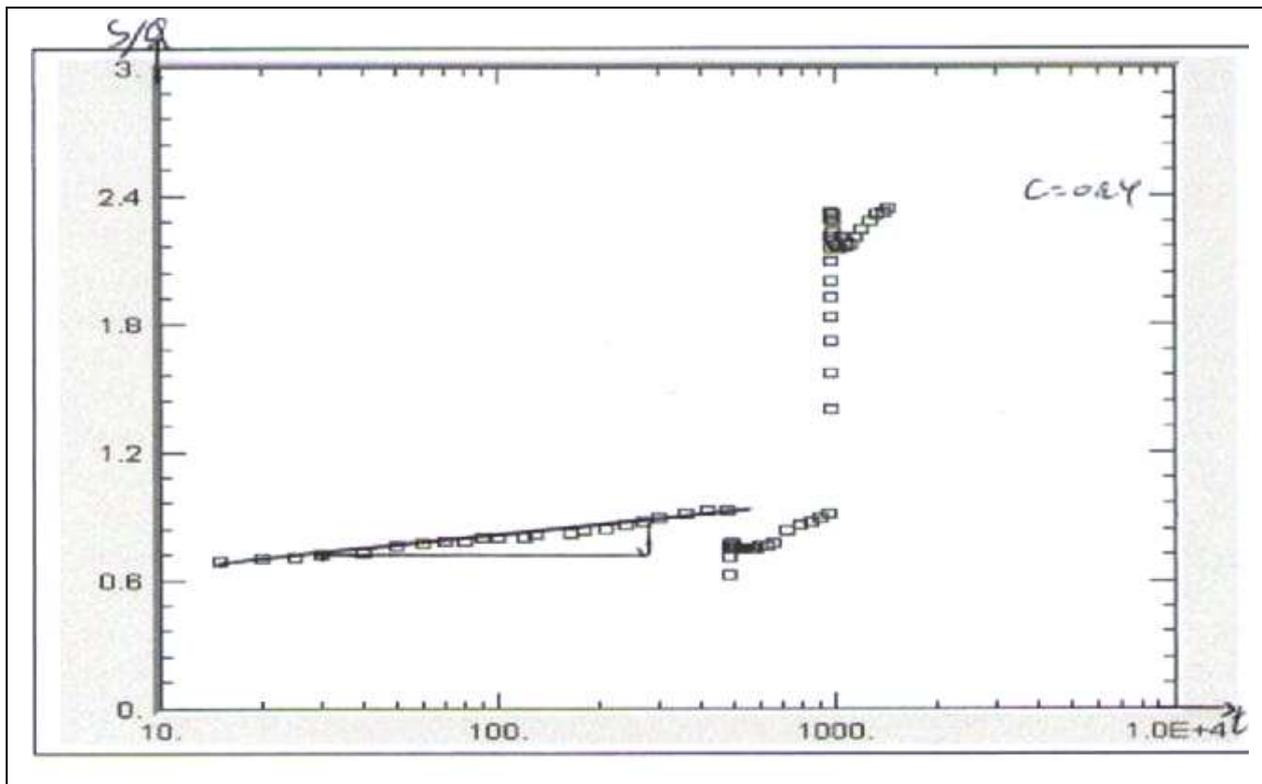


Figure III.15: courbe rabattement spécifique du forage F05 en fonction de temps (Pompage par palier de débits enchainés)

Les valeurs de transmissivité calculées par la méthode d'approximation logarithmique de Jacob pour la descente et la remontée et pompage par palier de débits enchainés sont présentées dans le tableau ci dessous :

Tableau III.1 : les valeurs de transmissivité m^2/s calculées par la méthode d'approximation logarithmique de Jacob.

forage	Débit m^3/s	Pente (descente)	T (descente) m^2/s	pente (remonté)	T (remonté) m^2/s	T m^2/s (palier de débit: $Q1$)
F02	8.10^{-4}	1.15	$1.27.10^{-4}$	3.72	$3.93.10^{-5}$	
F05	$1.5.10^{-3}$	0.1	/	/	/	$1.14.10^{-3}$

Les caractéristiques des nappes inféro-flux du bassin versant d'oued Tamanrasset sont présentées dans le tableau ci dessous

Tableau III .2 : les caractéristiques hydrodynamiques des nappes inféro-flux du bassin versant d'oued Tamanrasset (Gribi.A, Sai.N, Younsi .N : notice explicative de la carte hydrogéologique du Hoggar et des Tassilis).

Nappe	Superficie (km^2)	Profondeur moyen de NS (m)	Epaissier moyenne (m)	Débit moyen d'inféro-flux (l/s)	Transmissivite moyen (m^2/s)	Coef d'emmagasinement moyen
Tamanrasset	5	9	20	15	10^{-3}	5.10^{-3}
Abalessa	16	7	23	60	10^{-2}	/
Amsel	1.6	9	20	/	5.10^{-3}	5.10^{-3}

4/Interprétation de pompage d'essai en milieu fissuré :

Les méthodes d'interprétation dérivées de la solution de Theis, qui suppose l'aquifère homogène, isotrope et d'extension latéral infinie, sont difficilement applicables au milieu fissuré, du fait même de la nature des hypothèses de départ.

Un certain nombre de modèles mathématiques ont été proposées pour résoudre ce problème. Dans la plus part d'entre eux, le milieu aquifère est considéré, (Ph. Leblanc BRGM ; 1986) :

- Soit comme un système à double porosité.
- Soit comme un milieu poreux homogène anisotrope.
- Soit comme un milieu isotrope affecté d'une fracture unique.

4. 1/ Le milieu fissuré est considéré comme un système à double porosité :

L'écoulement des eaux souterraines dans un milieu fracturé peut être très complexe. Certains auteurs (Warren et Root, 1963, Kazemi, 1969, Boulton –Streltsova 1977-1978, Moench, 1984) ont développé des solutions dans lesquelles l'aquifère fracturé est considéré comme étant constitué de deux milieux interactifs : le milieu matriciel de faible perméabilité, de porosité primaire et le milieu fracturé de forte perméabilité et de porosité secondaire (these Houmed Gaba. Abdourahman 2009)

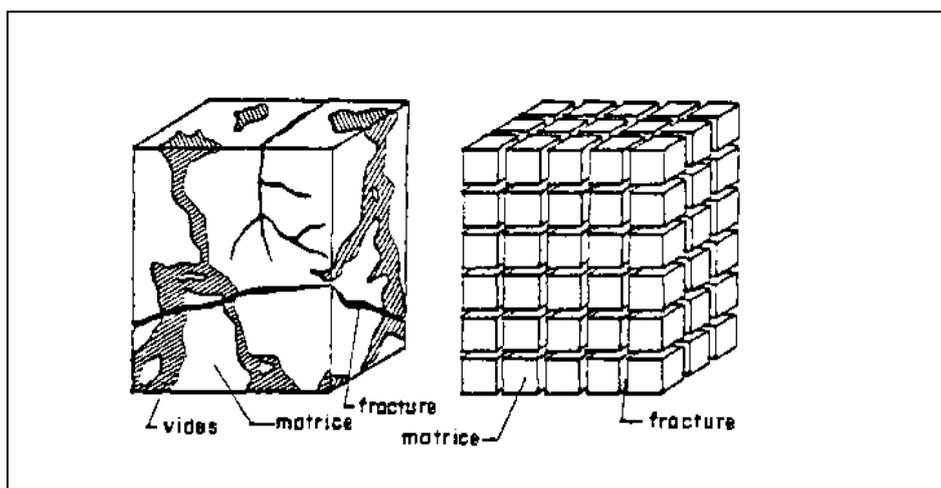


Figure III.16: Modèle à double porosité

Il existe deux principaux types de modèles à double porosité basés sur le type d'écoulement : blocs à fractures, transitoire (Kazemi 1969) ou pseudo permanent (Warren and Root, 1963 ; Moench, 1984).

On présente ci après l'une des solutions du modèle à double porosité qui est la solution de Moench(1984) :

4.1.1/La solution de Moench (1984) : est basée sur les hypothèses suivantes :

- l'aquifère est captif
- son épaisseur est constante
- l'aquifère est d'extension infinie
- l'aquifère est isotrope et homogène
- le pompage capte l'eau circulant dans les fractures
- l'écoulement dans les blocs est perpendiculaire à l'interface bloc-fracture.
- le puits d'observation reflète la charge hydraulique des fractures dans le VER (volume élémentaire représentatif)
- la loi de Darcy s'applique à l'écoulement dans les fractures et dans la matrice

$$S = \frac{Q}{4\pi T} W(r, r_D \gamma, \sigma)$$
$$r_D \gamma = \frac{r}{b'} \sqrt{k'/k}$$
$$\sigma = \frac{r_w}{b'} \sqrt{k'/k}$$

Avec :

r_D : Rayon sans dimension = (r / r_w)

γ : Paramètre d'écoulement entre les deux types de porosités (sans dimension)

k : Conductivité hydraulique du système fractures [LT-1]

k : Conductivité hydraulique des matériaux matriciels [LT-1]

σ : Rapport de l'emmagasinement de la matrice par l'emmagasinement de fractures (sans dimension)

Q : Débit de pompage [L³T⁻¹]

r : Distance radiale [L]

r_w Rayon du puits [L]

b' : Demi-épaisseur des blocs matriciels [L]

T : transmissivité de l'aquifère [L2T-1]

4.2 /Le milieu fissuré est considéré comme un milieu isotrope affecté d'une fissure unique :

Des solutions permettent de représenter le comportement d'un puits de pompage en communication avec une fracture d'épaisseur négligeable, horizontale (Gringarten et Ramey, 1974), verticale (Gringarten et al, 1974), ou inclinée (Cinco et al, 1975).

Ces solutions considèrent des fractures à conductivité infinie, ou à "à flux uniforme" (le débit par unité de surface de fracture est uniforme).

Dans ces différents cas, l'écoulement au début d'un essai à débit constant s'effectue de la matrice vers la fracture et perpendiculairement à celle-ci. La variation de pression au puits est alors proportionnelle à la racine carrée du temps, ce qui se traduit par une ligne droite de pente 0.5 sur un graphique bilogarithmique de module égal.

Au fur et à mesure que l'essai se prolonge, le rabattement devient identique à celui prévu par la solution de Theis, à une constante près qui dépend du point de mesure et de la direction de la fracture.

On cite ci après la solution de Gringarten et al, (1974) qui considère le milieu fissuré comme un milieu isotrope affecté d'une fissure unique verticale.

Cette solution est basée sur les hypothèses suivantes :

- Aquifère homogène, isotrope et d'épaisseur constante sur toute la zone influencée par le pompage
- Aquifère d'extension latérale infinie
- Epente imperméable.
- La libération de l'eau par le milieu poreux, consécutivement à une baisse de pression, est instantanée.
- Puits parfait.
- Rayon de puits négligeable
- Débit pompé constant.

Le puits de pompage est situé au milieu d'une fissure verticale de faible épaisseur par rapport à sa longueur et sa distance au piézomètre (fig.III.17).

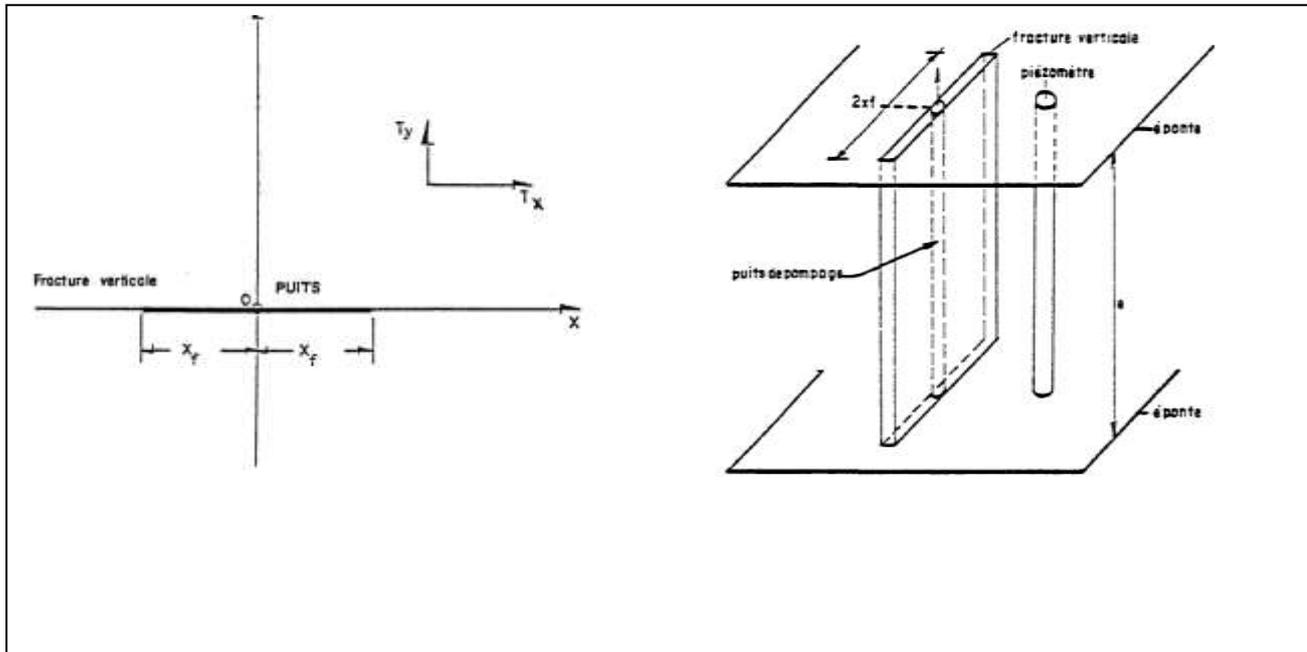


Figure III.17: modèle de fracture verticale

La section horizontale de la fissure est faible et n'induit pas d'effet de capacité sensible. Pour les calculs, on considère que le débit par unité de surface de fracture est constant en tout point, la fissure a une perméabilité équivalente pratiquement infinie.

4.2.1/L'interprétation au puits de pompage (Thiery - Vandenbeusch – Vaubourg, 1983):

Une courbe type construite à partir de variables réduites, illustre l'évolution du rabattement au puits de pompage, en coordonnées bilogarithmiques (fig. III.18).

Le début de l'évolution du rabattement est représenté par une relation de la forme $S = a\sqrt{t}$

En coordonnées bilogarithmique, se traduit par une droite de pente 1/2 .

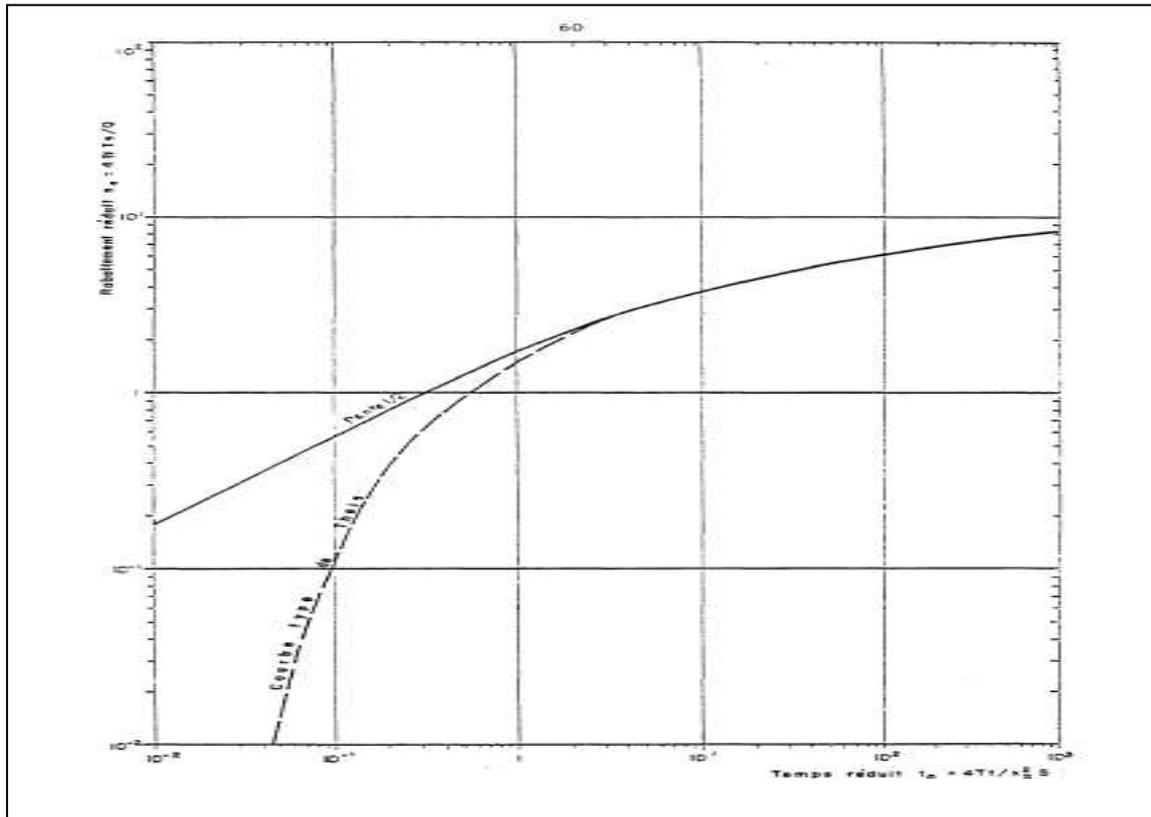


Figure III.18: Courbe type fracture verticale – pompage au centre de la fracture verticale.

Mode opératoire :

Après correction des pertes de charge hydraulique existante, on porte sur un papier bilogarithmique du même module que la courbe -type les rabattements (ou les rabattements corrigés) en fonction de temps (corrigés s’il ya lieu).

On superpose les deux courbe et on choisit un point de coïncidence M qui a des cordonnées suivantes :

$$M \begin{cases} S \\ a \end{cases}$$

Et

$$M_a \begin{cases} S_a \\ t_a \end{cases}$$

Courbe expérimentale

courbe- type

T et S sont calculé par les formule suivante

$$T = \frac{Q}{4\pi} \frac{s_a}{s}$$

$$S \cdot X_f^2 = 4T \frac{t}{t_a}$$

Application sur les forages forage (Machouen) et forage Matnatallet :

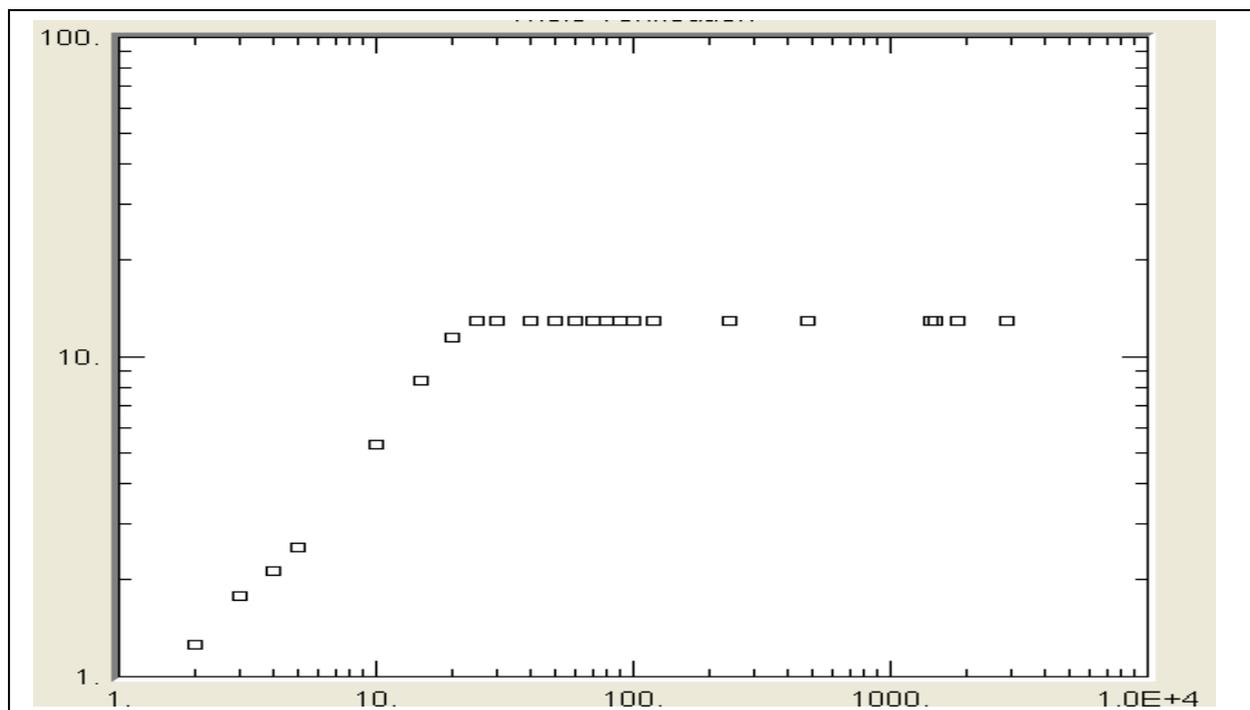


Figure III.19 : courbe de descente du forage Machouen

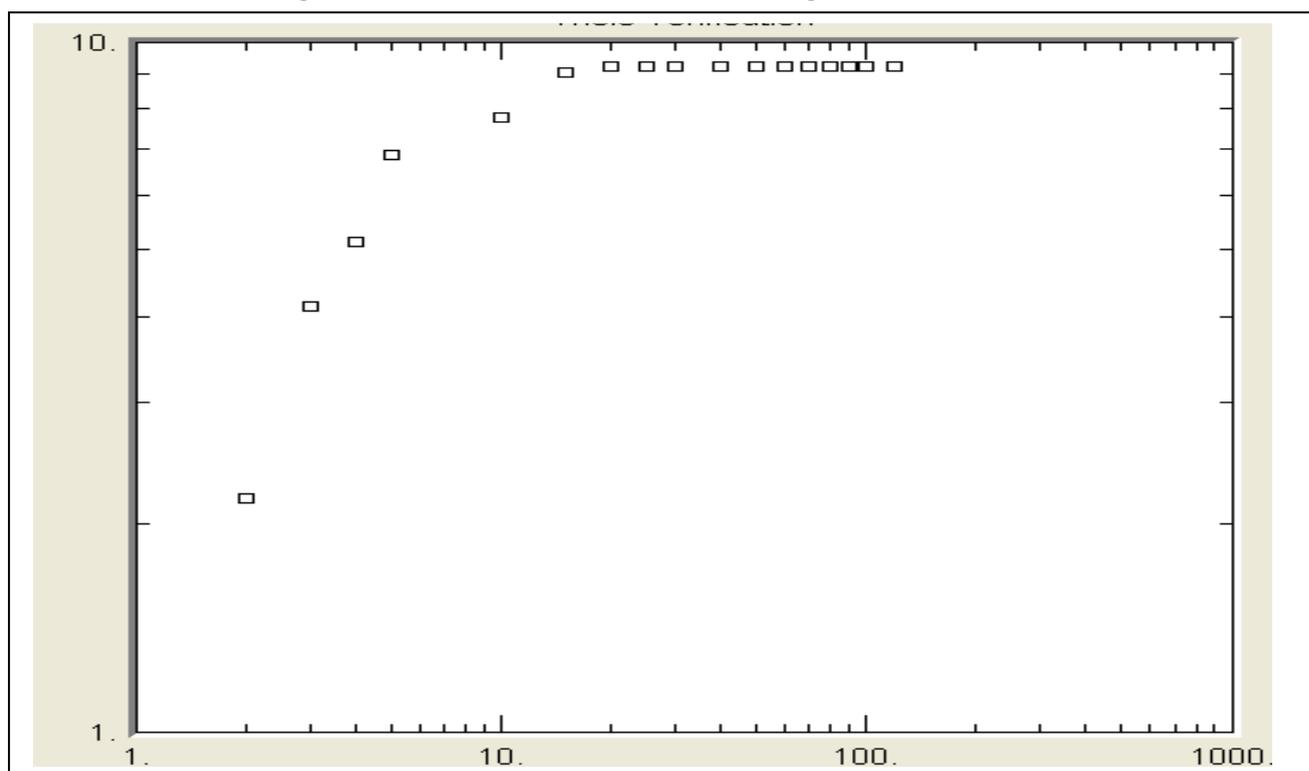


Figure III.20: courbe de descente du forage Matnatallet

Les principes d'application des méthodes d'interprétations cités ci-dessus ne sont pas vérifiés dans notre terrain tel que : éponte imperméable, Aquifère homogène, isotrope et d'épaisseur constante sur toute la zone influencée par le pompage, en plus de l'absence des logs de forages, et des piézomètres d'observation. Donc on ne peut pas interpréter ces courbes.

V /Essai hydraulique

Il existe plusieurs types d'essais, classés par domaine de perméabilité de l'aquifère. L'essai Lefranc est utilisé pour les terrains très perméables (perméabilité de l'ordre de 1.10^{-3} à 1.10^{-5} m/s). L'essai Lugeon est plutôt réservé pour les terrains de perméabilité moyenne à faible (perméabilité de l'ordre de 1.10^{-5} à 1.10^{-8} m/s). Une autre catégorie d'essais est utilisée pour déterminer les très faibles perméabilités. Ceux

Qui sont dérivés de ceux utilisés par les pétroliers : le "slug-test".

Dans le cadre de la réalisation du barrage inféro flux dans l'oued Izerzi (affluent oued Tamanrasset), deux types d'essais hydrauliques (essai de Lefranc et essais Lugeon) ont été effectués par l'entreprise ENHYD, sur les sondages mécaniques qui sont illustrés dans la figure III.21:

1/ Essai LEFRANC :

L'essai Lefranc est utilisé pour mesurer la perméabilité d'interstices de roches meubles. Il consiste à créer une variation de charge, soit par injection, soit par pompage, dans une cavité de dimension connue, réalisée dans le terrain au fond d'un forage. Il peut se faire à charge constante ou à charge variable.

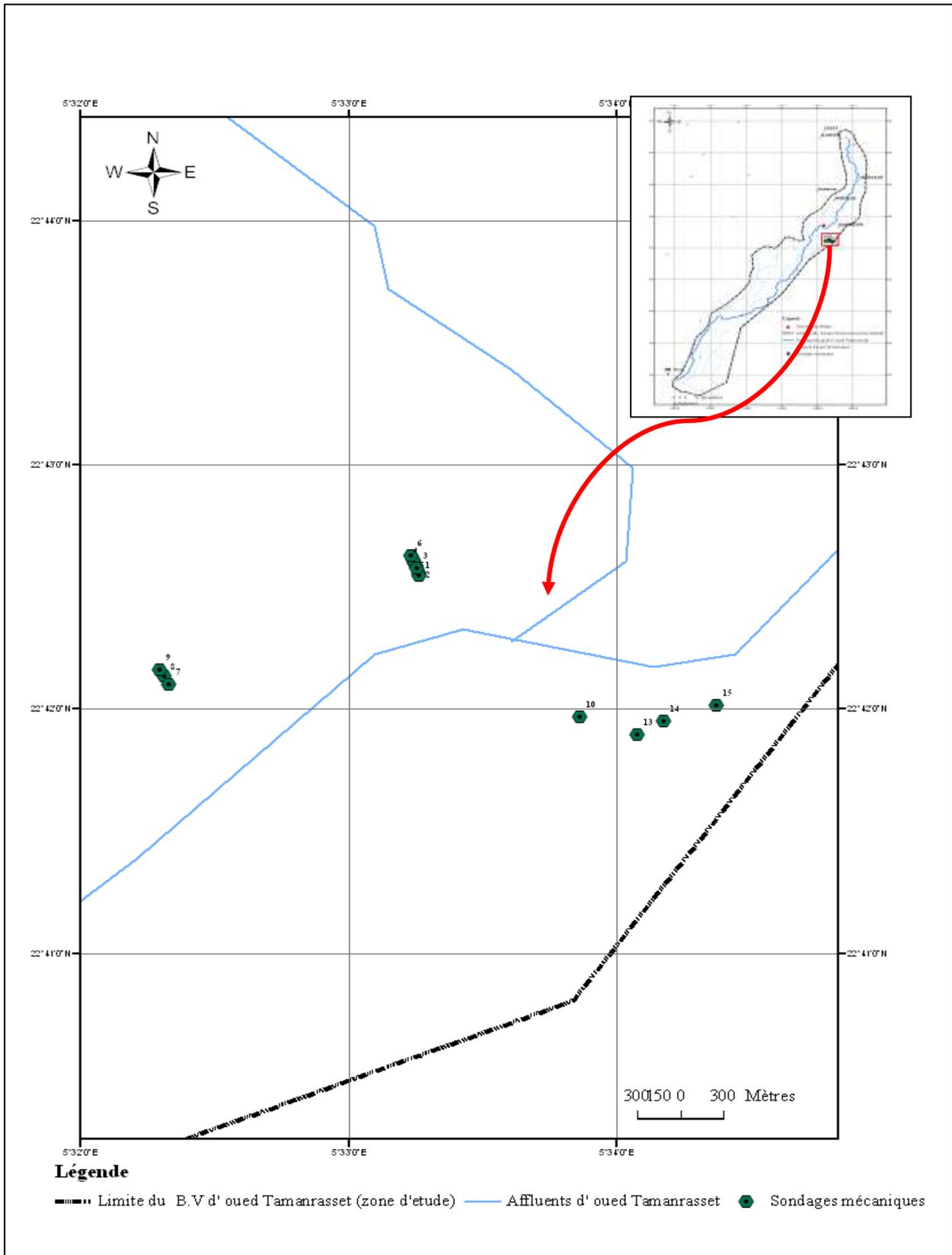


Figure III.21 : localisation des sondages mécaniques d'oued IZERZI

Calcul de la perméabilité :

Quelque soit le type de l'essai Lefranc (injection ou pompage) à charge constante. Le calcul du coefficient de perméabilité s'effectue par l'équation suivante :

$$Q = mkHD \text{ où } k = \frac{Q}{mHD}$$

Avec :

Q : Le débit pompé ou injecté m³/s.

D : Diamètre de la cavité en m.

K : coefficient de perméabilité en m/s

H : La charge H , hauteur de la surverse dans le cas de l'injection, ou valeur du rabattement dans le cas du pompage.

m : Coefficient de forme de la cavité, qui dans le cas d'une cavité cylindrique allongée, a donc pour expression

$$m = \frac{2\pi \frac{L}{D}}{\log\left(\frac{L}{D} + \sqrt{\frac{L^2}{D^2} + 1}\right)}$$

L : La longueur de la cavité.

Lorsque le débit injecté devient trop petit ou le pompage conduit à un épuisement instantané, l'essai Lefranc peut être rattaché à des essais sous charge variable qui sont réalisés dans les terrains à faible perméabilité.

2/ Essai d'absorption :

Il consiste à remplir d'eau le forage maintenu tubé après réalisation de la poche, et mesurer en fonction de temps l'abaissement du niveau d'eau dans la colonne.

Pendant le temps dt , le niveau s'abaisse de dz , le débit qui pénètre dans le sol est :

$$Q = -S \frac{dz}{dt}$$

Où S : désigne la section intérieure de la colonne

z : La hauteur d'eau au temps t .

$$-S \frac{dz}{dt} = mkzD$$

Cette équation permet de déterminer la perméabilité soit numérique soit analytique.

3/ Présentation des données de l'essai Lefranc de l'oued Izerzi :

Sur l'oued Izerzi, l'entreprise ENHYD a réalisé l'essai Lefranc dans les sondages mécaniques suivants : SM1, SM2, SM3, SM5, SM7, SM8 et SM10.

Les fiches techniques des essais Lefranc sont en annexe II, et les coefficients de perméabilité sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.3 : valeurs de la perméabilité des essais Lefranc

	SM1	SM2	SM3	SM5	SM7	SM8	SM10
k m/s (charge constante)	$2.89 \cdot 10^{-05}$	$2.69 \cdot 10^{-05}$	$5.10 \cdot 10^{-05}$	$1.36 \cdot 10^{-04}$	$4.30 \cdot 10^{-05}$	$1.40 \cdot 10^{-04}$	$1.44 \cdot 10^{-04}$
k m/s (charge variable)	$5.44 \cdot 10^{-06}$	$3.76 \cdot 10^{-06}$	$2.92 \cdot 10^{-06}$	$9.73 \cdot 10^{-06}$	$5.48 \cdot 10^{-06}$	$6.48 \cdot 10^{-06}$	$1.13 \cdot 10^{-06}$

Les valeurs des perméabilités déterminées par l'essai Lefranc sont faibles et présentent une hétérogénéité assez importante.

4/ Essai Lugeon :

L'essai Lugeon est un essai in situ destiné à évaluer la possibilité de circulation d'eau dans la roche et à détecter des hétérogénéités ou de la fissuration. Il consiste à injecter de l'eau dans un forage sous différents paliers de pression pendant des pas de temps constants afin de déduire la perméabilité.

4.1/ Interprétation de l'essai Lugeon :

Pour l'interprétation des essais Lugeon, les courbes des débits en fonction des pressions ($Q = f(p)$), ascendantes et pressions descendantes ont été construites (différentes formes théoriques de courbes d'essais Lugeon ont été présentées en annexe II).

Le résultat de l'essai Lugeon se traduit par un paramètre d'absorption d'eau qui s'exprime en unité Lugeon (N) qui correspond à l'absorption d'un débit de 1 litre par minute injecté dans un tronçon de forage de 1m sous une pression de 1MPa (unité Lugeon représenté approximativement une perméabilité de 10^{-7} m/s).

Si la longueur L de la passe d'essai est supérieure à 1 mètre, le nombre de Lugeons est :

$$n = \frac{Q}{L}$$

Avec :

Q : Débit en l/min injecté sous 1Mpa.

L : Longueur de la passe.

Si la longueur L de la passe d'essai $L \leq 1,00$ mètre :

$$n = \frac{m_0}{m} Q$$

m_0 : Coefficient de cavité d'un tronçon d'un forage de 1.00 m correspond à un débit Q_0

m : Coefficient de cavité d'un tronçon du forage qui correspond un débit Q injecté sous un 1MPa.

4.2/Présentation des données de l'essai Lugeon de l'oued Izerzi :

Dix essais Lugeon ont été réalisés Dans l'oued (Izerzi) SM1, SM2, SM3, SM4, SM5, SM6 SM8. SM9, SM10. Les coupes de sondages, les données des essais et les graphiques de débit /pression sont en annexe II .

Les valeurs des unités Lugeon sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III. 4 : Les valeurs des unités Lugeon et les perméabilités correspondantes

	SM1	SM1	SM2	SM3	SM4	SM5	SM6	SM8	SM9	SM10
<i>n</i> lugeons	25.87	76.52	41.85	37.34	28.18	12.17	14.65	2.14	10.67	6.54
<i>k</i> m/s	$25.87 \cdot 10^{-07}$	$76.52 \cdot 10^{-07}$	$41.85 \cdot 10^{-07}$	$37.34 \cdot 10^{-07}$	$28.18 \cdot 10^{-07}$	$12.17 \cdot 10^{-07}$	$14.65 \cdot 10^{-07}$	$2.14 \cdot 10^{-07}$	$10.67 \cdot 10^{-07}$	$6.54 \cdot 10^{-07}$

5/ Discussions des résultats de paramètres hydrodynamiques (Tableau III. 5):

Les valeurs de transmissivité obtenues par l'approximation logarithmique de Jacob sont peu représentatives (sous estimées ou sur estimées) à causes des conditions d'application de cette méthode qui ne sont pas vérifiées. La comparaison entre les valeurs du T de forage F 02 et F 05 et les valeurs de transmissivité de quelques nappes inféro-flux (voir le tableau III.2) montre que les transmissivités calculées sont faibles par rapport aux transmissivités de ces nappes.

Peu de données de pompage en milieu fracturé et méconnaissance de la structure de l'aquifère fissuré (caractéristiques des discontinuités). Ainsi les conditions d'application des méthodes d'interprétation des essais de pompage spécifiques au milieu fissuré, qui ne sont pas vérifiées dans l'aquifère des gneiss de Tamanrasset, ne permettent pas de déterminer la transmissivité et l'emmagasinement de cet aquifère.

Les valeurs des perméabilités des alluvions obtenues par l'essai Lefranc sont faibles et hétérogènes. Elles oscillent entre $1.13 \cdot 10^{-06}$ à $1.44 \cdot 10^{-04}$ m/s.

Les résultats des essais Lugeon montre des valeurs des perméabilités qui sont homogènes (comprises entre $2.14 \cdot 10^{-07}$ et $76.52 \cdot 10^{-07}$) et représentatives du milieu fissuré mais elles restent ponctuelles et ne peuvent être généralisées à tout l'aquifère fissuré.

Tableau III.5 : les valeurs des T (m²/s) et k m/s des différentes essais utilisés pour la caractérisation hydrodynamique de l'aquifère des alluvions et l'aquifère du gneiss de Tamanrasset

Forages et sondages	Pompage d'essais		Essai Lefranc		Essai Lugeon	
	T m ² /s	K m/s	K m/s charge constant	K m/s charge variable	n Lugeon	K m/s correspondantes
F02 (descente)	1.27.10 ⁻⁴	5.08.10 ⁻⁶	/	/	/	/
F02 (remonté)	3.93 .10 ⁻⁵	1.57.10 ⁻⁶				
F05	1.14.10 ⁻³	4.95.10 ⁻⁵	/	/	/	/
SM1	/	/	2.89 .10 ⁻⁰⁵	5.44 .10 ⁻⁰⁶	25.87	25.87.10 ⁻⁰⁷
SM1	/	/	/	/	76.52	76.52.10 ⁻⁰⁷
SM2	/	/	2.69 .10 ⁻⁰⁵	3.76 .10 ⁻⁰⁶	41.85	41.85.10 ⁻⁰⁷
SM3	/	/	5.10 .10 ⁻⁰⁵	2.92 .10 ⁻⁰⁶	37.34	37.34.10 ⁻⁰⁷
SM4	/	/	/	/	28.18	28.18.10 ⁻⁰⁷
SM5	/	/	1.36 .10 ⁻⁰⁴	9.73.10 ⁻⁰⁶	12.17	12.17.10 ⁻⁰⁷
SM6	/	/	/	/	14.65	14.65.10 ⁻⁰⁷
SM7	/	/	4.30 .10 ⁻⁰⁵	5.48.10 ⁻⁰⁶	/	/
SM8	/	/	1.40 .10 ⁻⁰⁴	6.48 .10 ⁻⁰⁶	2.14	2.14..10 ⁻⁰⁷
SM9	/	/	/	/	10.67	10.67.10 ⁻⁰⁷
SM10	/	/	1.44 .10 ⁻⁰⁴	1.13.10 ⁻⁰⁶	6.54	6.54.10 ⁻⁰⁷

VI/ Conclusion :

La caractérisation hydrogéologique des aquifères permet de déduire que :

Les directions d'écoulements ont le même sens que ceux des oueds. Ces derniers suivent les directions des grands accidents tectoniques NNW –SSE, NE –SW et E-W.

La limite nord du bassin versant où culmine le relief à 2900m d'altitude et les précipitations annuelles dépassent 100 mm considéré comme une limite à flux entrant.

L'absence des données de pompages et de piézométrie à grande échelle ne permettent pas de déterminer si la nappe des alluvions et la nappe des gneiss altéré/fissuré sont isolées ou reliées.

Chapitre IV :
*Etude hydrochimique et
isotopique des eaux
souterraines de Tamanrasset*

I/Introduction :

Ce chapitre porte sur l'étude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de l'aquifère des alluvions et de l'aquifère des gneiss altérés/fissurés. Celle-ci vise à déterminer la qualité des eaux de chaque niveau et d'en définir leur degré de connexion et leurs conditions d'alimentation.

Cette étude est basée sur les données des analyses chimiques provenant de la direction de l'hydraulique de la Wilaya de Tamanrasset et l'Algérienne des eaux, ainsi que les données de l'étude d'O. SAIGHI J.L. MICHELOT et A. FILLY (2001) effectuée sur les eaux de Hoggar.

1/Etude Hydrochimique sur les eaux du Hoggar

L'étude d'O. SAIGHI J.L. MICHELOT et A. FILLY (2001) sur les eaux de Hoggar, montre que la chimie des eaux souterraines de l'Ahaggar est généralement caractérisée par une faible minéralisation d'environ 0,5 g / l. Cependant, il est à noter une augmentation de ces concentrations avec la profondeur, présentée par une stratification des types hydro-chimiques, où trois groupes fondamentaux peuvent être reconnus:

- Le premier groupe correspond à la nappe peu profonde de la couche alluviale. Il est caractérisé par une faible minéralisation (0,2 - 0,3 mg / l), ce type chimique est homogène dans l'ensemble de cette nappe et traduit le bon mélange des eaux.
- Le deuxième groupe des eaux souterraines de l'aquifère de la zone altérée est caractérisé par la prédominance de bicarbonates. Leur salinité est plus importante, environ 0,8 g / l. Il est le reflet de la zone de mélange entre les récentes précipitations et l'eau fossile.
- Le troisième groupe représente l'aquifère profond d'origine paléo-recharge. Il est caractérisé par une grande salinité, comprise entre 1500-3000 mg / l. Il montre le reflet de la longue interaction entre l'eau et la roche (tableau IV.1).

Tableau IV.1 : concentration chimique moyenne en mg/l de l'eau souterraine des Hoggar (O. SAIGHI J.L. MICHELOT, A. FILLY 2001).

type d'aquifère	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+, K^+	Cl^-	SO_4^{-2}	HCO_3^-	NO_3^-	S . E . C (uS)	PH	
Aquifère des alluvions	40	15	15	3	20	30	165	20	300	7.5
Aquifère de la zone altérée	75	22	75	10	20	50	450	10	800	6.5
aquifère de socle fissuré	154	125	107	1	400	427	153	3	1400	8.2

2/ Diagramme de Piper des eaux souterraines du Hoggar : la figure (Figure IV.1) présente le diagramme de Piper des eaux souterraines de certains échantillons provenant de différents aquifères du Hoggar.

- Les eaux souterraines peu profondes de l'aquifère des alluvions sont caractérisées par un faciès bicarbonaté calcique.
- L'aquifère de la zone altérée présente plusieurs types d'eau, en fonction de la variation de la composition minéralogique des roches. Cependant, il présente une certaine analogie avec le type précédent.
- Les eaux souterraines de l'aquifère de socle fissuré présentent un faciès d'eau chloruré sulfaté calciques, elles représentent l'eau de formation ancienne, partiellement soumis à l'évaporation et un temps de séjour long.

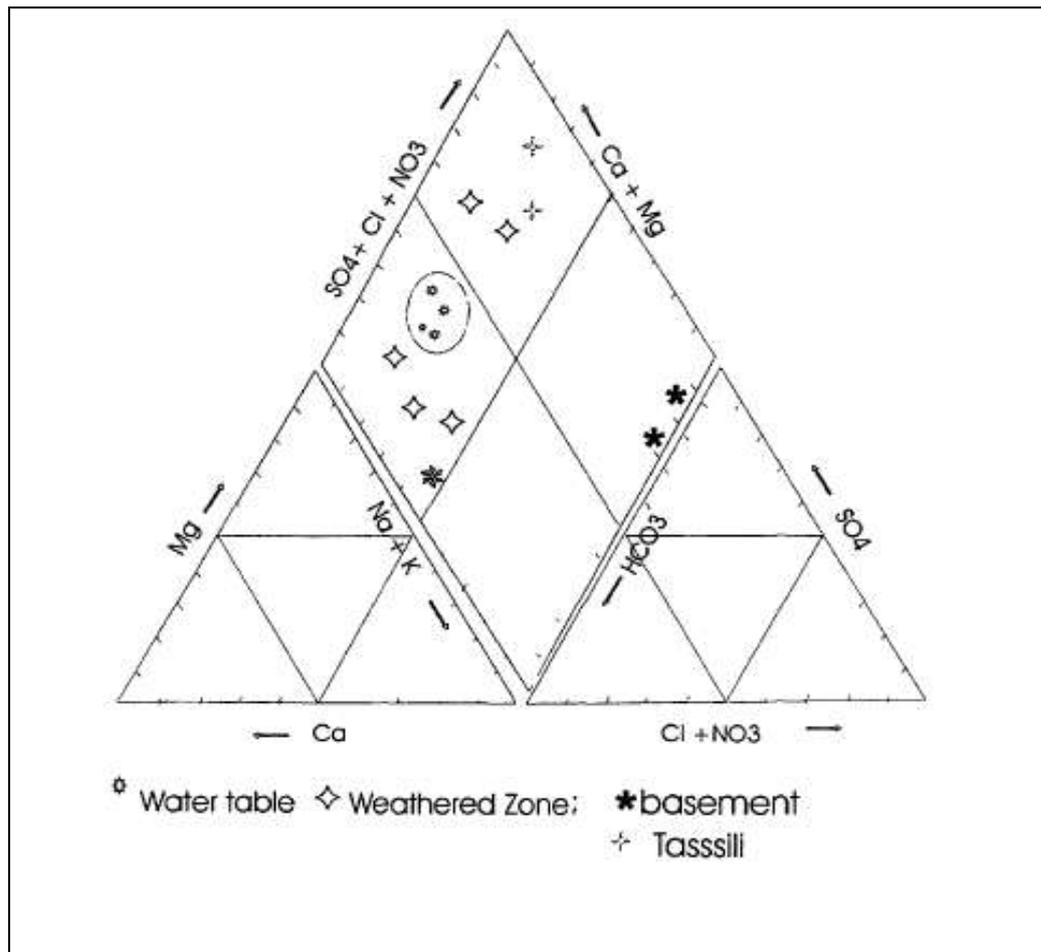


Figure IV .1 : diagramme de Piper de compositions chimique moyenne des eaux souterraines du Hoggar (O. SAIGHI J.L. MICHELOT, A. FILLY 2001)

II/ Etude Hydrochimique des eaux de la région de Tamanrasset:

L'étude hydrochimique porte sur les paramètres physico- chimiques des eaux, tels que la température, le PH, la conductivité électrique et les éléments chimiques majeurs suivants, anions (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) et cations (Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2}).

Les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés dans le tableau ci-après et les points des prélèvements sont présentés dans la figure IV. 2.

Tableau IV.2 : les analyses physico-chimiques des quelques forages et puits de Tamanrasset

Puits	T	PH	Cond	Silice	Nitrate
	°c		µs/cm		
F13	27,3	6,32	948	65	4,9
Source Chapuis(2001)	22,3	5,75	724	74	5,9
Source Chapuis(2004)	23.3	5.59	633	51.7	9.11
F12(2001)	27,3	6,15	1698	79	7,6
F12(1999)	25.7	7.82	314		
P Bamoune	26,8	7,29	1747		>146
P Elmahdi	24	7,56	1220		100
P Ouarden	27	7,25	2,13ms/cm		>146
P Messalem	24,4	7,29	1877		>146
P Kacemi	23,5	7,25	1954		>146
Amsel APE	24.7	6.52	399		

1/Paramètres physico-chimiques :

1.1/La température :

Les températures mesurées dans ces points varient entre 22°C et 27°C. Ces températures sont élevées et supérieures à la température moyenne annuelle de la région de Tamanrasset 22.50°C.

1.2/Conductivité électrique :

La conductivité électrique donne une idée sur la minéralisation des eaux. Les valeurs de la conductivité électrique mesurée présentent une grande hétérogénéité, elles varient entre 314 µS/cm et 2.13 mS/cm. Cette grande variation peut être liée au fait que les échantillons mesurés ne représentent pas le même niveau aquifère ou bien en fonction de la saison (avant et après les crues). Entre 1999 et 2001 la conductivité électrique du forage F12 passe de 314 µS/cm à 1698 µS/cm

1.3/Le pH :

Le pH des eaux souterraines varie entre 5.75 à 7.82. Il varie en fonction du type d'aquifère et ainsi en fonction de la recharge que reçoit ces aquifères. Le PH de forage F12 passe de 7.82 à 6.15 entre 1999-2001.

2/Facies chimiques des eaux :

Pour avoir une vue sur la classification des eaux souterraines nous représentons les échantillons d'eau (Les forages de prélèvement de ces échantillons sont indiqués dans la figure IV.2) des aquifères sur le diagramme Piper et sur le diagramme semi-logarithmique de Shoeller-Berkalof.

2.1/Diagramme de Piper des eaux du Tamanrasset:

Le diagramme de piper montre que la majorité des échantillons appartient au faciès bicarbonaté calcique (fig. IV .4). Selon (O. SAIGHI J.L. MICHELOT, A. FILLY 2001) ce faciès correspond aux eaux de la nappe des alluvions et les eaux de la tranche altérée.

On remarque que les forages F14, F14a, F14b, forage sorro, F2 matnatallet montre une homogénéisation dans leurs concentration, les eaux échantillonnées de ces forages peuvent être considérées comme des eaux de la nappe alluviale. Les autres forages qui présentent le faciès bicarbonate calcique, faciès chlorure sulfaté et carbonaté sodique potassique constituent les eaux de la tranche altéré qui est caractérisée par plusieurs faciès, qui peut être expliqué par la variation de la composition minéralogique de la roche mère.

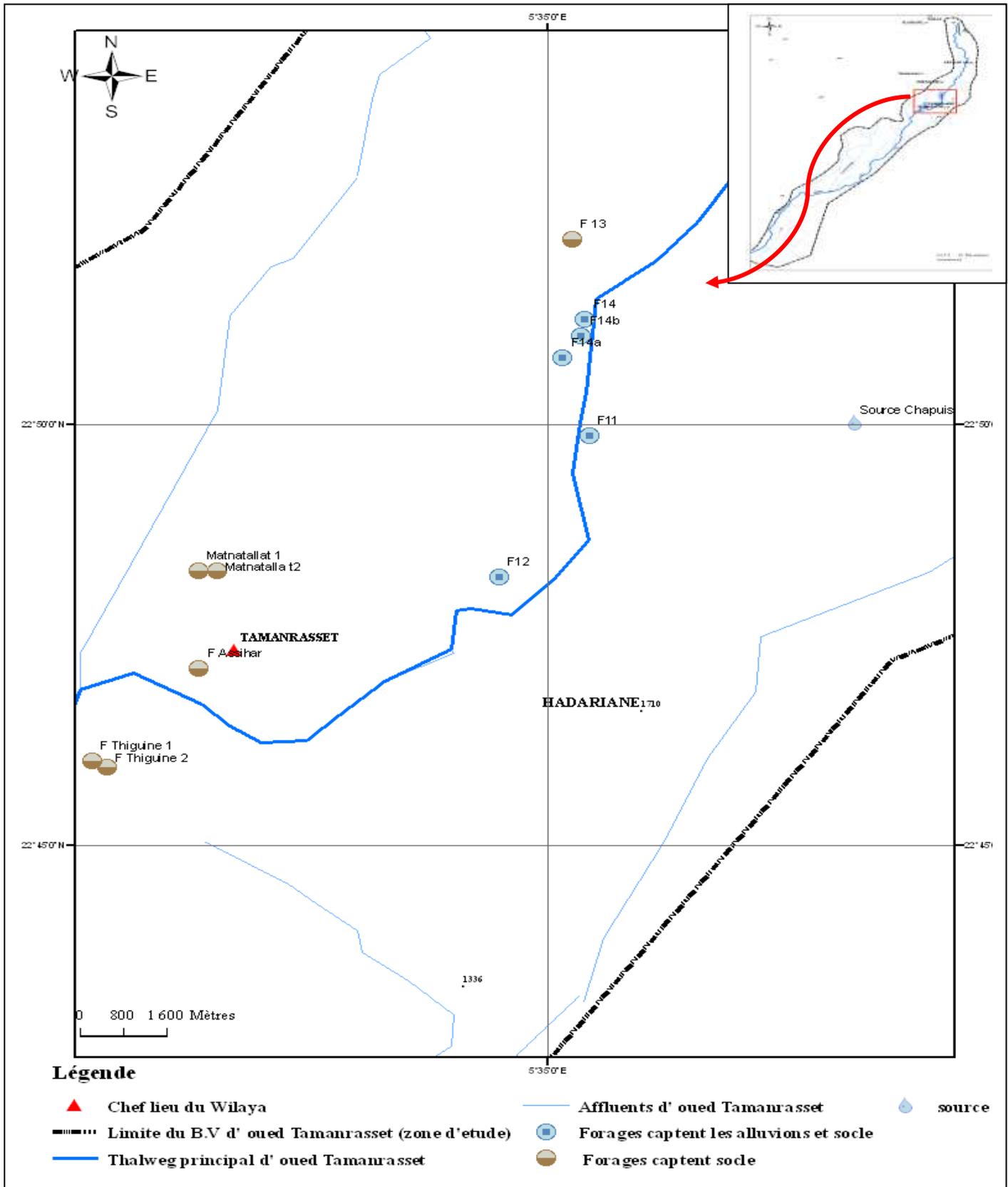


Figure IV.2: situation des forages des analyses des échantillons des eaux souterraines prélevés.

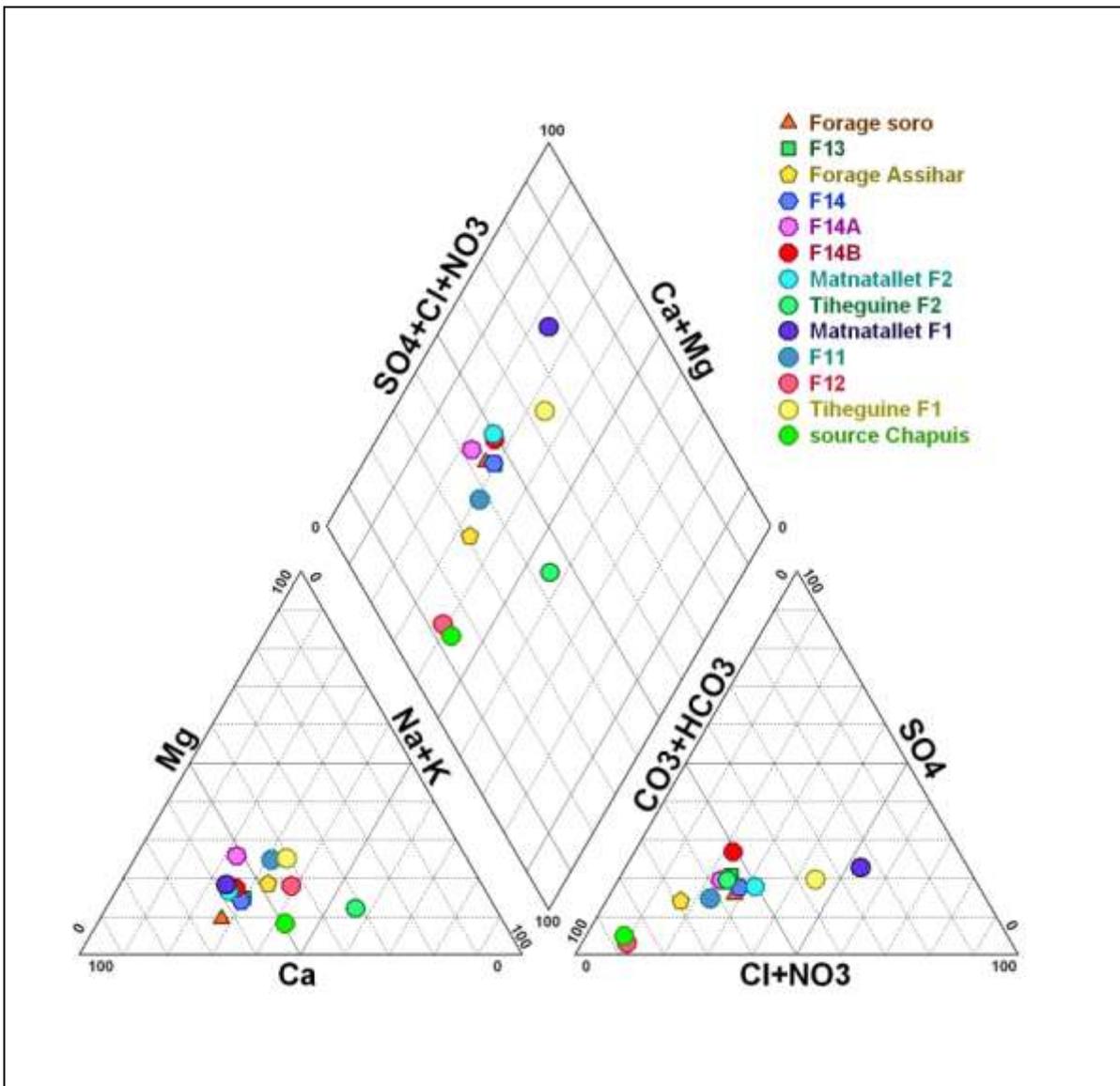


Figure IV.3 : diagramme de Piper des eaux du Tamanrasset.

2.2/ Représentation graphiques des eaux souterraines de Tamanrasset selon Shoeller-Berkaloff

L'allure graphique du diagramme de Shoeller-Berkaloff obtenu montre que le bicarbonate est le pôle prédominant suivi par le calcium dans la majorité des échantillons (fig. IV .4).

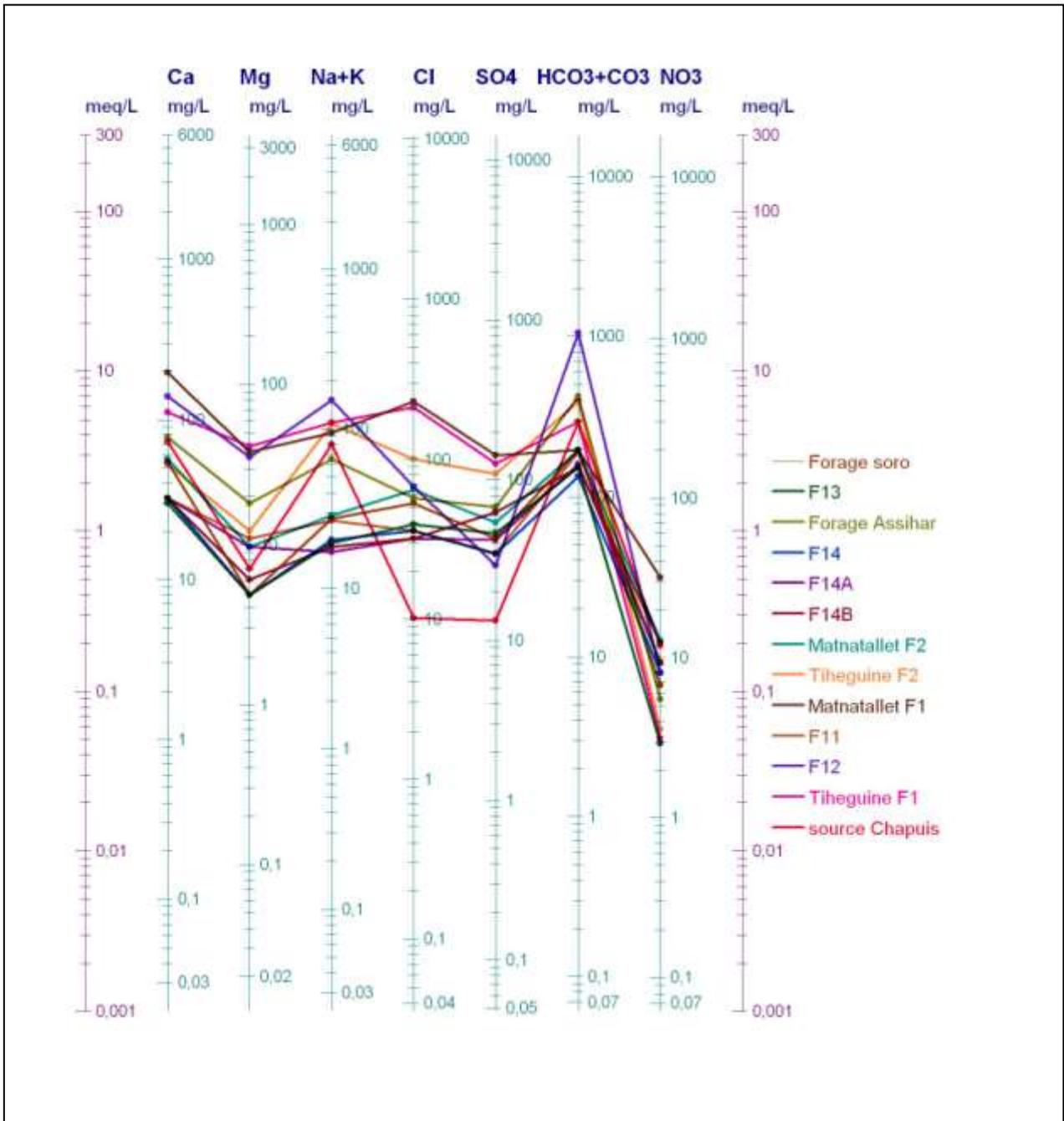


Figure IV.4 : diagramme Shoeller-Berkalof des eaux.

3/ Qualité chimique des eaux de Tamanrasset (potabilité) :

La qualité chimique des eaux a été déterminée en utilisant les normes fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S) et en estimant le degré hydrométrique (d°h)

3.1/Potabilité de l'eau selon l'OMS :

L'OMS a fixé des normes internationales de concentration en éléments chimiques pour définir la potabilité des eaux et leur qualité en vue de l'utilisation à des fins domestique et de l'irrigation.

Le tableau suivant montre les normes de l'OMS

Tableau IV .3 : potabilité de l'eau selon L'OMS.

Norme admissible par l'OMS (mg/l)	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^{+} ,	K^{+}	Cl^{-}	SO_4^{-2}	NO_3^{-}
	150	50	150	12	200	250	50

3.2/La dureté ou le degré hydrométrique (d°h) :

La potabilité chimique d'une eau a été déterminé suivant la dureté ou titre hydrométrique qui correspond à la somme des concentrations en Ca^{+2} et Mg^{+2} .

$$d^{\circ}h = Ca^{+2} + Mg^{+2} \text{ (en meq/l)}. \text{ O\`u: } d^{\circ}h = (Ca^{+2} + Mg^{+2}) \times 5 \text{ (degr\`e fran\`cais : d\`o F)}.$$

Le tableau suivant montre la potabilité selon la dureté :

Tableau IV .4 : potabilité de l'eau en fonction de la dureté.

d° F	0 - 7	7 - 22	22 - 32	32 - 54	> 54
Qualité de l'eau	Douce	Modérément douce	Assez douce	dure	Très dure

L'examen de tableau ci-dessus et le tableau des analyses chimiques (annexe. III) montre que le forage matnatallet F01 a des teneurs en calcium et en chlore supérieur à la norme maximale admissible. Le forage Tihiguine a une teneur en chlore supérieur à la norme maximale admissible, et son degré hydrométrique très dure. La source chapuis présente une teneur en potassium supérieure à la norme maximale admissible

Les puits agricoles présentent un taux au nitrate très élevé

III/ Etude isotopique des eaux du Hoggar :

1/Isotope stable de l'eau :

Généralités :

Les isotopes stables (deutérium et oxygene18) sont utilisés comme des traceurs en hydrogéologie. Des fractionnements isotopiques interviennent lors des changements de phase : condensation et évaporation.

Les fractions isotopiques dépendent de la température, de la latitude, de l'altitude et de la continentalité.

Le rapport O^{18}/O^{16} permet de déterminer les processus de recharge des eaux et les conditions climatiques les accompagnants. Les mélanges entre des eaux d'origine différentes peuvent aussi être mis en évidence par le rapport O^{18}/O^{16} . Combinés avec les analyses chimiques, l'oxygène peut fournir des informations sur les processus d'acquisition de la salinité des eaux.

Le deutérium est généralement utilisé en même temps que l'oxygene18. Dans les précipitations les teneurs en O_{18} et en deutérium sont fonction linéaire de la température de condensation.

Les teneurs en isotope stables (^{18}O et 2H) des précipitations n'ayant pas subi d'évaporation, sont lie par une loi empirique dite droite météorique mondiale(DMM) déterminée par la relation

$$\delta H^2 = \delta \delta O^{18} + d \text{ (Craig, 1961)}$$

d : est l'excès en deutérium, et prend une valeur égale à 10 en régime océanique non perturbé.

Lorsqu'une partie des précipitations est reprise par l'évaporation, la relation linéaire entre l'oxygène O_{18} et le deutérium se présente avec des pentes faibles comprises entre 4 et 5 (fontes ,1974).

Les teneurs des isotopes 2H et ^{18}O sont extrêmement faibles, on les note par la lettre δ exprimée en part pour milles‰.

Les teneurs isotopiques δ expriment la différence entre le rapport isotopique d'un élément E (R_E) et celui d'un étalon de référence connu.

δ : est défini comme suit :

$$\delta E = \left(\frac{RE}{Rét} - 1 \right) * 1000$$

$\delta > 0$ signifie un enrichissement en isotope lourd par rapport à l'étalon.

$\delta < 0$ Traduit un appauvrissement en isotope lourd par rapport à l'étalon.

L'étalon correspond à la composition isotopique moyenne des eaux océaniques SMOW (Standard Mean Ocean Water) ayant pour définition une valeur égale à 0 ‰ vs SMOW (Craig 1961).

2/Teneurs isotopiques des eaux souterraines du Hoggar :

La composition isotopique des eaux souterraines du Hoggar est en annexe III et la composition isotopique moyenne est présentée dans le tableau suivant :

Tableau IV .5: la teneur moyenne d'Oxygene18, ¹³C, ¹⁴C, ³H des eaux souterraines du Hoggar

Aquifère	Oxygene18 (‰)	¹³ C (‰)	¹⁴ C (pmc)	³ H(UT)
Aquifère des alluvions	≈-2.7	-11	115	15
Aquifère de la zone altérée	-5	-5 à -2	≈75	50 à120
Aquifère de socle	-10	-3	<3	<1

Les teneurs isotopiques montrent une stratification horizontale, soulignée par l'abaissement des isotopes lourds en fonction de la profondeur et de la nature lithologique de l'aquifère. Les valeurs isotopiques permettent de regrouper les eaux souterraines en trois groupes.

Le premier groupe présente les eaux souterraines riches en isotope $\delta^{18}O \approx 2.7\%$, qui correspond au eaux souterraines les plus récentes constituées par les eaux de l'aquifère alluvial. La concentration de tritium varie entre 8-16 TU. Les valeurs du ¹⁴C est (110-115)

pmc). Elle est similaire aux valeurs des récentes précipitations. Ces résultats confirment que les eaux souterraines de la nappe des alluvions sont régulièrement rechargées par les inondations d'oued.

Le deuxième groupe les eaux souterraines de la tranche altérée : les teneurs isotopiques de ce niveau sont les suivantes : $\delta^{18}\text{O} \approx -4.2\text{‰}$, et $^3\text{H} \approx 80 \text{ TU}$. Ces résultats indiquent que la zone altérée est connectée avec les alluvions mais elle est caractérisée par une faible perméabilité et légèrement rechargée.

Le troisième groupe représente les eaux souterraines profondes de socle et les eaux de Tassili. Elles sont très appauvries en isotope $\delta^{18}\text{O} \approx -10\text{‰}$ et se démarquent de la précipitation récente. En outre l'absence de ^3H et l'activité ^{14}C prouvé que ces eaux sont des eaux fossiles, résultant d'une paléo-recharge au cours du dernier épisode humide Holocène. L'aquifère qui contient ces eaux est considéré comme un aquifère non rechargé à très faiblement rechargé.

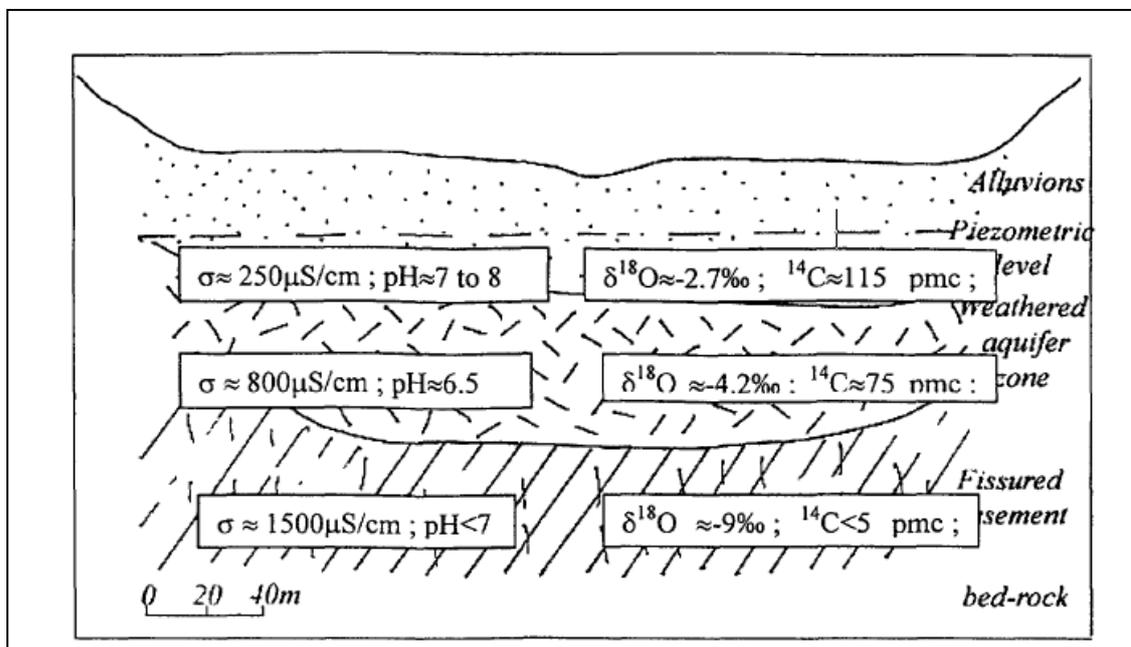


Figure IV.5 : profile chimique et isotopique des aquifères du Hoggar (O. SAIGHI J.L. MICHELOT, A. FILLY 2001)

La Figure IV.6 représente la relation entre $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ montre que les données isotopiques des eaux souterraines du Hoggar se diffusent sur le long de la droite d'eau météorique mondiale selon le type d'aquifère. Elle montre une différence substantielle entre les teneurs isotopiques de l'eau du socle fissuré, l'eau de l'aquifère altéré et la nappe alluviale.

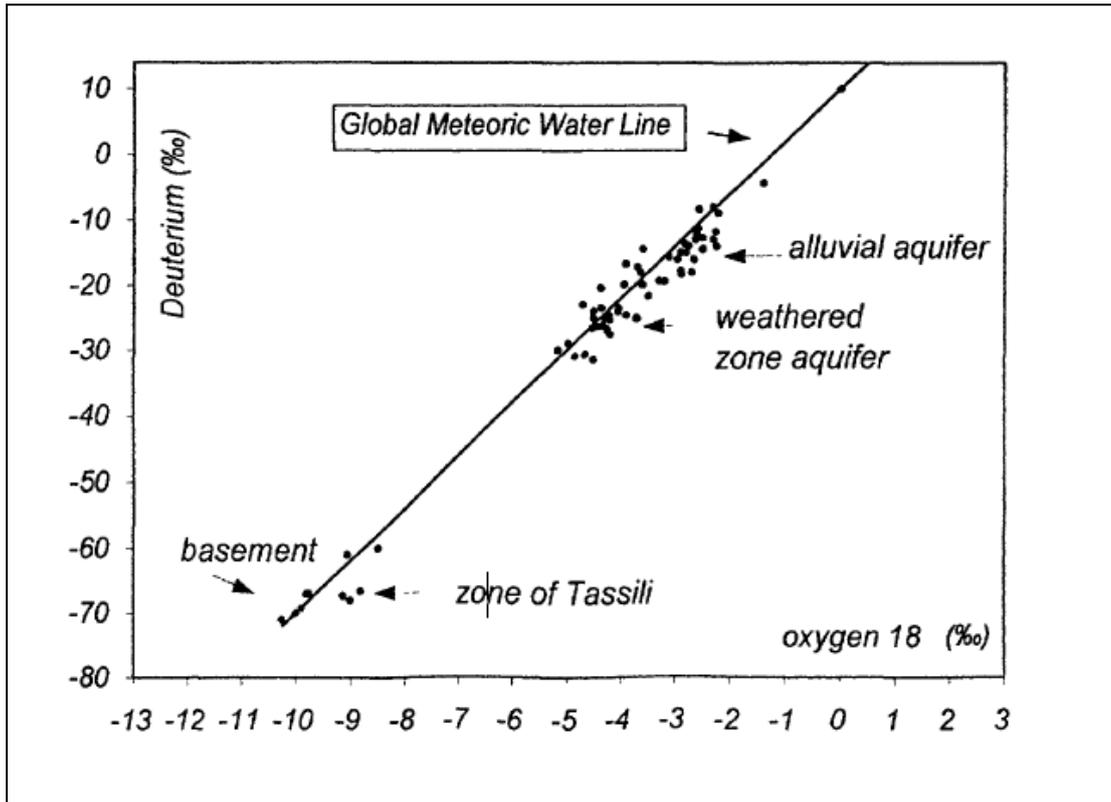


Figure IV.6 : relation entre deutérium et oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) de l'eau souterraines du Hoggar (O. SAIGHI J.L. MICHELOT, A. FILLY 2001)

IV/Conclusion :

L'ensemble des résultats hydrochimiques et isotopiques permettent de distinguer trois types d'aquifères stratifiés horizontaux.

La nappe supérieure correspond à l'aquifère libre des alluvions qui présente une homogénéisation du faciès d'eau (bicarbonaté calcique) et caractérisé par une faible minéralisation due à la recharge par l'eau d'inondation de l'oued qui résulte des pluies orageuses.

La zone intermédiaire présente l'eau de la zone altérée qui montre plusieurs types d'eau et une minéralisation moyenne. Elle présente une certaine analogie avec les eaux précédentes. Ce qui suggère qu'elle est en lien avec les eaux souterraines de l'aquifère des alluvions.

L'aquifère de socle présente un faciès chlorure sulfaté calcique avec de forte minéralisation mais à des seuils admissibles. Les teneurs faibles en isotope de cette aquifère permet de dire qu'elle n'était pas réalimenté.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La région de Tamanrasset fait partie du Hoggar central qui est constitué par des formations paleoprotozoïque inférieur. Elles comprennent les séries de l'Archchoum et de l'Aleksod. Ces formations sont affectées par la tectonique panafricaine et sont largement recoupées par des granitoïdes syn et post tectoniques.

Les formations précambriennes ont subi plusieurs phases tectoniques qui donnèrent naissance aux accidents subméridiens de plusieurs kilomètres de long. Ce contexte tectonique produit un champ de fractures qui donne lieu à la circulation souterraine de l'eau.

La région d'étude est représentée dans sa majeure partie par des formations gneissiques paleoprotozoïques, recoupées par du granite panafricain et des épanchements basaltiques plio-quaternaires et des alluvions qui recouvrent le lit de l'oued Tamanrasset.

Les résultats des méthodes de prospection montrent que les aquifères de Tamanrasset sont comme suit :

- L'aquifère des formations meubles d'une épaisseur variable de 10 à 25 m.
- L'aquifère de la zone altérée d'une épaisseur moyenne oscillant entre 20 m. à 30 m
- L'aquifère de socle dans sa partie supérieure.

Le bassin versant de Tamanrasset a des caractéristiques morphométriques qui favorisent le ruissellement lors des périodes des pluies de courte durée.

Les précipitations moyennes annuelles dans la région de Tamanrasset sont faibles

Elles apparaissent sous la forme d'orages durant le période d'été mais les valeurs de l'évaporation sont elles très élevés, durant cette même période. Ces pluies donnent naissance à des crues importantes, qui permettent la recharge des aquifères.

Les niveaux piézométriques ont été relevés dans certains cas au voisinage de forages en subissant un pompage, influence l'écoulement et les niveaux piézométriques.

La profondeur d'eau varie de 6 m à 21 m, dans les forages qui recoupent les formations meubles, pour les forages qui captent le socle, elle varie de 14 m jusqu' à 35 m. Mais ces niveau ne reflètent pas la surface piézométrique exacte du faite de pompage.

Les directions d'écoulement souterrain ont les mêmes directions que l'oued, et suivent les grands accidents tectoniques.

Les valeurs de transmisivités calculées par les différentes méthodes varient entre 10^{-6} - 10^{-4} m²/s pour la nappe des alluvions et de l'ordre de 10^{-7} pour la nappe des gneiss altérée et fissurée

Les résultats hydrochimiques et isotopiques permettent de distinguer trois types d'aquifères stratifié horizontalement.

L'aquifère libre des alluvions présente un faciès d'eau (bicarbonate calcique) et caractérise par une faible minéralisation

L'aquifère de la zone altérée présente plusieurs types d'eau et une minéralisation moyenne.

L'aquifère de socle présente un faciès chlorure sulfate.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Acef. K, Liegeois. J.P, Ouabadi. A, Latouche. L., (2003):** The Anfeg post-collisional Pan-African high-Kcalc-alkaline batholith (Central Hoggar, Algeria), result of the LATEA microcontinent metacratonization. *Journal of African Earth Sciences* 37 295–311.
- Amri. K , Mahdoub. Y, Guergour. L., (2009) :** Apport des images Landsat 7ETM⁺ pour la discrimination lithologiques et l'étude structurale de la région d'Afara Héouine, Tahifet, Hoggar Central. Journées d'animation scientifiques de l'AUF, Alger novembre.
- Beche. A :** Cartographié automatique et cinématique des zones de cisaillements de la région de Gouroumelalen (Hoggar central, Algérie). Thèse de magister université d'USTHB.
- Bouguern A, Baker H., (2007) :** Méthodes géophysiques appliqués à la recherche d'eau souterraine dans l'oued In- Amguel (Wilaya de Tamanrasset). 6^{ème} colloque GEOFCAN – 25-26/09/2007 – Bondy, France
- Boukhalfa. L., (1987) :** Diversité et signification géodynamique des complexes ultrabasiques /basique d'âge protérozoïque supérieur du rameau oriental pharisien de la chaîne Panafricaine (Hoggar, Algérie) : thèse de doctorat de l'université de Nancy I.
- Cassan. M :** Les essais d'eau dans la reconnaissance des sols.
- Caby. R., (2003):** Terrane assembly and geodynamic evolution of central–western Hoggar: a synthesis: *Journal of African Earth Sciences* 37. 133 –159.
- Chapuis. R.P:** Guide des essais de pompage et leurs interprétations.
- Danoun. S, Ouazani. B., (1993) :** Le volcanisme alcalin de la région de Tamanrasset (Hoggar central) géologie, pétrographie, géochimie. Thèse d'ingénieur de l'université d'USTHB.
- Derias. T., (2004) :** Aquifère hétérogène sous climat semi-aride : aspect hydrodynamique et hydrochimique. Exemple de la plaine Tebassa. Mémoire de magister de l'USTHB 106 p.
- Djafer. S. A, Ouzegane. K, Liegeois J. P, Kienast. J. R., (2003):** An example of post-collisional mafic magmatism: the gabbro–anorthosite layered complex from the Tin Zebane area (western Hoggar, Algeria). *Journal of African Earth Sciences* 37 313–330.

- Failat. J.P, Drougue. C., (1993) :** Différentiation hydrochimique de la nappe superposée d'altérites et de fissures en socle granitique. Hydrological Sciences –Journal des Sciences Hydrologiques, 38, 3,6/1993.
- GABA A.H. ; (2009) :** Hydrogéologie des milieux volcanique sous climat aride. Caractérisation sur site expérimental et modélisation numérique de l'aquifères basaltique de Djibouti (Corne de l'Afrique) .Thèse de doctorat de l'Université Poitiers 183 p.
- Gribi .A, Sai .N, Younsi. N. (1992) :** notice explicative de la carte hydrogéologique du Hoggar et des Tassilis à 1/1 000 .000. ANRH, projet PNUD/ALG/021.
- Girard. P., (2009):** Rapport d'évaluation géologique Nord Tirek, Hoggar, Algérie. Mines CANCOR INC.
- Girard. P., (2009) :** Rapport d'évaluation géologique Tan Chaffao EST, Hoggar, Algérie. Mines CANCOR INC.
- Girard. P., (1993) :** Techniques isotopiques (^{18}N , ^{18}O) appliquées à l'étude des nappes des altérites du socle fracturé de l'ouest Africain. Etude de cas : l'ouest du Niger. Thèse de l'université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle du doctorat en ressources minérales 127 p.
- Hadj-Said. S. ; (2007) :** Contribution à l'étude hydrogéologique d'un aquifères en zone côtière cas de la nappe de Guerbes thèse de doctorat de l'Université Badji Mokhtar – Annaba 175 p.
- Haddoum. H., (1992) :** Etude structurale des terrains archéen du mole In-Ouzzel (Hoggar occidental, Algérie). Thèse de doctorat de l'université d'USTHB.
- Hassane .A. B :** Aquifères superficiel et profonds et pollution urbaine en Afrique Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER) thèse de doctorat de l'Université Abdou Moumouni de Niamey.
- Krusemen. G. P, Ridder. N. A., (1973):** Interprétation et discussion des pompages d'essai. Bulletin 11f. Traduction du Bulletin 11: Analysis and Evaluation of Pumping Test Data; ILRI Wageningen, , 2nd edition.
- Kouadio. E.K, Savane. I., Lasm .T, Biemi .J., (2008):** Hydrogeology prospecting in crystalline and metamorphic area by spatial analysis of productivity potential: European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.22 No.3, pp.373-390.
- Koussoubé. Y, Savadogo. A. N, Nakolendoussé. S., (2003):** Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone Sahélo-Soudanienne du BurkinaFaso (bassin versant de Bidi, province du Yatenga). Télédétection, , vol. 3, n° 5, p. 419–427.

KOITA. M., (2010) : caractérisation et modalisation du fonctionnement hydrodynamique d'une aquifère fracturé en zone de socle. région de Dimbokro- Bongouanou(centre est de la Cote D'Ivoire). Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II 194 p.

Liegeois. J.P, Latouche. L, Boughrara. M, Navez . J, Guiraud. M., (2003): The LATEA metacraton (Central Hoggar, Tuareg shield,Algeria): behaviour of an old passive margin during The Pan-African orogeny. Journal of African Earth Sciences 37 161–190.

Lelubre. M., (1952) : l'antécambrien de l'Ahaggar (Sahara central). Monographies régionales. 1^{ère} Série : Algérie –N° 6.

Leblanc. P., (1986) : Structure et hydrodynamique des milieux fissures aquifères (BRGM)

Meriem .D.E, Boufassa. A : le Hoggar, office national de la recherche géologique et minière (O.R.G.M), (bureau de prospective des ressources minérales (B.P.R.M)).

Maréchal. J.C., (2004): faisabilité d'une exploitation des ressource en eau profonde du socle granitique de la montagne bourbonnaise pour l'alimentation en eau potable, BRGM/RP 53122-FR (Mai 2004).

Oga. M. S, Lasm. T, Yao. T.K., Soro. N, Saley. M.B, Kouassi. D., Gnamba. F., (2009): Caractérisation chimique des eaux des aquifères de fracture: Cas de la région de Tiassalé en Cote d'Ivoire. European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.31 No.1, pp. 72-87.

Ouali. M.I, Girard. P., (2008): Rapport de travaux, Permis In-Ouzzal Nord, Hoggar, Algérie. Mines CANCOR INC.

Rabemanana. V., (2002) : Origine et caractérisation de la salinité des eaux dans les aquifères de socle : cas de la région de l'Androy (sud Madagascar) thèse de doctorat de l'Université Paris VI., 182 p.

Rapport de l'entreprise nationale des études hydrauliques (2004): étude de trios barrage inféro-flux à TAZROUK, IDLES, IZERZI : étude géophysique (site Izerzi).decembre.

Rapport de l'entreprise nationale des études hydraulique (2004): étude de trios barrage inféro-flux à IZERZI, TAZROUK, et IHELLEN : étude hydrologique (site Ihelfen). Juillet.

Rapport de bureau d'étude DIALOG HYDRO-GEO- SERVICE, (2001) : étude géophysique de oued Tamanrasset et ses extensions juin.

Rapport de programmation (1975): Groupe mixte SONARAM –IDROTECNECO étude hydrogéologique du Hoggar. Octobre

Saighi .O, Michelot. J.L , Filly. A., (2001): Isotopic characteristics of meteoric water and groundwater in Ahaggar massif (central Sahara): Isotope techniques in water resource

investigations in arid and semi-arid regions: International Atomic Energy Agency (IAEA March 2001).

Seguin J.J., (2005) : Projet Réseau SIG-Afrique. Carte hydrogéologique de l'Afrique à l'échelle du 1/10 M. BRGM/RP - 54404 – FR.

Soro. N, Goulabiti. A., (1997) : Hydrochimie et isotopes de l'environnement appliqués à l'étude des eaux souterraines du Sud de la Côte d'Ivoire. Hydrochemistry (Proceedings of the Rabat Symposium, April 1997) IAHS Publ. no. 244,

Sombo A. P, Kouassi .F.W, Sombo B. C, Kouamé. L .N, Kouassi .E.G., (2011) : contribution de la prospection électrique à l'identification et à la caractérisation des aquifères de socle du département de Sikensi (Sud de la Cote d'Ivoire). European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.64 No.2, pp. 206-219.

Soro. G , Soro. N, Ahoussi. K.E, Lasm. T, Kouamé. F.K, Soro. T.D, Biémi. J., (2010) : Evaluation des propriétés hydraulique des aquifères fractures des formations cristallines et métamorphique dans la région des lacs (centre de la Cote d'Ivoire) Estudios Geológicos, 66(2) julio-diciembre 2010, 227-242 ISSN: 0367-0449.

Touchard. F., (2003) : Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissure des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. C. R. Géosciences 335 (2003) 451–460.

Toé. G., (2004): Apport de nouvelles technique géophysique à la connaissance des aquifères de socle. Tomographie électrique, électromagnétisme fréquentiel, résonance magnétique protonique. Application au Burkina-Faso. Thèse de doctorat université Paris VI 257 p.

Vouillamoz. J.M., (2003) : La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive. Les sondages par résonance magnétique protonique. Thèse de l'université Paris VI 207 p.

Weng .P, Lachassagne. P., (200) : Fonctionnement hydrogéologique du bassin versant de l'Aron (Mayenne). Caractérisation hydrogéologique d'un bassin versant de socle cristallin .BRGM RP 50344-FR, 24 p, 8fig, 2tabl.

ZOUAKH .D. E : Les écosystèmes aquatiques du Hoggar et du Tassili.

Annexe

Annexe I

Cordonnées UTM des sondages électriques verticaux site (4)

Sondage	X	Y	Z	profondeur du toit de substratum	épaisseur de socle altéré	épaisseur de l'aquifère
Sev1	759949	2525084	1458	26,7	23	15
Sev2	759949	2525084	1458	24	18	15
Sev3	760089	2525240	1440	11,7	11,2	8
Sev4	760173	2525334	1441	14	7,9	3,5
Sev5	760229	2525397	1441	23,1	22	13
Sev6	760198	2525519	1452	22,2	21	13
Sev7	760398	2525523	1441	10,6	9,3	2,6
Sev8	760366	2525707	1442	21,5	19	13
Sev9	760279	2525828	1441	22	20	12
Sev10	760535	2525833	1442	21,9	19	12
Sev12	760647	2525989	1442	13,4	12,5	

Cordonnées UTM des sondages électriques verticaux (site 1-2)

Sondage	X	Y	Z	profondeur du toit de substratum	épaisseur de l'aquifère
sev1	766294	2531012	1425	36,9	20
sev2	766322	2531012	1426	33,5	15
sev4	766558	2530586	1428	30,8	13
sev5	766564	2530247		26,5	10
sev7	766301	2530581		22	8
sev9	766302	2530519	1392	23,5	10
sev10	766277	2530334	1398	18	5
sev12	766225	2530026	1418	26,4	12
sev13	766255	2529995		25,1	10
sev14	766315	2529812	1429	35	24
sev15	766115	2529839	1439	27,3	14
sev19	766605	2529509	1442	20	5
sev20	766407	2529444	1443	18,7	5
sev21	766722	2529357	1444	27	15
sev22	766752	2529296		23	11
sev23	766587	2528924	1448	18,9	8
sev25	766266	2529318	1442	23	8
sev26	766182	2529255	1442	23,6	7,6
sev27	766155	2529162	1444	19,6	5
sev29	766048	2528760	1442	24	10
sev30	765992	2528698	1442	21,7	5,7
sev31	766114	2528238	1448	27,3	14

sev32	766115	2528177	1443	21,8	12
sev33	766145	2528085	1442	22,6	12

Cordonnée UTM des sondages électriques site (3)

Sondage	x	y	Z(m)	profondeur de toit de substratum (m)	épaisseur de socle altéré (m)	épaisseur des alluvions et socle altéré (zone aquifère) (m)
sev1	763551	2531272	1445	12,8	12	12,8
sev2	763467	2531147	147	6,6	6	6,6
sev3	763441	2531054	1457	5,5	5,5	5,5
sev4	763385	2530961	1455	28,9	13	28
sev5	763330	2530868	1460	27,6	9	27
sev6	763298	2531021		19,98	10	19,4
sev7	763218	2530712	1463	27,1	17	26,5
sev8	763191	2530619	1463	26	12	25
sev9	763136	2530526	1462	28,28	22	28
sev10	763081	2530432	1452	26,9	13	26
sev11	763025	2530339	1456	17,8	10	17
sev12	762998	2530246	1457	19	8,5	17
sev13	762942	2530184	1457	19,5	50	18,5
sev14	762886	2530121	1457	61,6	25	59
sev15	762831	2529997	1458	56,6		55

Cordonnées des profile sismique oued Izerzi

profil 1					
tir direct			Tir inverse		
longitude	latitude	altitude	longitude	latitude	altitude
5°33'17,6"	22°42'44,5"	1304 m	5°33'15,8"	22°42'46,9"	1300 m
profil 2					
tir direct			Tir inverse		
longitude	latitude	altitude	longitude	latitude	altitude
5°32'21,8"	22°42'04,2"	1280m	5°32'17,6"	22°42'07,8"	1279 m

Cordonnées UTM sondage mécanique oued Izerzi

Sondage	X	Y
SM1	762394.170	2513581.868
SM2	762390.063	2513597.184
SM3	762375.798	2513629.958
SM4	762362.192	2513671.299
SM5	762354.095	2513693.625
SM6	762339.970	2513730.617
SM7	760743.764	2512838.139
SM8	760773.836	2512791.448
SM9	760805.616	2512731.141
SM12	763978.938	2512502.537
SM13	764313.522	2512626.952

Tableau : les vitesses sismique et les résistivités des sondages électriques site (1-2).

Les niveaux	Vitesses Km/s	Resistivitee ohm m	Lithologie
Niveau superficiel	0,3 -0,5	superieur à 300	Couche aérée
Niveau de complexe résistivité	0,6 - 1,2	25 - 500	Alluvions -socle altéré secs
Niveau intermediere conducteur	1,5 -3,4	15 -60 40 -120	Alluvions humides socle altéré humide
Niveau terminal	4,5 -6	superieur à 700	socle sain

Tableau : les vitesses sismique et les résistivités des sondages électriques site (4).

Les niveaux	Vitesses Km/s	Resistivitee ohm m	Lithologie
1 niveau	0,2 - 0,6	750	couche aérée
2 eme niveau 1 horison	0,7 -0,9 1,04 - 1,7	8,5 60 120 -300 80 -86	argile socle altéré sec socle altéré humide
3eme niveau	superieur à 3	superieur à 1000	socle sain

Tableau : les vitesses sismique et les résistivités des sondages électriques site (3).

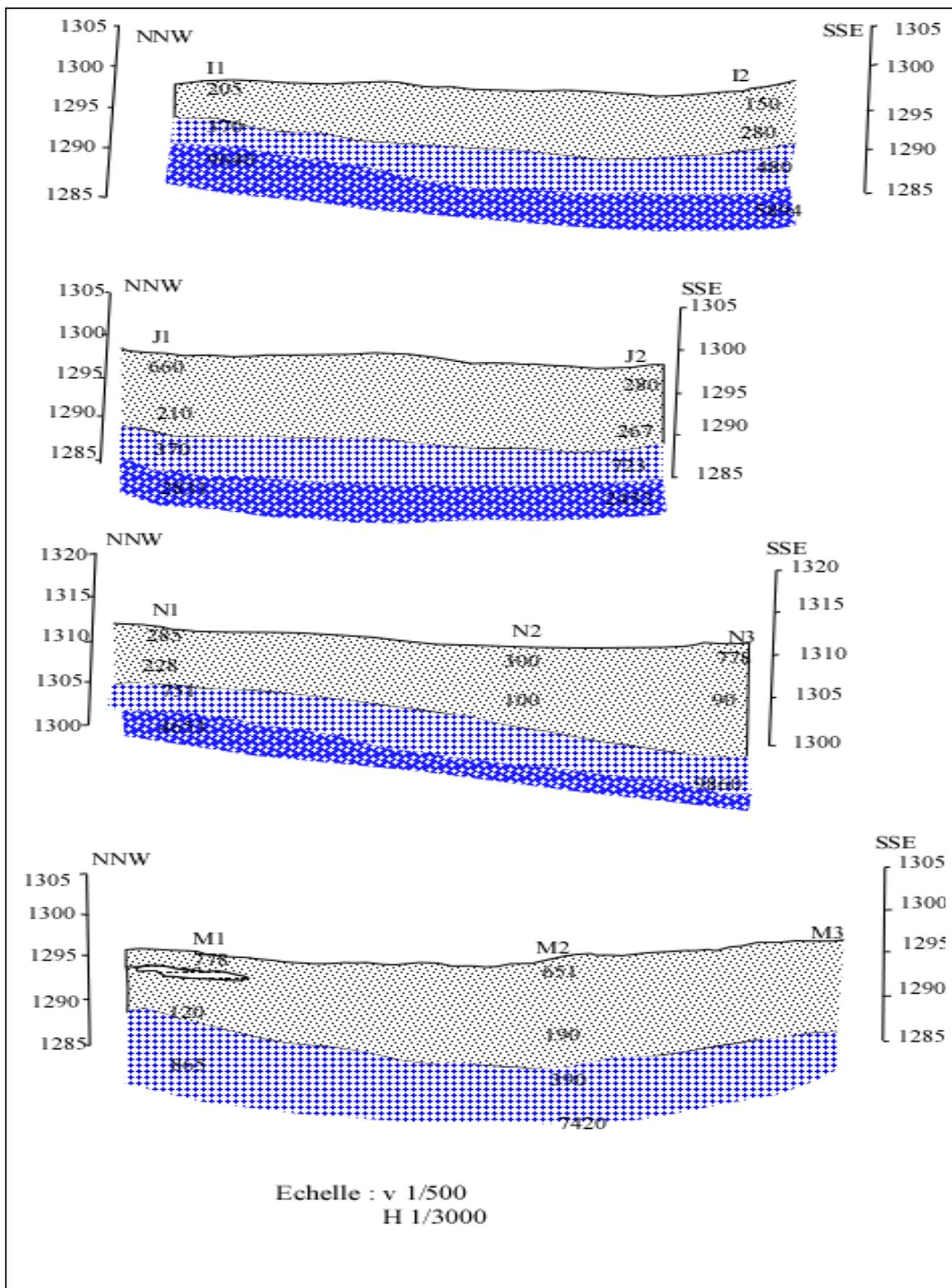
Niveaux	Vitesses Km/s	Résistivite Ohm,m	Lithologie
1 er niveau	0,2 - 0,657	superieure à 200	couche superficielle aérée
2eme niveau	0,7 - 1	86 -800	Alluvions sèches
3eme niveau	1,5 - 2,5	87 -900	Socle altéré sec
4eme niveau	superieur à 3	superieur à 1000	socle sain

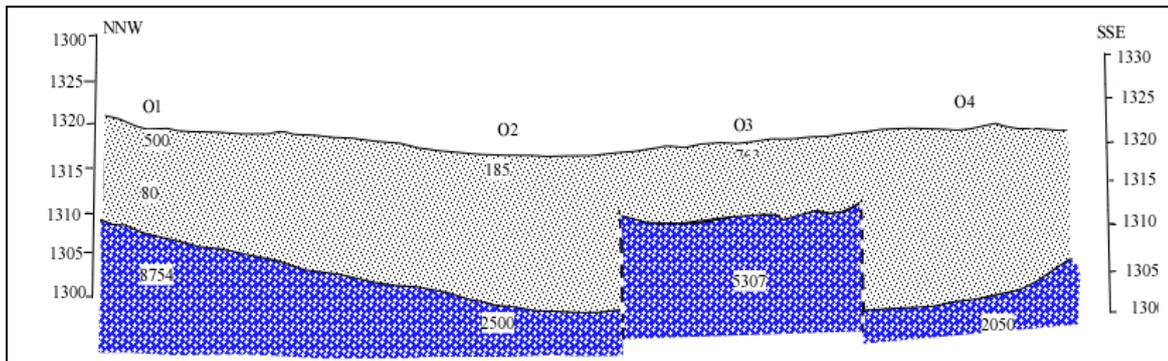
Les données des forages d'eau de Tamanrasset

inventaire	Nom du forage	Longitude	latitude	Profondeur (m)	Débits maximum (l/s)
T04	F9tam	5°34'35"	22°48'10"	25	9
T05	F10tam	5°35'14"	22°49'26"	25	6
T06	F11tam	5°35'25"	22°49'52"	27	7
T07	F12tam	5°34'31"	22°48'11"	100	8
T08	F13tam	5°35'21"	22°52'02"	95	20
T09	F14tam	5°35'23"	22°51'13"	110	5
T11	Serssouf	5°31'56"	22°48'43"		
T12	Tam F9 bs	5°34'17"	22°48'29"	48	4
T13	Tam F10bis	5°35'17"	22°49'35"	32	2
T15	Adariane 01	5°33'43"	22°46'24"	83	2
T16	Tam F	5°35'05"	22°49'03"		
T20	Amsel	5°27'12"	22°37'44"	40	3
T26	Tam pont	5°30'55"	22°47'25"	22	2
T27	Tam c ville	5°31'11"	22°47'23"	22	2
T29	Soro	5°32'49"	22°47'10"	32	2
T31	Tihigouine	5°30'36"	22°45'55"		2
T32	In zaouane	5°33'37"	22°47'57"	34	2
T33	In kouf	5°32'46"	22°46'28"	27	1
T34	Soro mosquée	5°32'57"	22°47'27"		1
T36	Ttabrakat2	5°33'10"	22°47'38"		

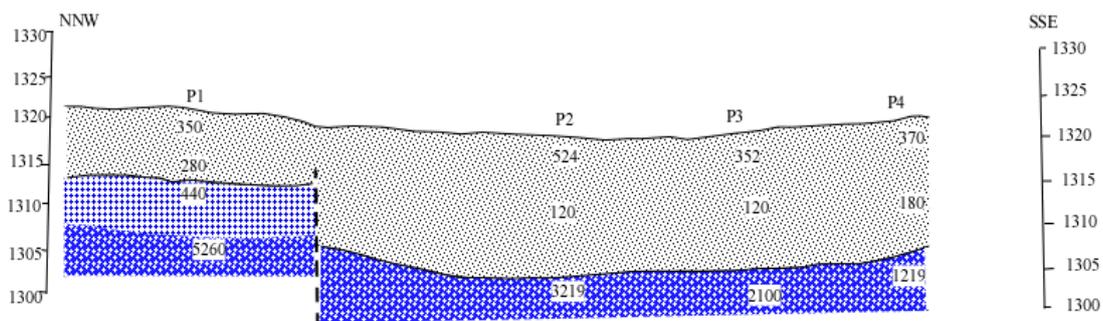
T37	Tafsit	5°31'52"	22°48'15"	29.4	2
T38	Matanatalat1	5°31'31"	22°48'18"	26.5	2
T39	Matanatalat2	5°31'42"	22°48'15"	37.5	2
T40	universite	5°30'30"	22°48'22"	40	2
T41	Assihar	5°31'20"	22°47'04"		2
T43	O Tam F14a	5°35'09"	22°50'46"	23	4
T44	O Tam F14b	5°35'21"	22°51'01"	23	3
T45	Tahagartl	5°30'29"	22°47'46"	25	1
T47	OTamF13a	5°35'17"	22°51'36"	40	4
T48	OTamF11a	5°35'23"	22°50'08"	37	3
T50	Serssouf mousal 1	5°31'23"	22°47'40"	31.5	2
T51	OTamF11b	5°35'18"	22°50'24"	25.5	2
T52	Soro Enor	5°32'35"	22°47'09"	25	2
T55	Tihigouine2	5°30'28"	22°45'59"	39	2
T65	Serssouf mousal 2	5°31'28"	22°47'54"	31	

Les coupes géoélectriques :

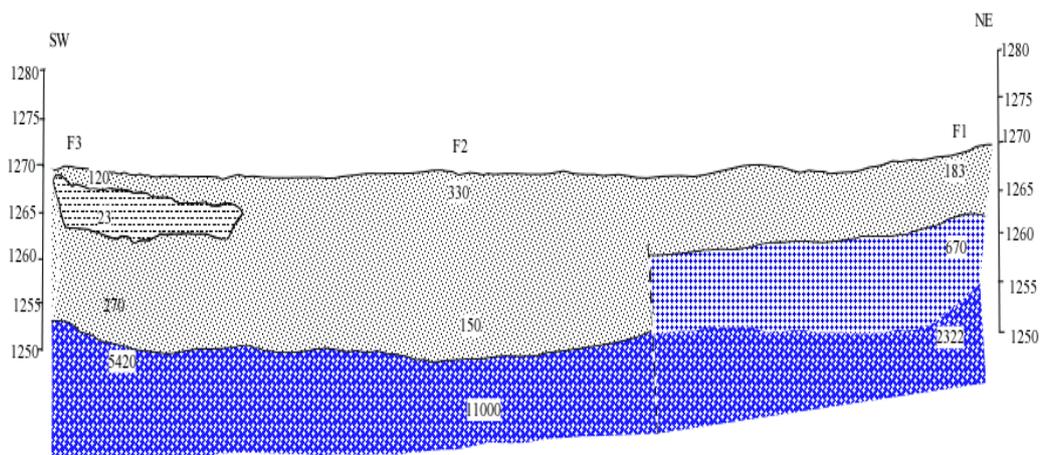




Echelle : v 1/500
H 1/3000



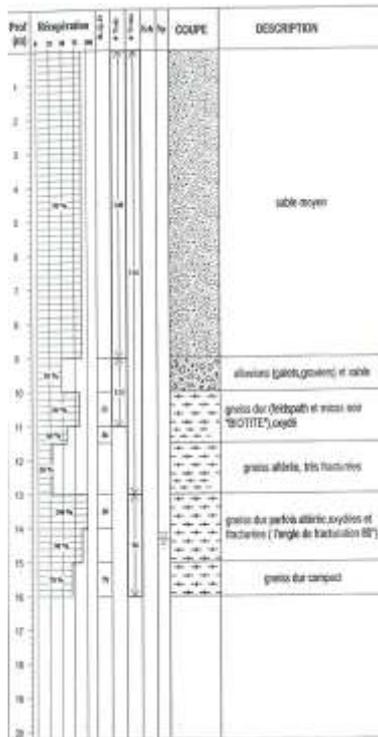
Echelle : v 1/500
H 1/3000



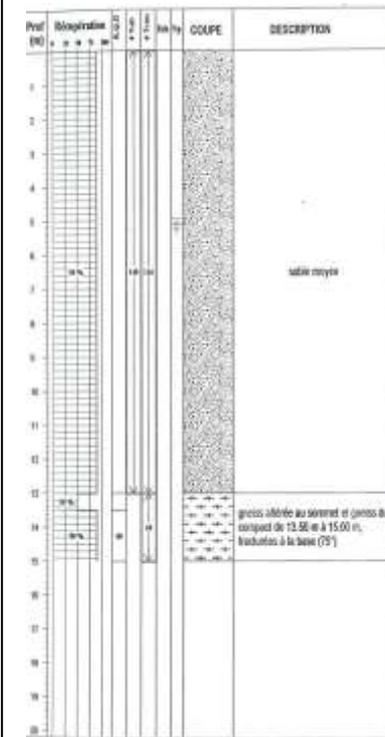
Echelle : v 1/500
H 1/15000

Les coupes des sondages mécaniques d'oued Izerzi :

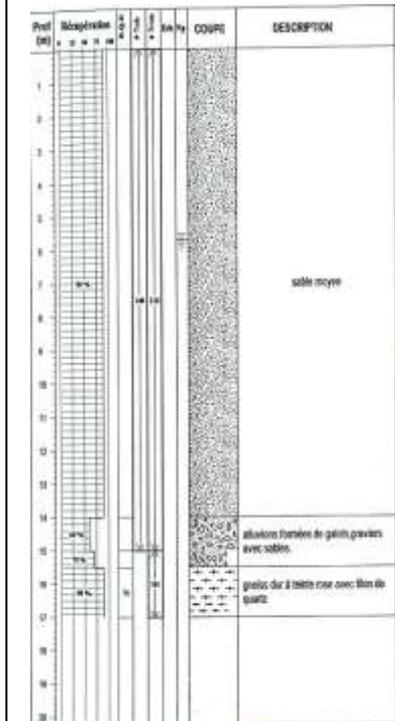
Sondage 1



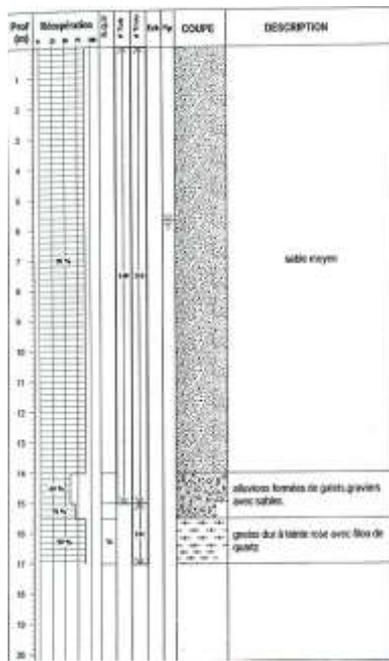
Sondage 3



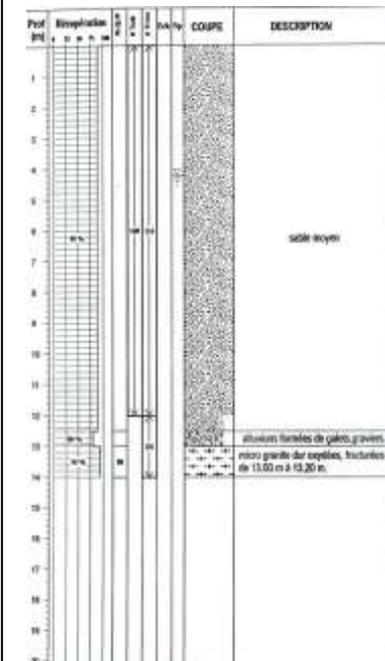
Sondage 4



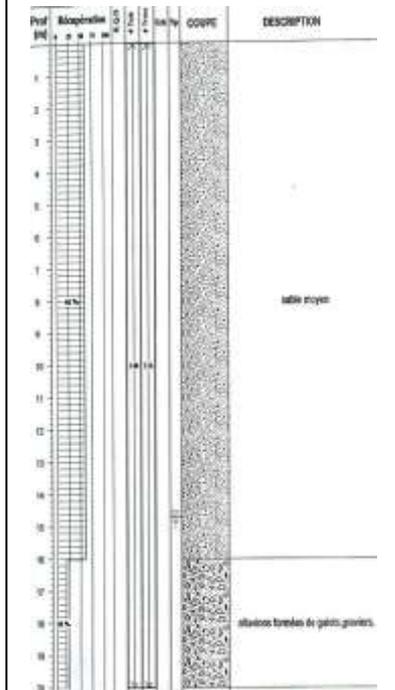
Sondage 5



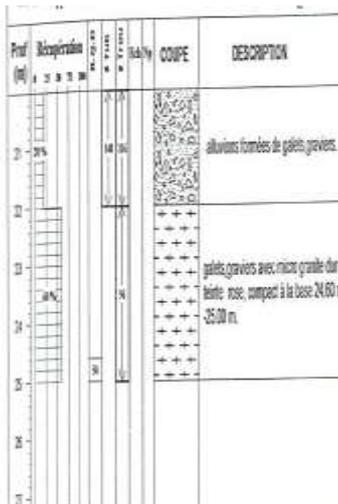
Sondage 6



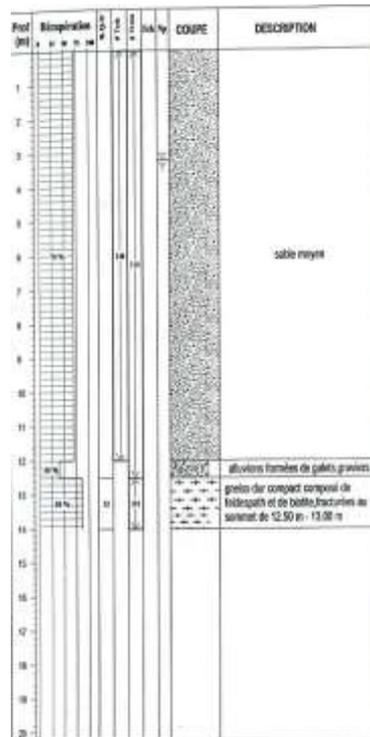
Sondage 7



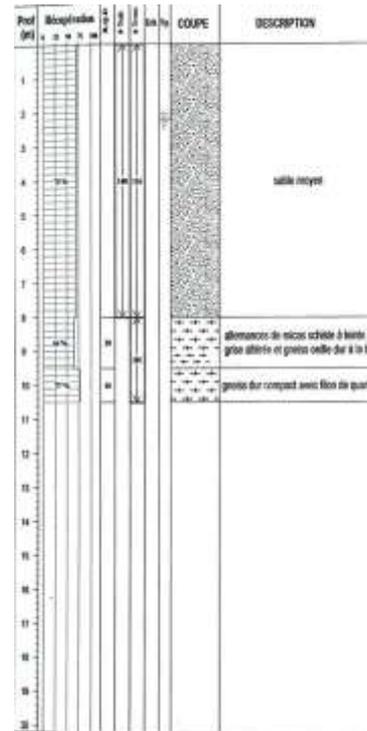
Sondage 7 (suite)



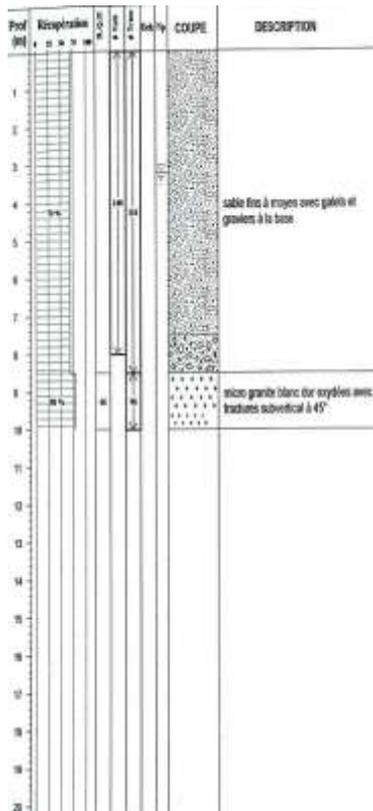
Sondage 8



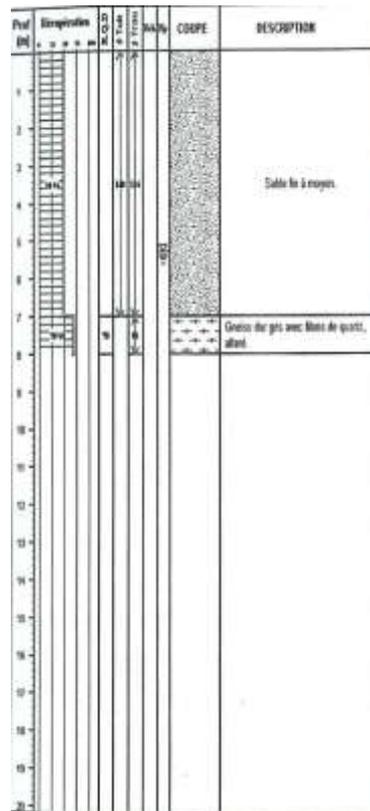
Sondage 9



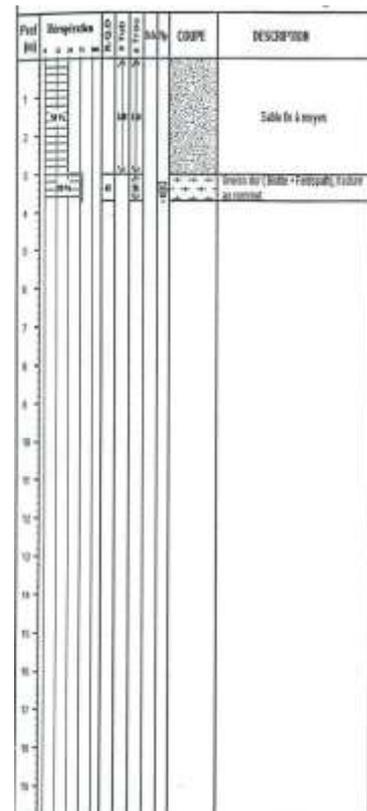
Sondage 10



Sondage 14

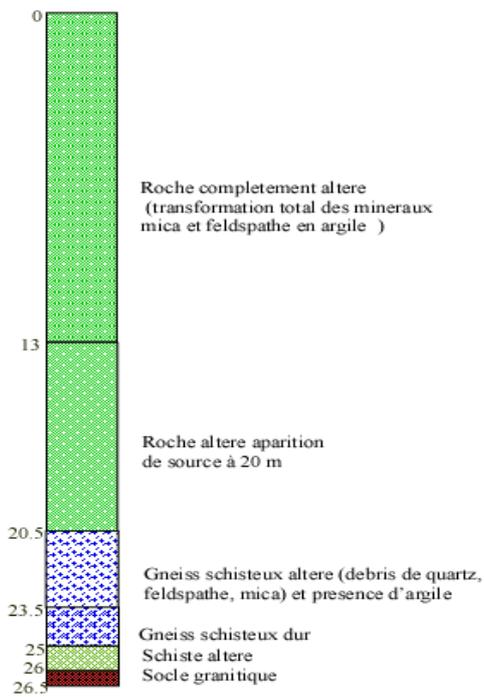


Sondage 15

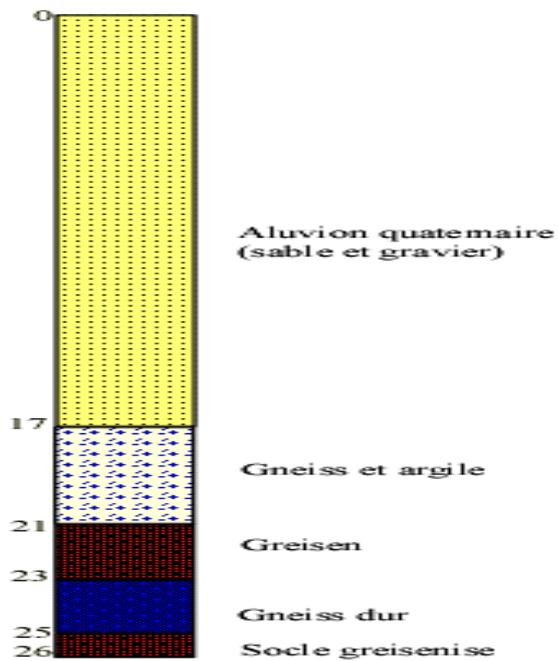


Les logs des forages

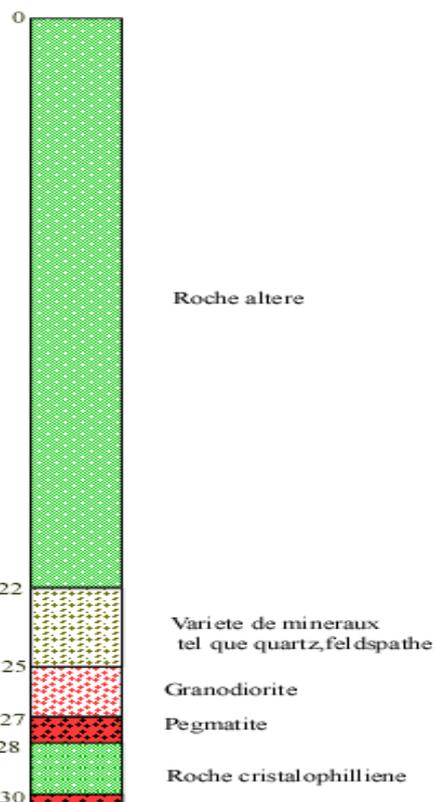
Matnatalet 1



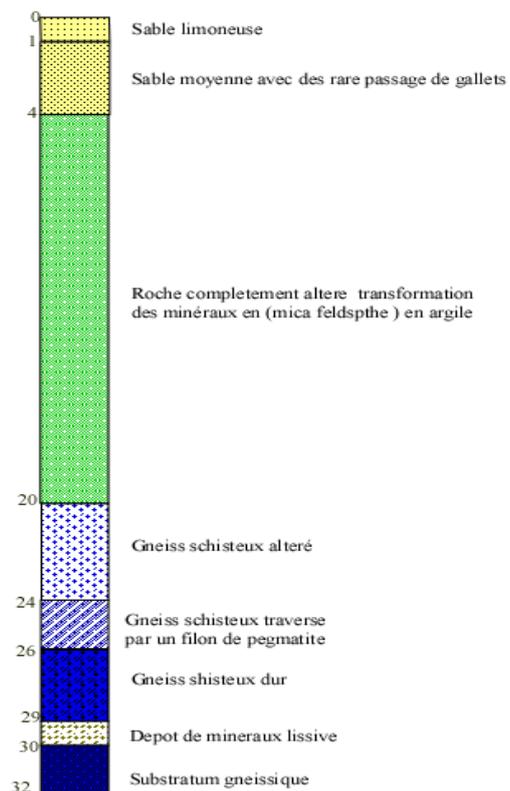
Forage Amsel



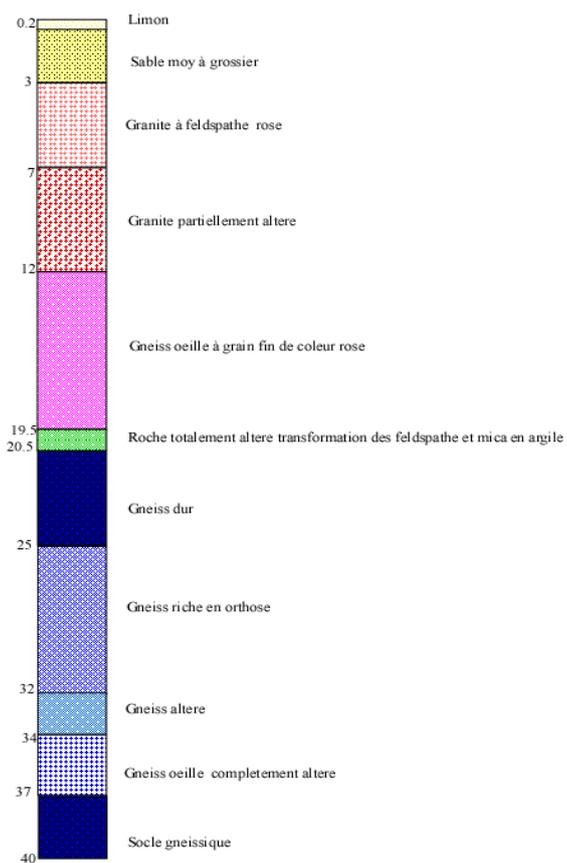
Inzaouene F2



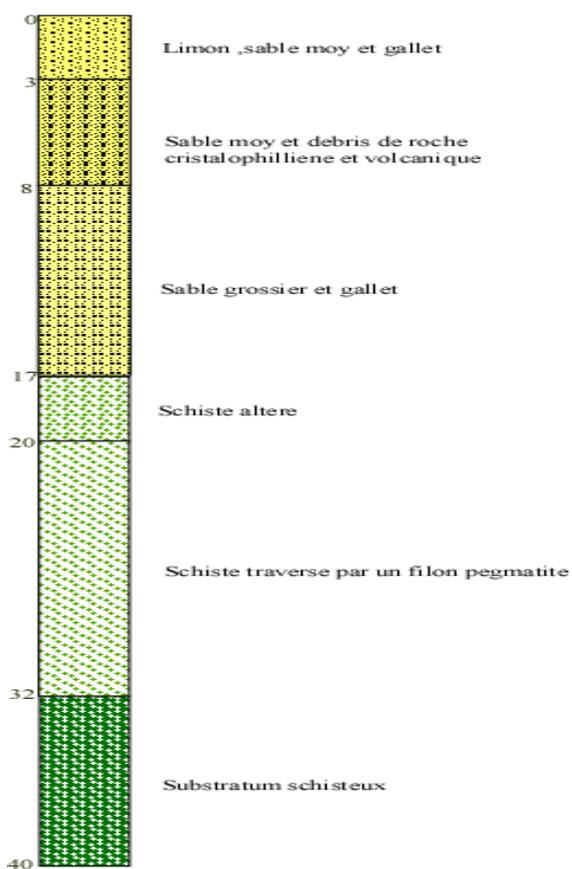
Forage Sorro



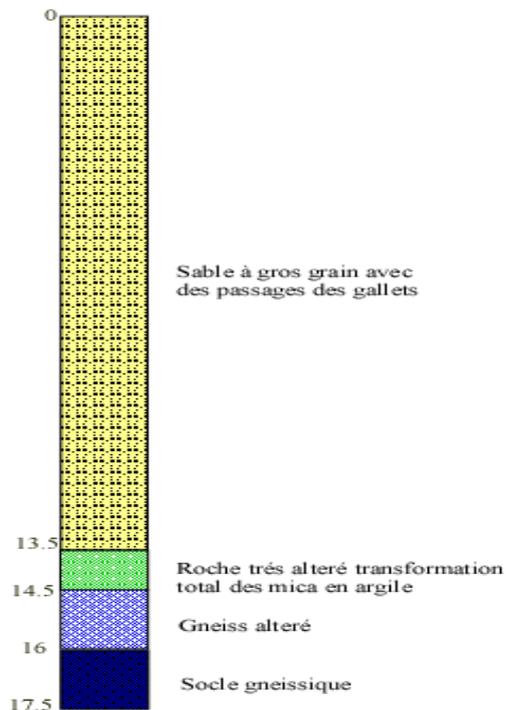
Forage tahagart



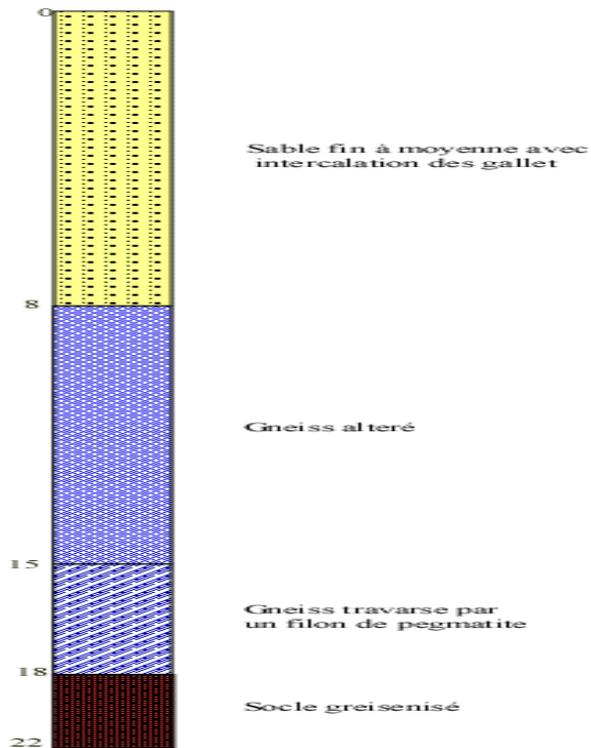
Foarge Tam T16



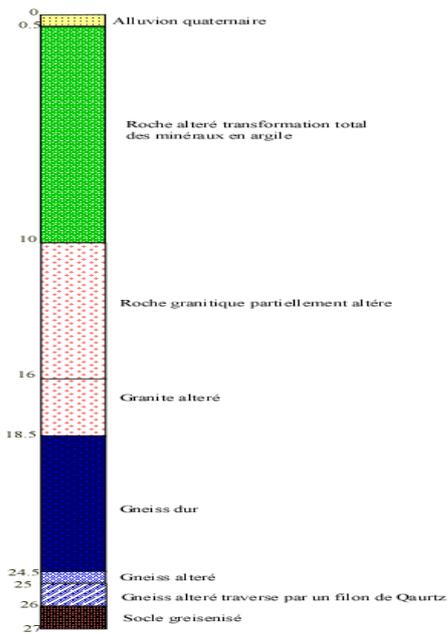
Forage IZERZI



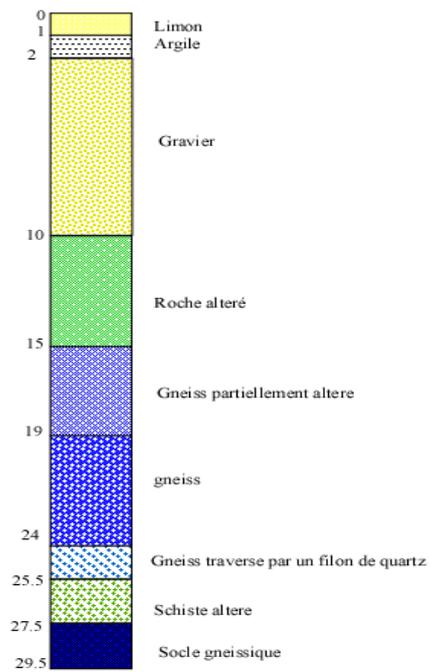
Forage Tam centre ville



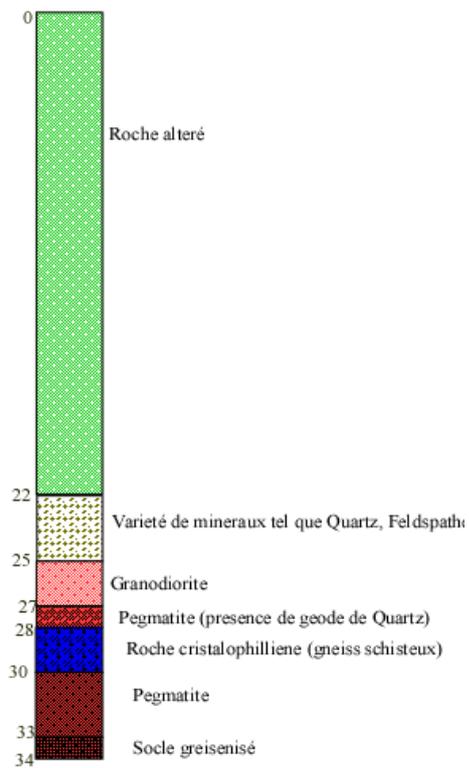
forage Inkouf



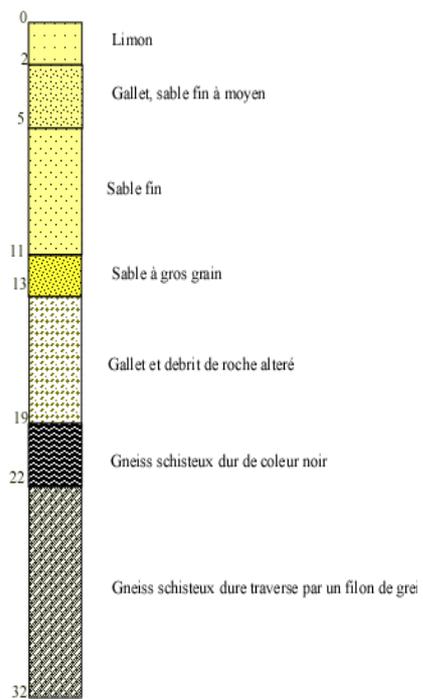
Forage Tafsit



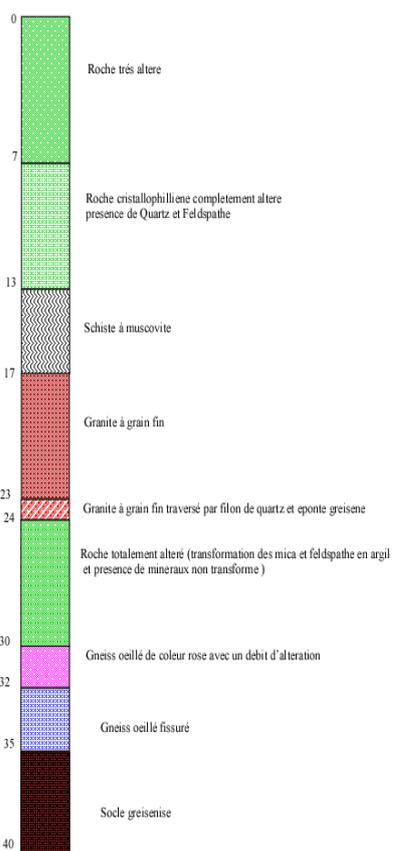
Inzaouene F1



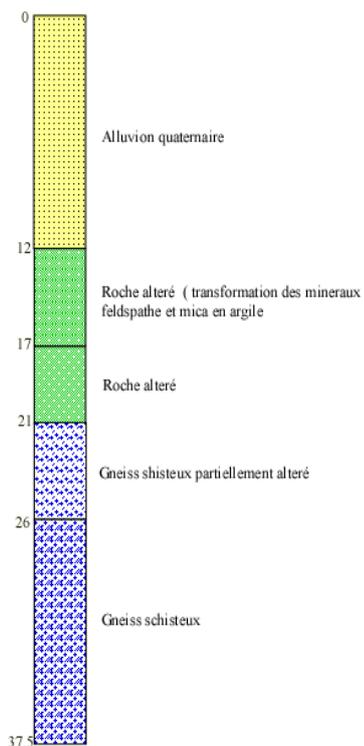
Forage F10 bis



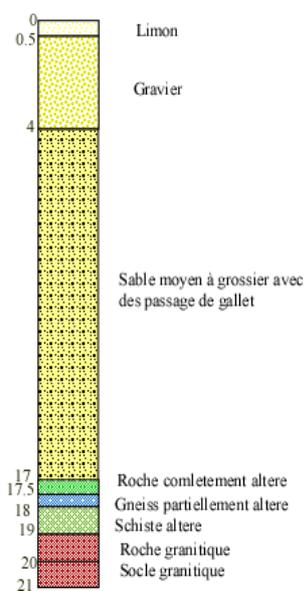
Forage assihar



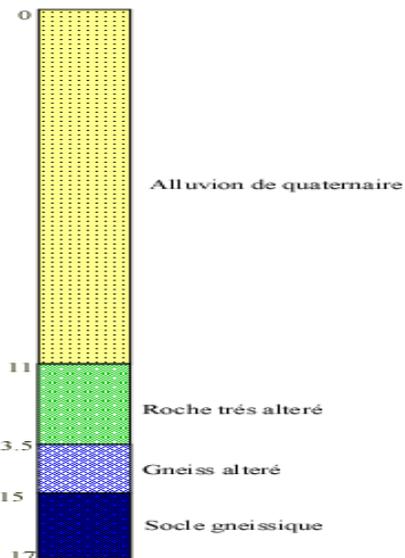
Matnatalet2



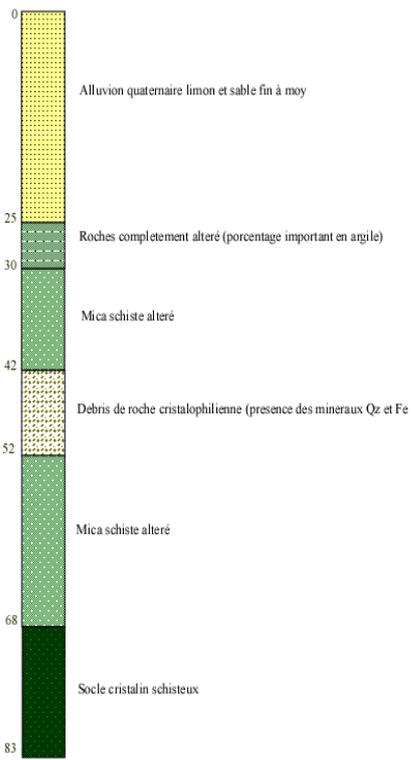
Forage Tabrakat



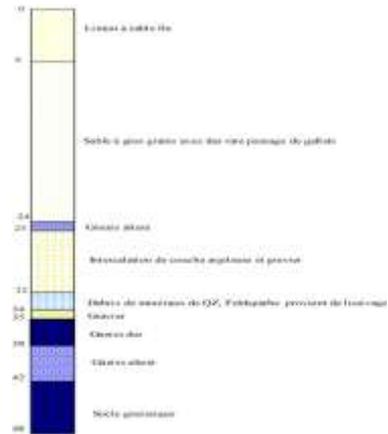
Forage Izeri



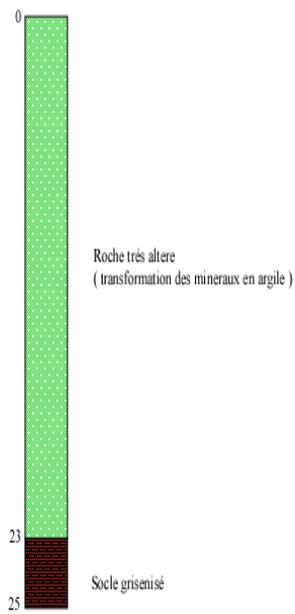
Forage Adariane



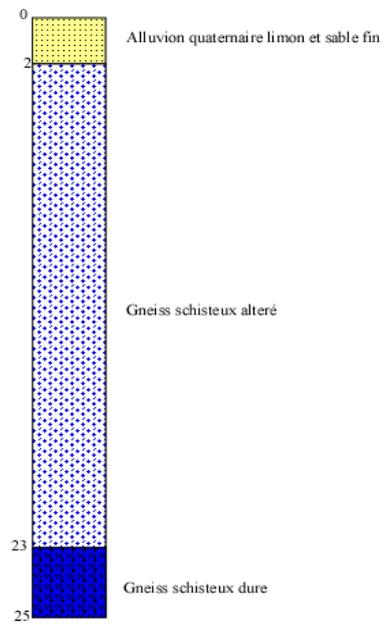
Forage F9bis



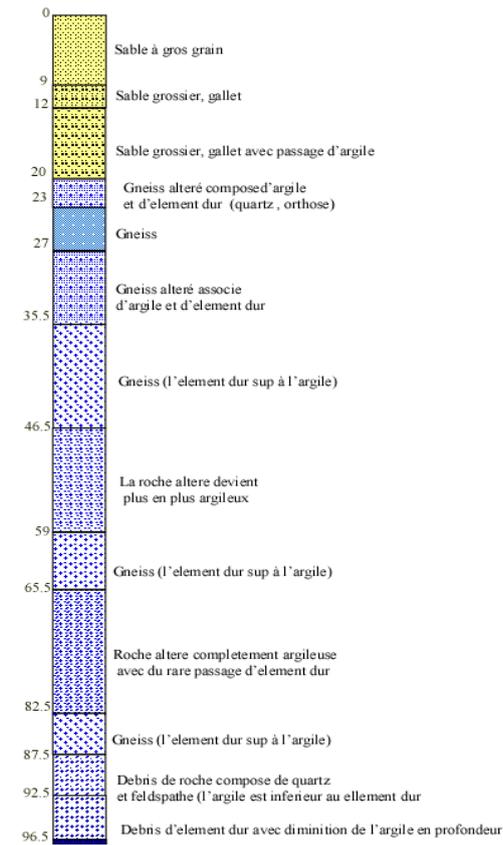
Forage kSAR



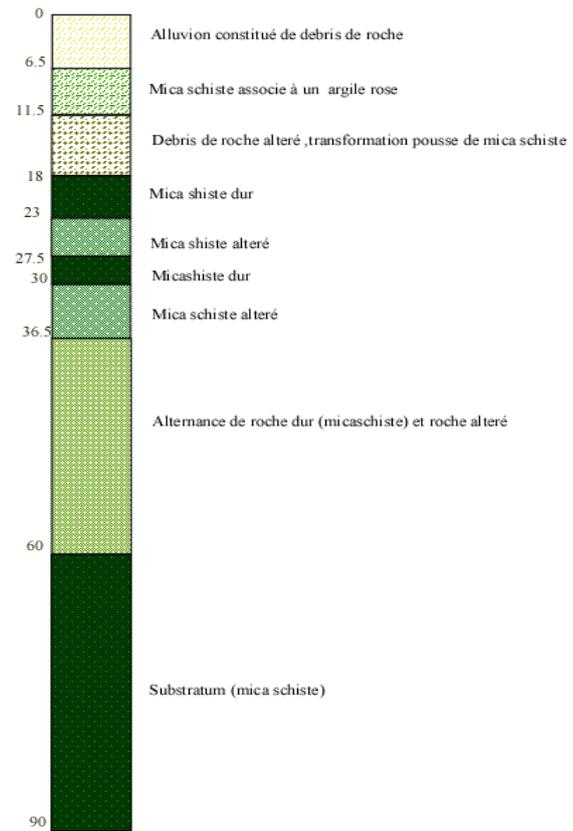
Forage sersouf



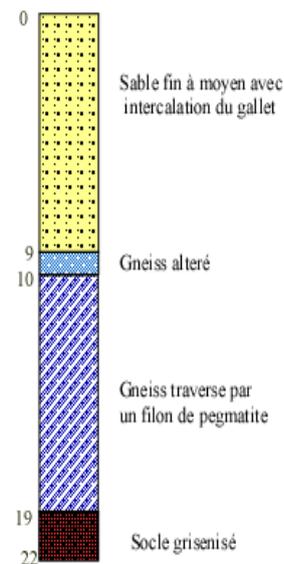
Forage F12



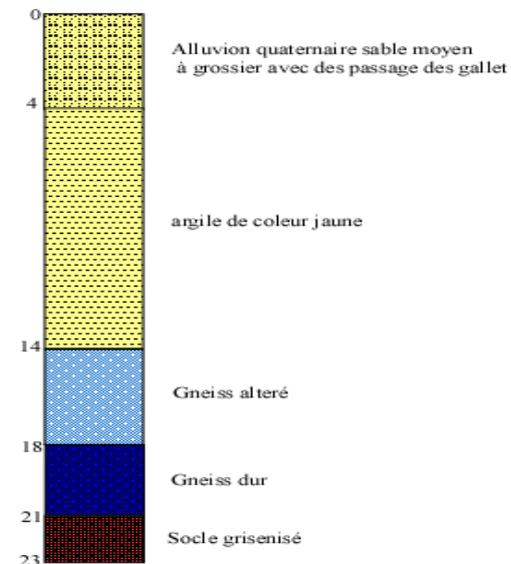
Forage F13



Forage tam pont T26



FORAGESorro moqué



Annexe II

Tableau : Relevé piézométrique de la campagne des puits Amsel et Izerzi 01-04-2008

Site	X	Y	Z (m)	NS(m)	C, Piezo (m)
Amsel	752729	2505560	1219	14,74	1204,26
Amsel	752783	2505764	1221	13,77	1207,23
Amsel	752725	2505800	1222	14,21	1207,79
Amsel	753694	2505933	1214	13,83	1200,17
Amsel	754111	2505946	1227	13,9	1213,1
Amsel	754330	2506196	1231	14	1217
Amsel	754301	2506201	1233	15,67	1217,33
Amsel	754419	2506985	1231	15,53	1215,47
Amsel	754475	2507054	1222	14,7	1207,3
Amsel	755307	2507185	1236	15,23	1220,77
Amsel	755780	2507580	1229	15,37	1213,63
Amsel	755933	2507712	1243	13,25	1229,75
Amsel	757049	2507916	1240	13	1227
Amsel	757634	2509126	1237	15,8	1221,2
Izerzi	763970	2513389	1239	9,77	1229,23
Izerzi	763970	2513389	1239	9,2	1229,8
Izerzi	763984	2513593	1330	10	1320
Izerzi	764049	2513754	1332	10	1322
Izerzi	764363	2514449	1327	8,3	1318,7
Izerzi	764327	2514516	1355	8,54	1346,46
Izerzi	764543	2514618	1327	7,3	1319,7
Izerzi	764520	2514618	1331	5,85	1325,15
Izerzi	765658	2515155	1334	8,5	1325,5
Izerzi	765982	2516872	1355	8,1	1346,9
Izerzi	766073	2517273	1366	7,32	1358,68
Izerzi	767059	2518639	1363	9	1354

Tableau 2 : Relevé piézométrique de la campagne 16-03-2008

NOM	X	Y	Z (m)	NS (m)	C,Piezo (m)
F9	765116	2524581	1428	23,77	1404,23
F10	765304	2525642	1420	23,7	1396,3
F11	765634	2526614	1422	21,94	1400,06
F14	765672	2529647	1438	13,41	1424,59
F Inkouf	761424	2520790	1388	22,43	1365,57
F sorro	761476	2522064	1366	20,6	1345,4
F11bis a	765783	2527645	1417	17,38	1399,62
F 11bis b	765655	2528154	1431	16,66	1414,34
F14a	765720	2529294	1424	9,3	1414,7
F13	765665	2531131	1444	36,83	1407,17
F13bis	765932	2531169	1466	25,77	1440,23
Fsorro est	761694	2522624	1385	25,77	1359,23
F sorro eau charge	762063	2522977	1392	17,07	1374,93

Tableau : Relevé piézométrique de la campagne 04-07-2007

Puit	X	Y	Z (m)	NS (m)	C, Piezo (m)
puit 3	689200	2531778	886	23,47	862,53
puit4	689187	2531777	887	23,24	863,76
puit 5	689184	2531757	885	23,6	861,4
puit 6	689156	2531746	886	23,6	862,4
puit 7	689049	2531637	886	22,4	863,6
puit 8	687284	2531637	881	19,6nd	
puit 9	689760	2531972	886	20,97	865,03
puit 10	689774	2531968	888	21,4	866,6
puit 11	689807	2531984	889	21,62	867,38
puit 12	689826	2531992	889	21,32	867,68
puit 13	689865	2532028	887	21,1	865,9
piez avale	686845	2530800	876	sec	
piez amoant	686910	2530870	874	sec	
forage	689631	2531989	886	23,50 nd	

Tableau : Relevé piézométrique de la campagne 08-08-2007

forages	X	Y	Z	NS (m)	mergelle (m)	NS (m)	C,Piezo (m)	prof
F13a	765774	2530652	1443					40
F13b	765937	2531176	1450	39nd				56
F13	765678	2531191	1441	61nd				90
F14	765683	2529647	1434	13		13	1421	110
F14a	765717	2529298	1438	9,37	1,14	8,23	1429,77	23
F14b	765562	2530367	1444	8,68	1	7,68	1436,32	24
F11a	765654	2528158	1433	16,17	1	15,17	1417,83	
F11b	765781	2527647	1427	16		16	1411	
inkouf	761029	2521461	1380	18,4		18,4	1361,6	45
soro	761480	2522075	1408	29,16nd	0,87			32
F10bis				21		21		32
soro enor				23nd				26
F2				12		12		26
F3				13		13		28,4
inzaoune F1	762906	2519873	1377	30,39		30,39	1346,61	34
inzaoune F2	762152	2518972	1362	17,43	1	16,43	1345,57	26
inzaoune F3	762284	2518973	1345	17,84	0,59	17,25	1327,75	

Tableau : Relevé piézométrique de la campagne 26 -08-2007

forages	X	Y	Z	NS (m)	mergelle (m)	NS (m)	C,Piezo (m)
F13	765665	2531131	1444			53,25	
F13b	765937	2531176	1450			23,93	
F13c						24,52	
F13a	765774	2530652	1443	6,43			1436,57
F14	765672	2529647	1438	12,63			1425,37
F14a	765717	2529298	1438	7,7			1430,3
F14b	765562	2530367	1444				
F 11bis b	765655	2528154	1431				
F11bis a	765783	2527645	1417	15,52			1401,48
F11	765634	2526614	1422	14,52			1407,48
F10	765304	2525642	1420				
F9	765116	2524581	1428			41,67	
F12						55,36	

Méthode d'interprétation de Theis :

En plus des hypothèses citées au chapitre III page 97, on doit satisfaire aux conditions suivantes:

- La nappe est captive.
- L'écoulement vers le puits est en régime transitoire, c'est à dire que l'évolution du rabattement n'est pas négligeable dans le temps, encore que le gradient hydraulique ne reste pas constant.
- L'eau provenant de l'emmagasinement est libérée instantanément avec la baisse de la charge hydraulique.
- Le diamètre du puits de pompage est très faible, c'est à dire que l'on peut négliger l'emmagasinement dans le volume du puits.

La formule de Theis est :

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy = \frac{Q}{4\pi T} w(u) \quad \text{et} \quad u = \frac{r^2 S}{4KD t}$$

Avec :

S : Le rabattement mesuré dans un piézomètre situé à une distance r, de puits de pompage (m).

Q : Débit constant de pompage, en m^3/s .

S : Coefficient d'emménagement, sans dimension.

T : Transmissivité de l'aquifère, en m^2/s .

t : Temps depuis le début du pompage, en s.

$w(u)$: Fonction de puits de Theis et s'écrit comme suit

$$w(u) = 0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots$$

Méthode de Boulton

L'interprétation des pompages d'essai selon la méthode Boulton est la suivante :

Condition d'application :

Les hypothèses cités au chapitre III page 97 doivent être vérifiés.

- La nappe est libre, mais présente un phénomène de débit retardé, ou encore la nappe est semi-libre.
- l'écoulement vers le puits est en régime transitoire.
- Le diamètre du puits est faible, c'est à dire que la quantité d'eau emmagasinée dans le puits est négligeable.

Dans un pompage en nappe libre à débit retardé, la courbe de descente d'un piézomètre peut se diviser en trois segments distincts (fig. 1)

Le premier segment, au tout début du pompage, montre que la nappe libre réagit au départ comme le ferait une nappe captive. On peut calculer la transmissivité de la nappe en appliquant la méthode de Theis sur ce premier segment de la courbe de descente,

Le second segment de la courbe de descente présente une pente plus faible. Durant cette période, il y a un désaccord marqué entre la courbe d'essai et la courbe type de Theis de l'écoulement transitoire.

Le troisième segment peut commencer de quelques minutes à quelques jours après le début du pompage, et se superpose correctement à la courbe type de Theis.

Le coefficient d'emménagement total vaut

$$S_A + S_Y = \gamma S_A$$

Avec :

S_A : Volume d'eau libérée instantanément de l'emmagasinement par unité de rabattement et par unité de surface horizontale (Coefficient d'emmagasinement immédiat)

S_Y : Volume d'eau libérée de l'emmagasinement avec retard par unité de rabattement et par unité de surface horizontale (coefficient d'emmagasinement retardé qui équivaut à la porosité efficace)

Par analogie avec l'équation de Theis, La solution générale est la suivante :

$$S = \frac{Q}{4\pi T} w(A_{AY}, r/B)$$

$w(A_{AY}, r/B)$: Fonction de puits de Boulton.

L'équation de la courbe de rabattement du premier segment est :

$$S = \frac{Q}{4\pi T} w(u_A, r/B)$$

$$u_A = \frac{r^2 S_A}{4\pi T}$$

L'équation de la courbe de rabattement du troisième segment est :

$$S = \frac{Q}{4\pi T} w(u_Y, r/B)$$

$$u_Y = \frac{r^2 S_A}{4\pi T}$$

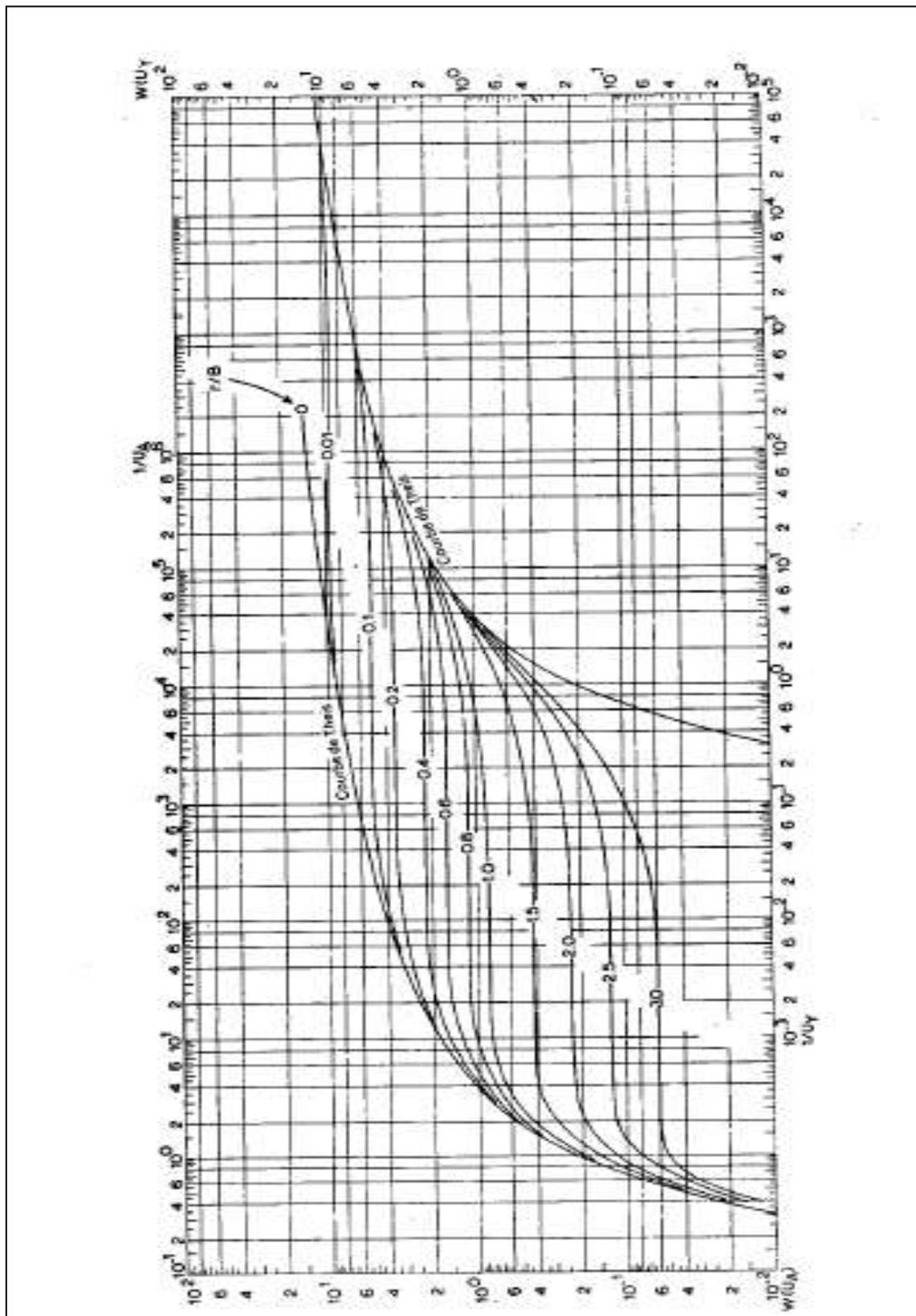


Figure : famille de courbe type de Boultou $w(u_A r / B)$ fonction de $1/u_A$ et $w(u_Y r / B)$ fonction de $1/u_Y$ pour différentes valeurs de r / B

Les coupes des forages du Pompage d'essai :

SONDAGE OUED TAMANRASSET, FORAGE N° 2
 Carte : au 200.000 de Fort Lappennine (Feuille NE 31-KVII)
 Date des travaux : Septembre-Oct. 1977 Long : 5° 33' 3" X
 Echelle de la coupe : 1/200 Lat : 22° 47' 9" Y Z/385,49

Profondeurs et cotés	Tubages et Cimentation	Plans d'eau	Echant	Coupe	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	Etage
0M						
2M	18" tube jussé				Sable moyen à grossier de couleur blanc-rouge. Sable très grossier à moyen de couleur blanc.	
4M					Sable très grossier de couleur blanc.	
6M	5M				Sable grossier à moyen de couleur blanc.	
8M	17 1/2"				Sable moyen et grossier de couleur rouge.	
10M	13 3/8"					
12M	Graviers 6mm	N.S. 10-27M			Sable grossier à très grossier de couleur blanc et rouge.	
16M						
18M	Chapard max = 13/8"				Sable grossier à moyen de couleur blanc.	
20M	" " " " " " " "				Sable grossier de couleur blanc.	
22M	" " " " " " " "				Sable grossier à moyen de couleur blanc rouge.	
24M	" " " " " " " "				Sable très grossier à moyen de couleur blanc rouge.	
25M	25M Sabot					

ALLUVION

mis à jour par AMAR SINGH CHOHAN - le TAMANRASSET, 8-9-1979.

SONDAGE OUED TAMANRASSET, FORAGE N°5.

Carte: Au 200.000 de Poste Lappetaine (feuille NF31-XVIII)

Date des travaux: NOVEMBRE 1977

Echelle de la coupe: 1/200

N°Fichier Forages

N°INVENTAIRE

Long: 5°33'6" X

Lat: 22°46'55" Y

Z: 1385,68M

Profondeurs et cotes	Tubages et Cimentations	Plans d'eau	Echelle	Coupe	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	Tag
0 M					Sable moyen	A L L U V I O N
2 M	Fils guide 18"				Sable grossier à moyen	
4 M	5M					
6 M	Gazevill 6mm					
8 M	Cas pipe 13 3/8"				Gros Galet et Sable fin avec éléments noirs.	
10 M		N.S. 19,13M				
12 M					Gros Galet et Sable fin avec éléments noirs et claire	
14 M	4 mm					
16 M	4 mm				Gros Galets siliceux et sable fin	
18 M	4 mm					
20 M	4 mm				Sable fin à moyen et galets siliceux	
22 M	4 mm				Gros galets siliceux de couleur claire avec éléments noirs et granitique.	
24 M	Sabot a 23M					

AMAR SINGH CHOHAN TAMANRASSET, 11.9.1979.

Les données du pompage d'essais

Tableau : données de pompage d'essai (descente) forage Machoen :

date	debut de pompage	heures	t min	Descente	rabattement
03/04/2008	9H 20	0H		17,86	0
			1'	18,37	0,51
			1'30"	18,62	0,76
			2'	19,11	1,25
			3'	19,63	1,77
			4'	20	2,14
			5'	20,38	2,52
			10'	23,17	5,31
			15'	26,24	8,38
			20'	29,33	11,47
			25'	30,76	12,9
			30'	30,76	12,9
			40'	30,76	12,9
			50'	30,76	12,9
	10H20	1H	60'	30,76	12,9
			70'	30,76	12,9
			80'	30,76	12,9
			90'	30,76	12,9
			100'	30,76	12,9
	11H20	2H	120'	30,76	12,9
	13H20	4H	240'	30,76	12,9
	17H20	8H	480'	30,76	12,9
04/04/2008	10H20	25H	1500'	30,76	12,9
	17H20	33H	1860'	30,76	12,9
05/04/2008	9H20	48H	2880'	30,76	12,9

Tableau : Données pompage d'essai (remonté) forage Machoen

date	début de pompage	heures	T'min	Remonté	rabattement
05/04/2008	9H 20		9h20	30,76	12,9
			1	30,74	12,88
			2	30,6	12,74
			3	30,5	12,64
			4	30,34	12,48
			5	30,1	12,24
			6	30	12,14
			7	29,81	11,95
			8	29,56	11,7
			10	29,49	11,63
			15	28,79	10,93
			20	28,5	10,64
			25	27,29	9,43
			30	26,6	8,74
			31	26,45	8,59
			32	26,3	8,44
			33	26,3	8,44
			34	25,87	8,01
			35	25,73	7,87
			36	25,56	7,7
			37	25,45	7,59
			38	25,35	7,49
			39	25,23	7,37
			40	25,11	7,25
			50	23,85	5,99
			60	22,78	4,92
			70	21,83	3,97
			80	21,29	3,43
			90	21	3,14
			100	20,82	2,96
		11h20'	120	20,51	2,65
		12h43'	180	19,97	2,11
		13h43'	240	19,69	1,83
		15h48'	360	19,37	1,51
		18h 20'	540	19,12	1,26
		20h13'	660	18,97	1,11
06/04/2008		8h45'	1380	18,51	0,65

Tableau : données de pompage d'essai (descente) forage Matnatallet

date	début de pompage	heures	t	descente	rabattement
Mars 2008	9H 2		0'	27,56	0
			1'	29	1,44
			2'	29,74	2,18
			3'	30,78	3,22
			4'	31,69	4,13
			5'	32,68	5,12
			10'	34,41	6,85
			11'	35,34	7,78
			13'	35,86	8,3
			15'	36,57	9,01
			20'	36,79	9,23
			25'	36,79	9,23
			30'	36,79	9,23
			35'	36,79	9,23
			40'	36,79	9,23
			45'	36,79	9,23
			50'	36,79	9,23
			55'	36,79	9,23
	10h	1H	60'	36,79	9,23

Tableau : données de pompage d'essai (descente et remonté) forage F02

début de pompage	heures	t	descente	remonté	S descente	S remonté	t'	t+t'/t'
16H 00	0	0	11,06	16,39		5,33	0	
		1'		16		4,94	1	1441
		1'30"		15,35		4,29	1'30"	
		2'		15,15		4,09	2	721
		3'	13,6	14,86	2,54	3,8	3	481
		4'	14,4	14,57	3,34	3,51	4	361
		5'	14,63	14,46	3,57	3,4	5	289
		10'	15,05	13,38	3,99	2,32	10	145
		15'	15,23	12,58	4,17	1,52	15	97
		20'	15,36	12,04	4,3	0,98	20	73
		25'	15,48	11,7	4,42	0,64	25	58,6
		30'	15,58	11,5	4,52	0,44	30	49
		40'	15,89	11,32	4,83	0,26	40	37
		50'	15,89	11,23	4,83	0,17	50	29,8
17H	1H	60'	15,9	11,19	4,84	0,13	60	25
		70'	15,9	11,17	4,84	0,11	70	21,5714286
		80'	15,91	11,16	4,85	0,1	80	19
		90'	15,93	11,16	4,87	0,1	90	
		100'	15,94		4,88		100	15,4
18H	2H	120'	15,95	11,15	4,89	0,09	120	13
		130'	15,97		4,91		130	12,0769231
		150'	15,98		4,92		150	10,6
		165'	15,99		4,93		165	9,72727273
19H	3H	180'	16	11,14	4,94	0,08	180	9
		210'	16,01		4,95		210	7,85714286
20H	4H	240'	16,02	11,14	4,96	0,08	240	7
		270'	16,05		4,99		270	6,33333333
21H	5H	300'	16,05	11,13	4,99	0,07	300	5,8
22H	6H	360'	16,1	11,13	5,04	0,07	360	5
23H	7H	420'	16,12	11,12	5,06	0,06	420	4,42857143
24H	8H	480'	16,13	11,12	5,07	0,06	480	4
1H	9H	540'	16,14		5,08			
2H	10H	600'	16,14		5,08			
3H	11H	660'	16,15		5,09			

4H	12H	720'	16,16		5,1			
5H	13H	780'	16,17		5,11			
6H	14H	840'	16,17		5,11			
7H	15H	900'	16,2		5,14			
8H	16H	960'	16,27		5,21			
10H	18H	1080'	16,32		5,26			
12H	20H	1200'	16,37					
15H	23H	1380'	16,39		5,33			
16H 00	24H	1440'	16,39		5,33			

Tableau : données de pompage d'essai (descente) forage F05

date	heures	debit L/S	t	Descente	S	Remonté	S
	16H 00	1.5	0	10,68	0	17,7	7,02
		1.5	30"			17	6,32
		1.5				16,41	5,73
			1'30"			15,84	5,16
			2'			15,34	4,66
			3'			14,3	3,62
			4'			13,94	3,26
			5'			12,76	2,08
		1,5	10'	11,73	1,05	11,86	1,18
		1,5	15'	11,725	1,045	11,68	1
		1,5	20'	11,74	1,06	11,62	0,94
		1,5	25'	11,75	1,07	11,56	0,88
		1,5	30'	11,76	1,08	11,51	0,83
		1,5	40'	11,78	1,1	11,47	0,79
		1,5	50'	11,8	1,12	11,44	0,76
	17H	1,5	60'	11,82	1,14	11,42	0,74
		1,5	70'	11,84	1,16	11,39	0,71
		1,5	80'	11,85	1,17	11,37	0,69
		1,5	90'	11,86	1,18	11,35	0,67
		1,5	100'	11,88	1,2	11,33	0,65
	18H	1,5	120'	11,89	1,21	11,31	0,63
		1,5	130'	11,89	1,21	11,29	0,61
		1,5	150'	11,9	1,22	11,27	0,59
		1,5	165'	11,92	1,24	11,25	0,57
	19H	1,5	180'	11,93	1,25	11,23	0,55
		1,5	210'	11,94	1,26	11,21	0,53
	20H	1,5	240'	11,97	1,29	11,18	0,5
		1,5	270'	11,99	1,31	11,15	0,47
	21H	1,5	300'	12,02	1,34	11,13	0,45
	22H	1,5	360'	12,05	1,37	11,1	0,42

	23H	1,5	420'	12,06	1,38	11,07	0,39
	24H	1,5	480'	12,07	1,39	11,03	0,35
	1H	3	540'	12,94	2,26		
	2H	3	600'	12,97	2,29		
	3H	3	660'	13	2,32		
	4H	3	720'	13,18	2,5		
	5H	3	780'	13,26	2,58		
	6H	3	840'	13,3	2,62		
	7H	3	900'	13,35	2,67		
	8H	3	960'	13,41	2,73		
	8H30'	3	990'	17,39	6,71		
	9H	3	1020'	17,15	6,47		
	10H	3	1080'	17,17	6,49		
	11H	3	1140'	17,3	6,62		
	12H	3	1200'	17,4	6,72		
	13H	3	1260'	17,52	6,84		
	14H	3	1320'	17,63	6,95		
	15H	3	1380'	17,65	6,97		
	16H 00	3	1440'	17,7	7,02		

Les données des essais Lugeon

Sondage SM 01 :

Base du forage : 14.00 m Niveau d'eau avant l'essai 13.8 m Hauteur du manomètre : 0.4 m					Sondage N° : SZ 01 Profondeur : 11.00-14.00			
Pression (bars)	Durée Injection (min)	Niveau Eau(m)	Compteur (litre)		Débits Injecté (litre/min)	Pression statique (Bars)	Perte de charge (Bars)	Pression Corrigée (bars)
			Début	Fin				
1	10	13.8	1.4	452.5	45.11	1.29	0.154	2.14
2	10	13.8	9.4	667.9	65.85	1.29	0.316	2.97
4	10	13.8	1.8	661.4	68.96	1.29	0.345	4.95

Tableau : données d'essai Lugeons du sondage 1 (tranche 11.00-14.00 m).

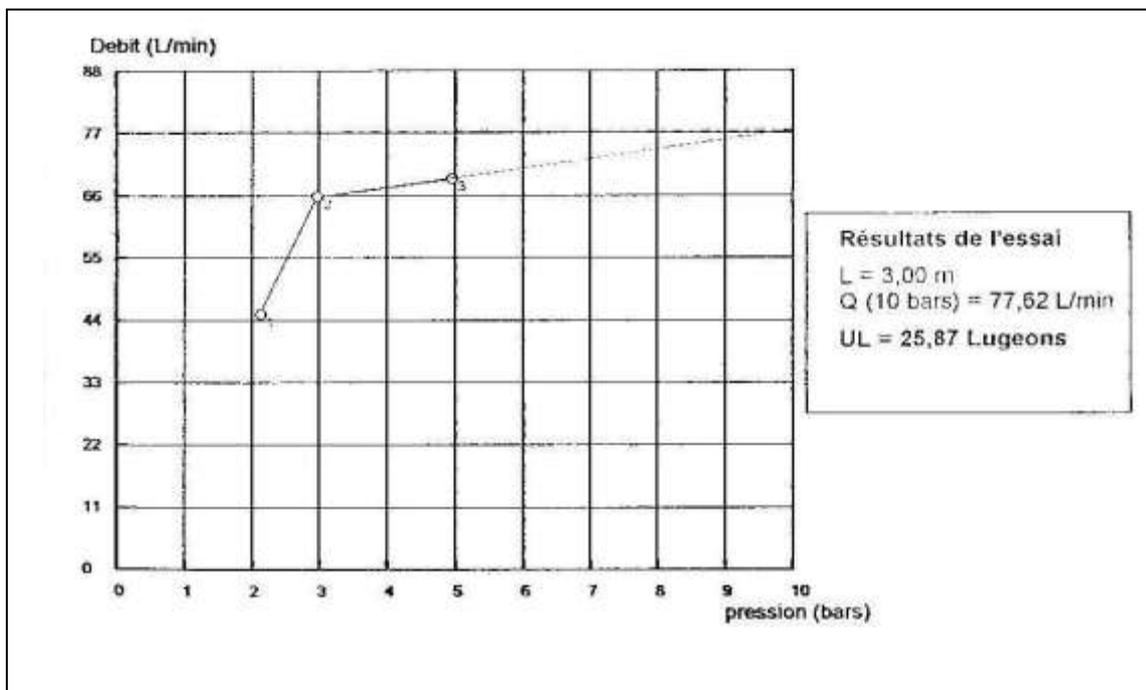


Figure : courbe d'essai Lugeons du sondage 1 (tranche 11.00-14.00 m).

Base du forage : 16.00 m Niveau d'eau avant l'essai 13.9 m Hauteur du manomètre : 0.4 m					Sondage N° : SZ 01 Profondeur : 14.00-16.00			
Pression (bars)	Durée Injection (min)	Niveau Eau(m)	Compteur (litre)		Débits Injecté (litre/min)	Pression statique (Bars)	Perte de charge (Bars)	Pression Corrigée (bars)
			Début	Fin				
1	10	13.9	2.3	452.5	608.5	1.43	0.343	9.02
2	10	13.9	9.1	667.9	56.46	1.43	0.30	3.13
4	4	13.9	2.2	661.4	80.45	1.43	0.589	4..84

Tableau : données d'essai Lugeons du sondage 1 (tranche 14.00-16.00 m)

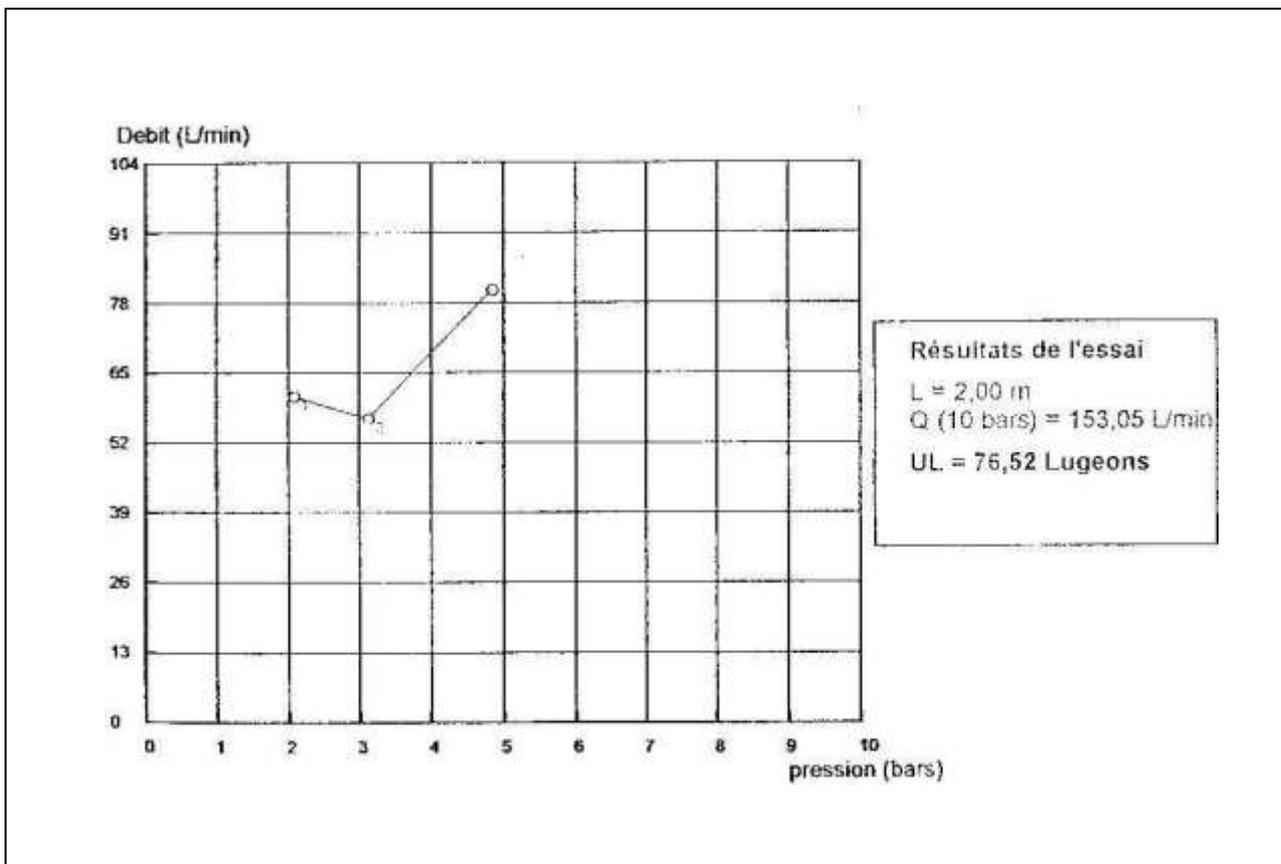


Figure : courbe d'essai Lugeons du sondage 1 (tranche 14.00-16.00)

Sondage SM02 :

Base du forage : 13.00 m Niveau d'eau avant l'essai 12 m Hauteur du manomètre : 0.4 m					Sondage N° : SZ 02 Profondeur : 10.50-13.00			
Pression (bars)	Durée Injection (min)	Niveau Eau(m)	Compteur (litre)		Débits Injecté (litre/min)	Pression statique (Bars)	Perte de charge (Bars)	Pression Corrigée (bars)
			Début	Fin				
1	10	12	7.4	553.6	54.62	1.215	0.221	1.99
2	10	12	8.2	631.2	62.30	1.215	0.284	2.93
4	10	12	4.4	738.3	73.39	1.215	0.215	4.83

Tableau : données d'essai Lugeons du sondage 2

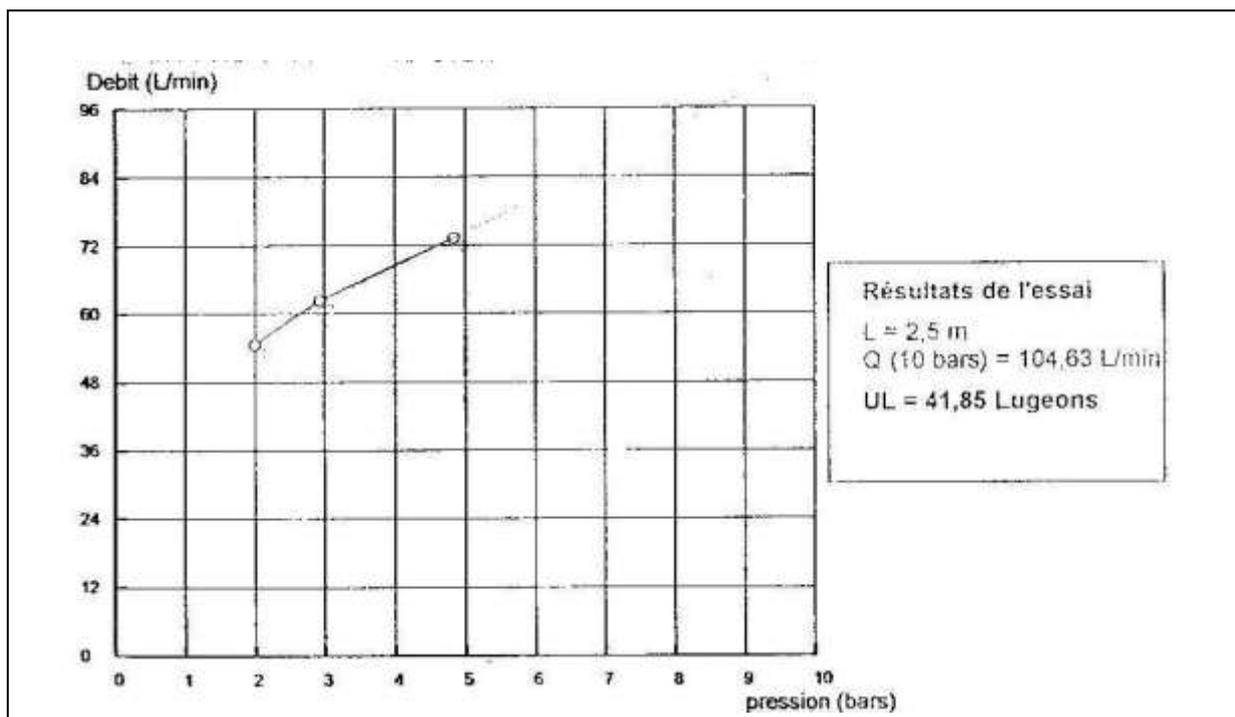


Figure : courbe d'essai Lugeons du sondage 2

Sondage SM 03 :

Base du forage : 13.00 m Niveau d'eau avant l'essai 7.4 m Hauteur du manomètre : 0.4 m					Sondage N° : SZ 03 Profondeur : 15.50-17.00			
Pression (bars)	Durée Injection (min)	Niveau Eau(m)	Compteur (litre)		Débits Injecté (litre/min)	Pression statique (Bars)	Perte de charge (Bars)	Pression Corrigée (bars)
			Début	Fin				
1	10	7.4	5.4	191	18.56	0.78	0.045	1.73
2	10	7.4	9.2	273.2	26.40	0.78	0.084	2.70
4	10	7.4	13.2	365.2	35.20	0.78	0.142	4.64

Tableau : données d'essai Lugeons du sondage 3

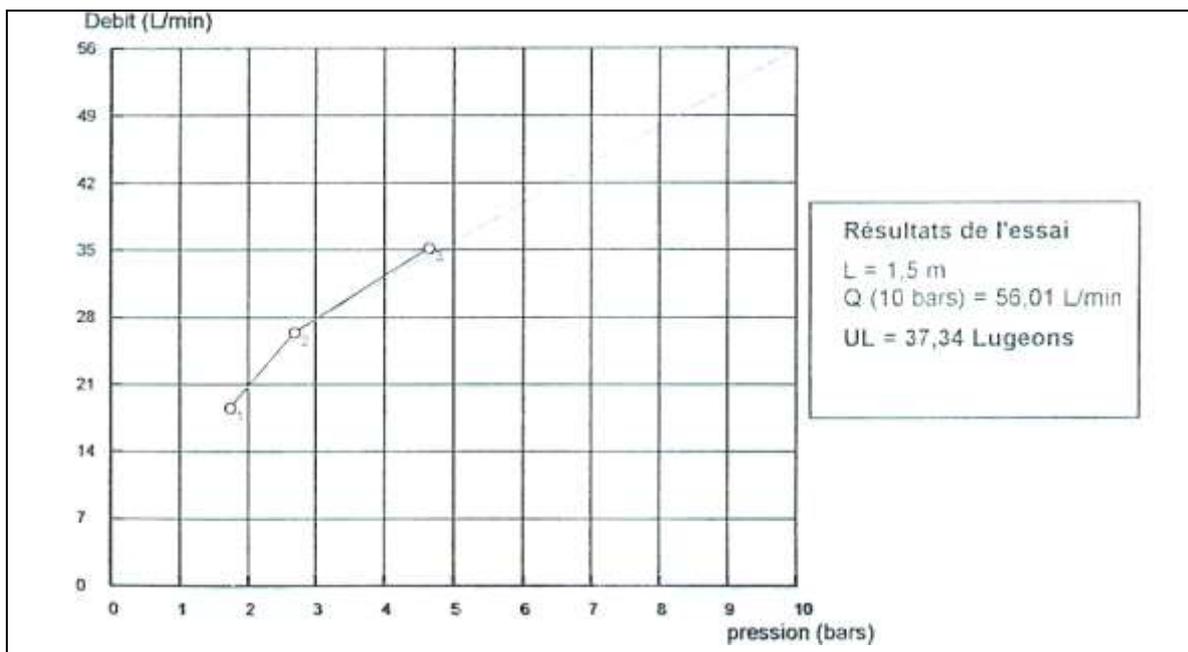


Figure : courbe d'essai Lugeons du sondage 3

Sondage SM 04 :

Base du forage : 15.00 m					Sondage N° : SZ 04			
Niveau d'eau avant l'essai 8.2 m					Profondeur : 13.00 - 15.00			
Hauteur du manomètre : 0.4 m								
Pression (bars)	Durée Injection (min)	Niveau Eau(m)	Compteur (litre)		Débits Injecté (litre/min)	Pression statique (Bars)	Perte de charge (Bars)	Pression Corrigée (bars)
			Début	Fin				
1	10	8.2	6.6	131.1	12.45	0.86	0.019	1.84
2	10	8.2	4.4	168	16.36	0.86	0.03	2.83
4	10	8.2	7.2	232.2	22.50	0.86	0.051	4.81
6	10	8.2	9.4	374.1	36.47	0.86	0.123	6.74
5	10	8.2	11.2	326.2	31.50	0.86	0.094	5.77
3	10	8.2	14.2	218.2	20.40	0.86	0.043	3.82
1	10	8.2	10.2	135.2	12.50	0.86	0.019	1.84

Tableau : données d'essai Lugeons du sondage 4

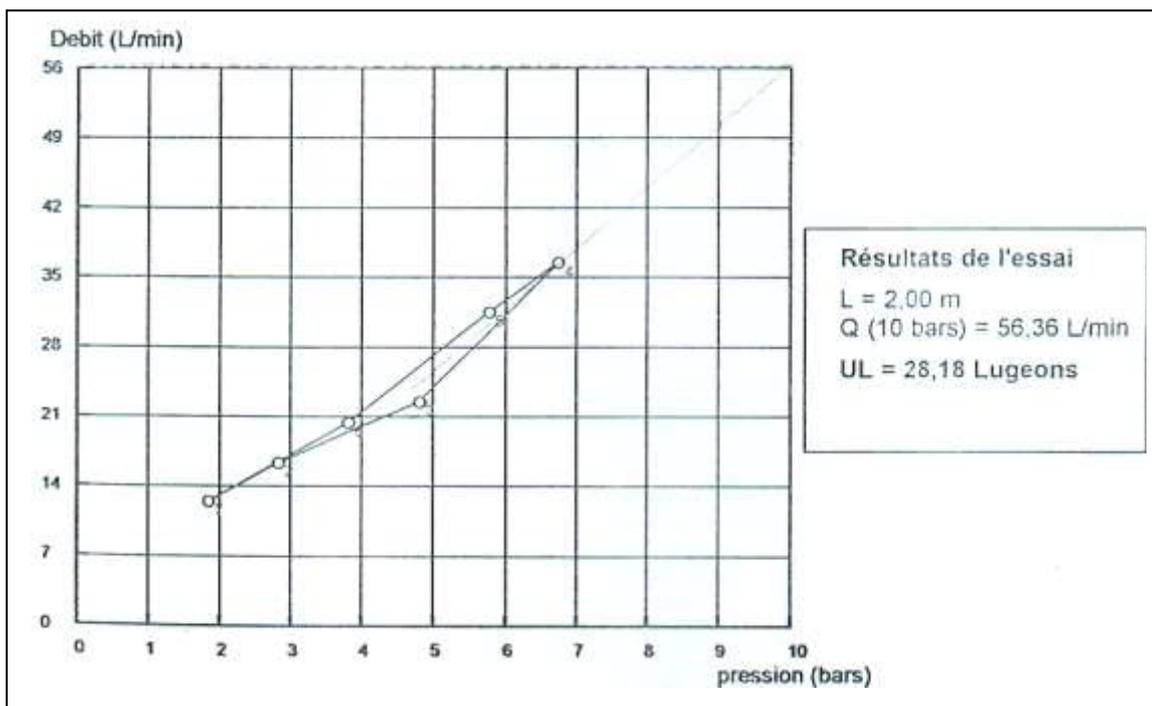


Figure : courbe d'essai Lugeons du sondage 4

Sondage SM 05 :

Base du forage : 15.00 m Niveau d'eau avant l'essai 4.5 m Hauteur du manomètre : 0.4 m					Sondage N° : SZ 05 Profondeur : 13.00 - 14.00			
Pression (bars)	Durée Injection (min)	Niveau Eau(m)	Compteur (litre)		Débits Injecté (litre/min)	Pression statique (Bars)	Perte de charge (Bars)	Pression Corrigée (bars)
			Début	Fin				
1	10	4.5	5.3	6	0.07	0.49	0.00	1.49
2	10	4.5	2.4	34.4	3.20	0.49	0.02	2.49
4	10	4.5	4.3	50.3	4.60	0.49	0.004	4.49
6	10	4.5	8.1	82.1	7.40	0.49	0.008	6.48
5	10	4.5	12.4	76.1	6.37	0.49	0.007	5.48
3	10	4.5	14.2	51.2	3.70	0.49	0.003	3.49
1	10	4.5	20.2	22.2	0.20	0.49	0.00	1.49

Tableau : données d'essai Lugeons du sondage 5

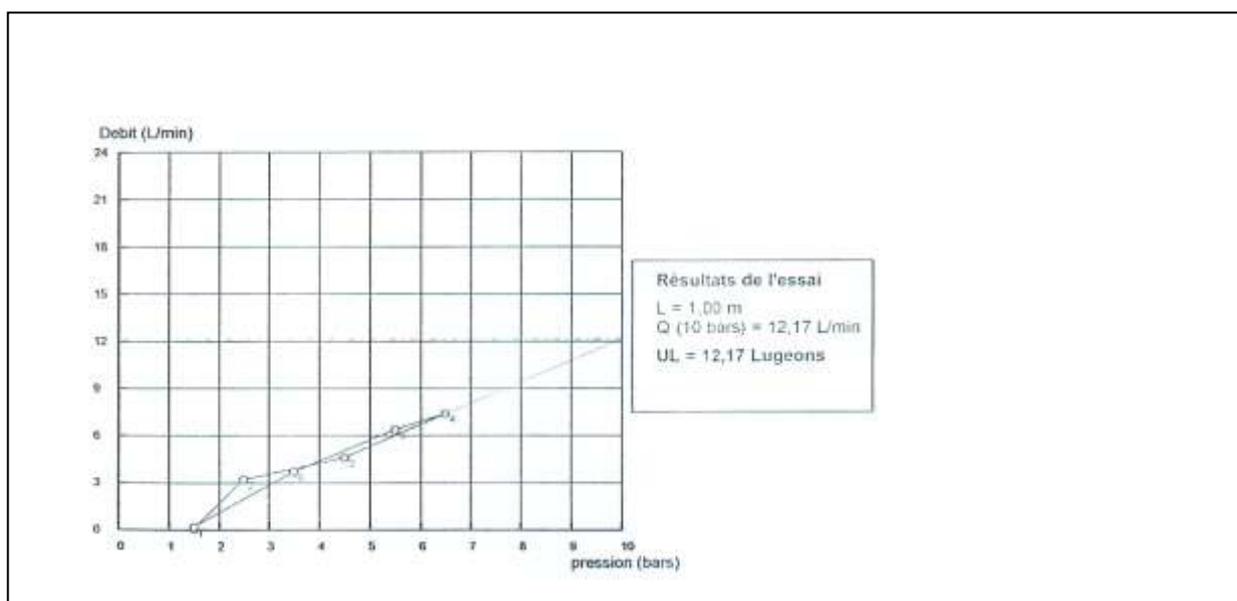


Figure : courbe d'essai Lugeons du sondage 5.

Sondage SM 06 :

Base du forage : 7.00 m Niveau d'eau avant l'essai 4.2 m Hauteur du manomètre : 0.4 m					Sondage N° : SM 06 Profondeur : 5.50 - 6.00				
Pression (bars)	Durée Injection (min)	Niveau Eau(m)	Compteur (litre)		Débits Injecté (litre/min)	Pression statique (Bars)	Perte de charge (Bars)	Pression Corrigée (bars)	
			Début	Fin					
1	10	4.2	3.2	49	4.58	0.45	0.002	1.45	
2	10	4.2	5.3	76.9	7.16	0.45	0.004	2.45	
4	10	4.2	10.4	162.8	15.24	0.45	0.012	4.44	
6	10	4.2	7.4	210.4	20.30	0.45	0.02	6.43	
5	10	4.2	12.2	198.2	18.60	0.45	0.017	5.43	
3	10	4.2	12.2	138.7	12.80	0.45	0.009	3.44	
1	10	4.2	8.1	55.1	4.70	0.45	0.002	1.45	

Tableau : données d'essai Lugeons du sondage

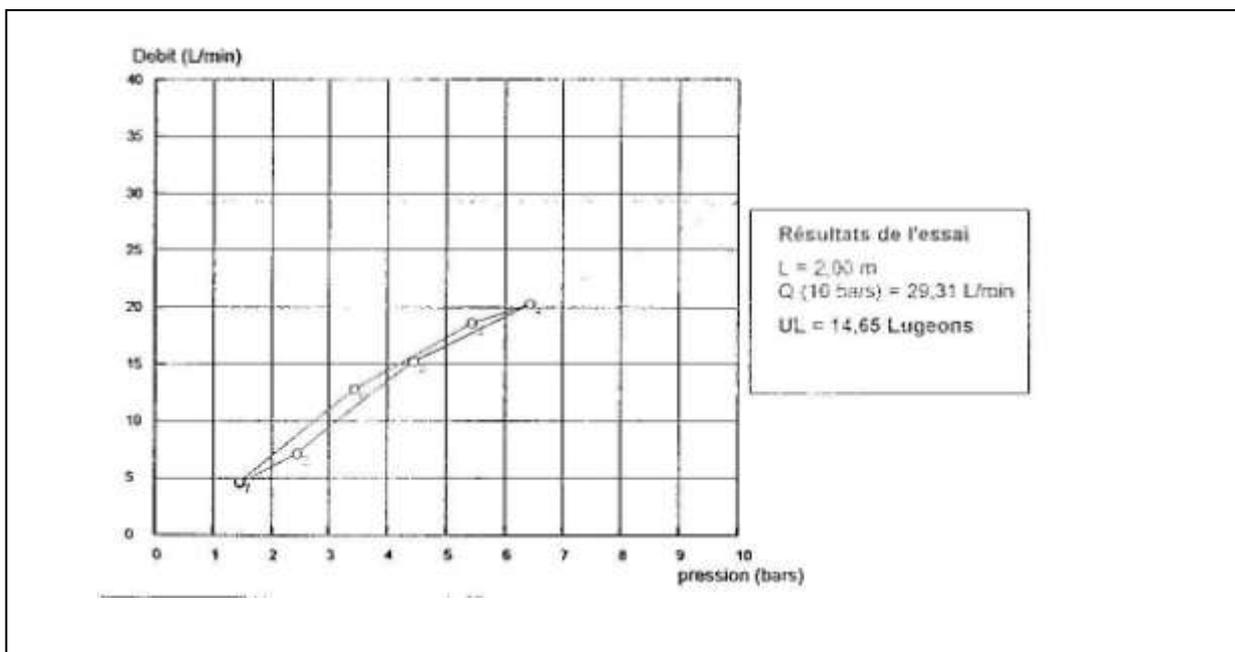


Figure : courbe d'essai Lugeons du sondage 6

Sondage SM 08 :

Base du forage : 14.00 m Niveau d'eau avant l'essai 5.4 m Hauteur du manomètre : 0.4 m					Sondage N° : SZ 08 Profondeur : 12.50 - 14.00			
Pression (bars)	Durée Injection (min)	Niveau Eau(m)	Compteur (litre)		Débits Injecté (litre/min)	Pression statique (Bars)	Perte de charge (Bars)	Pression Corrigée (bars)
			Début	Fin				
1	10	5.4	0.2	1.9	0.17	0.58	0.00	1.58
2	10	5.4	4.3	17.1	17.1	0.58	0.001	2.58
4	10	5.4	10.1	28.5	1.84	0.58	0.001	4.58
6	10	5.4	12.2	36.2	2.40	0.58	0.002	6.58
5	10	5.4	14.1	35	2.09	0.58	0.001	5.58
3	10	5.4	20.3	35.2	1.49	0.58	0.001	3.58
1	10	5.4	7.3	10	0.27	0.58	0.00	1.58

Tableau : données d'essai Lugeons du sondage 8

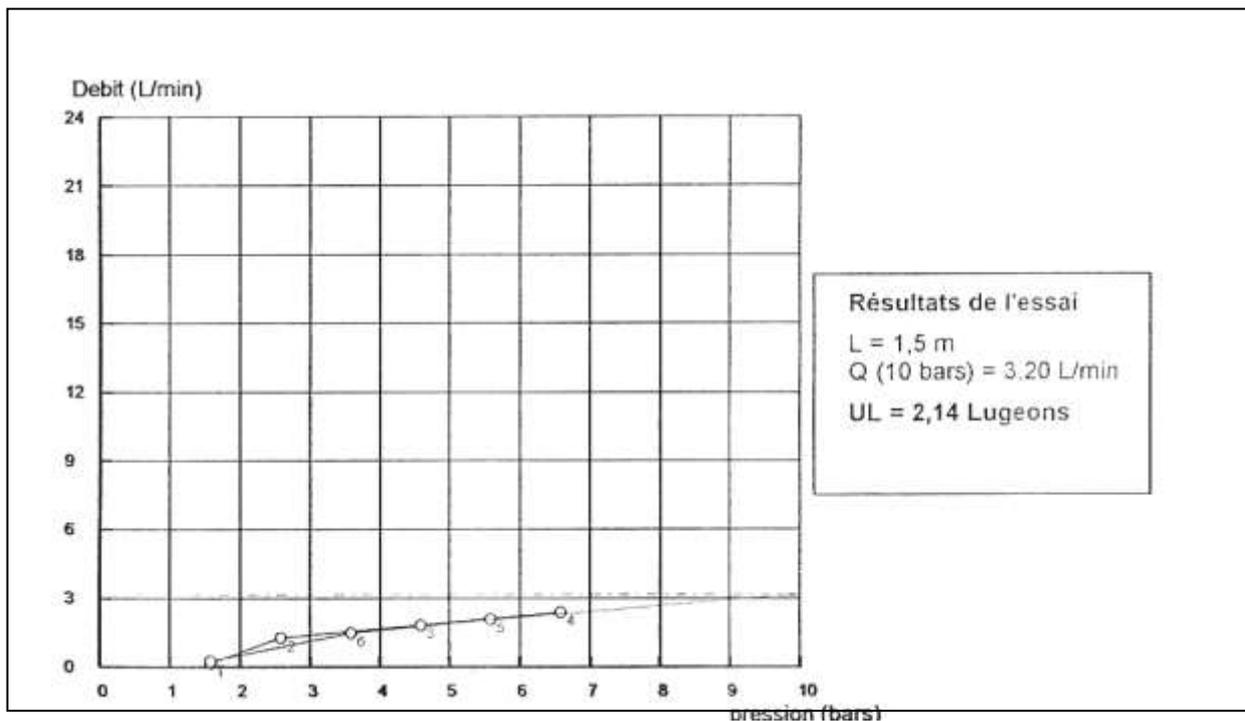


Figure : courbe d'essai Lugeons du sondage 8

Sondage SM 0 9:

Base du forage : 10.4 m Niveau d'eau avant l'essai 3.2 m Hauteur du manomètre : 0.4 m					Sondage N° : SM 09 Profondeur : 08.00- 10.40			
Pression (bars)	Durée Injection (min)	Niveau Eau(m)	Compteur (litre)		Débits Injecté (litre/min)	Pression statique (Bars)	Perte de charge (Bars)	Pression Corrigée (bars)
			Début	Fin				
1	10	3.2	5.4	21.1	1.57	0.36	0.001	1.36
2	10	3.2	7.2	51.8	4.46	0.36	0.002	2.36
4	10	3.2	12.4	97.5	8.51	0.36	0.006	4.35
6	10	3.2	10.3	156.4	14.61	0.36	0.015	6.35
5	10	3.2	14.2	142.2	12.80	0.36	0.012	5.35
3	10	3.2	5.2	68.2	6.30	0.36	0.004	3.63
1	10	3.2	8.4	25.4	1.70	0.36	0.001	1.36

Tableau : données d'essai Lugeons du sondage 9

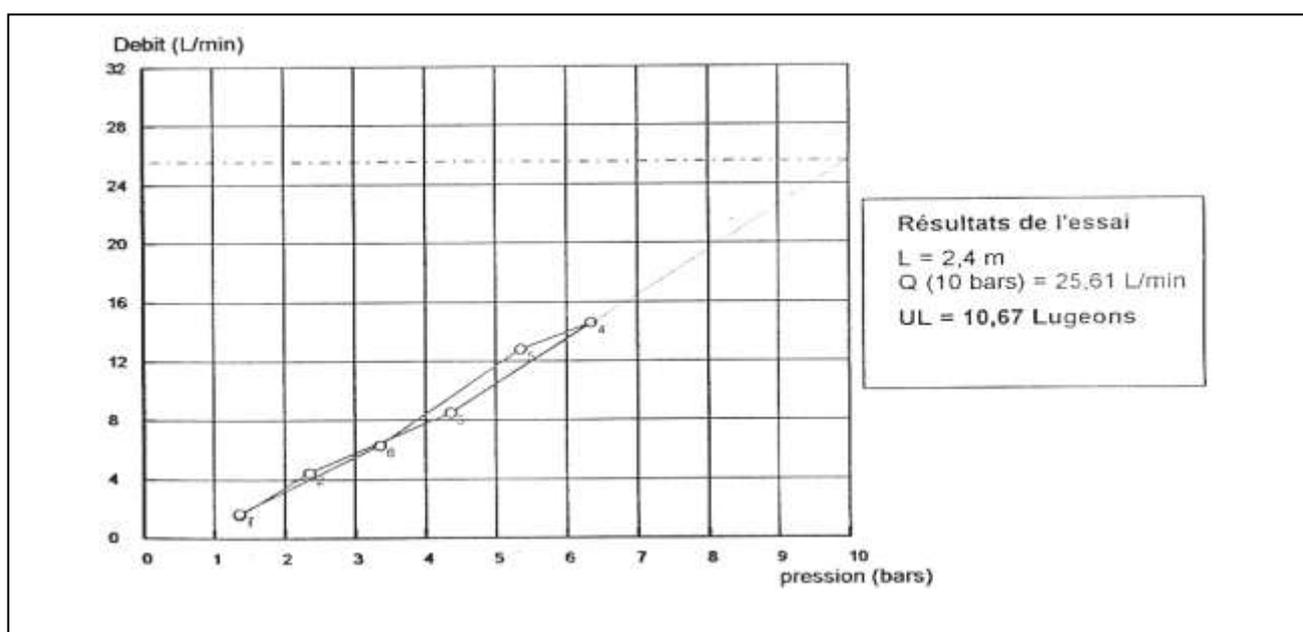


Figure : courbe d'essai Lugeons du sondage 9

Sondage SM 10 :

Base du forage : 10.00 m Niveau d'eau avant l'essai 3.8 m Hauteur du manomètre : 0.4 m					Sondage N° : SZ 10 Profondeur : 08.50 - 10.00			
Pression (bars)	Durée Injection (min)	Niveau Eau(m)	Compteur (litre)		Débits Injecté (litre/min)	Pression statique (Bars)	Perte de charge (Bars)	Pression Corrigée (bars)
			Début	Fin				
1	10	3.8	2.2	4.2	0.20	0.42	0.00	1.42
2	10	3.8	5.4	18.2	1.30	0.42	0.001	2.42
4	10	3.8	7.7	40.3	3.26	0.42	0.002	4.42
6	10	3.8	10.7	66.3	5.56	0.42	0.003	6.42
5	10	3.8	13.1	54.2	4.11	0.42	0.002	5.42
3	10	3.8	4.6	27.6	2.30	0.42	0.001	3.42
1	10	3.8	7.4	10.1	0.27	0.42	0.00	1.42

Tableau : données d'essai Lugeons du sondage 10

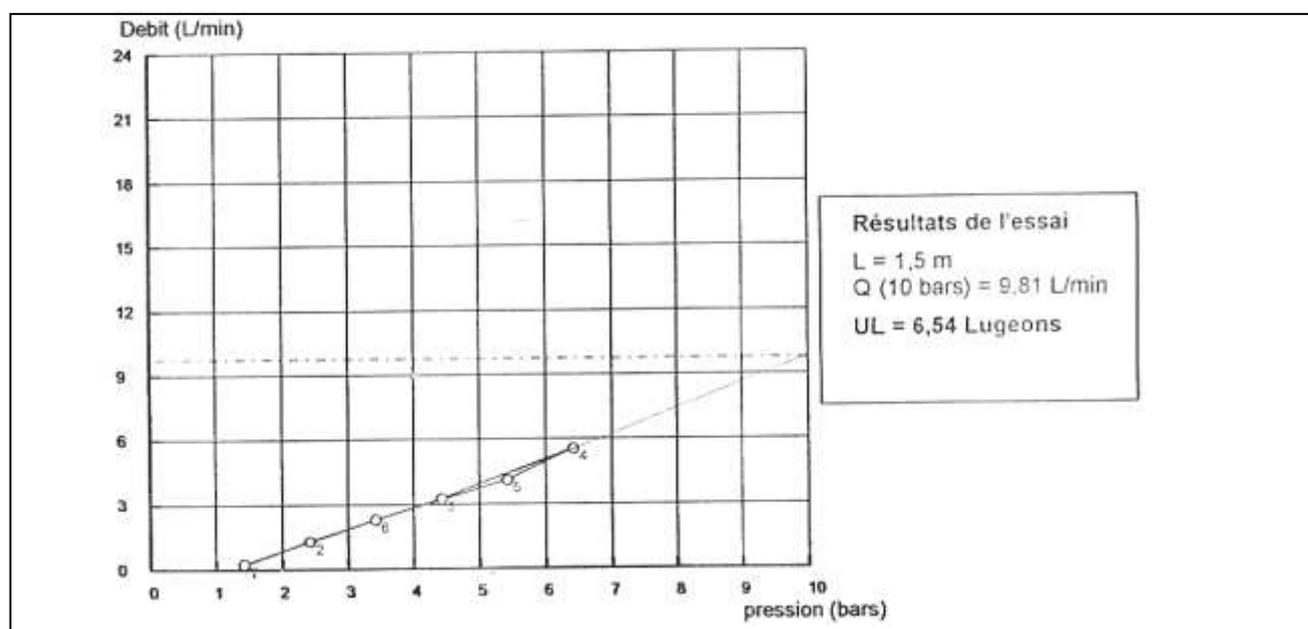
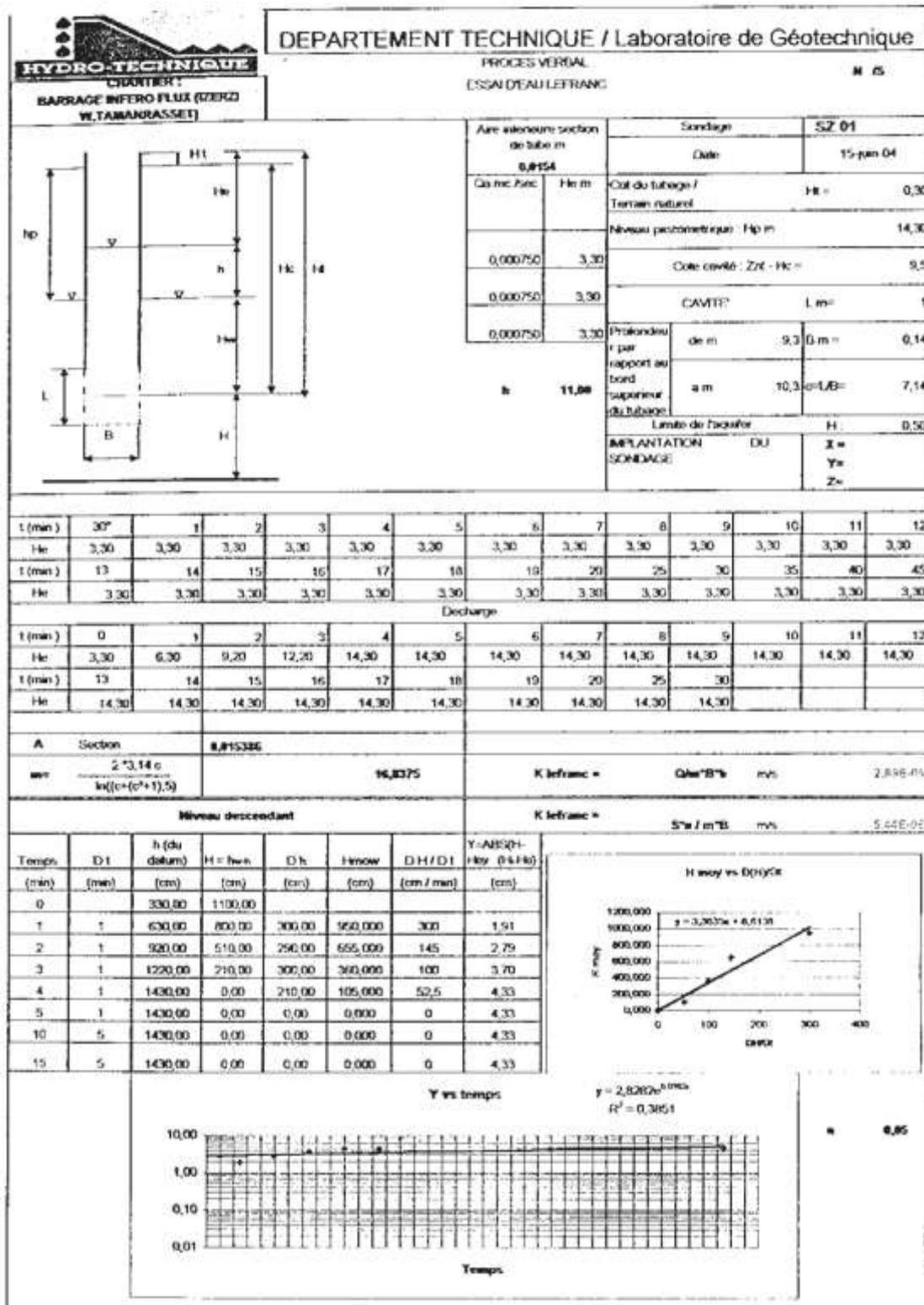
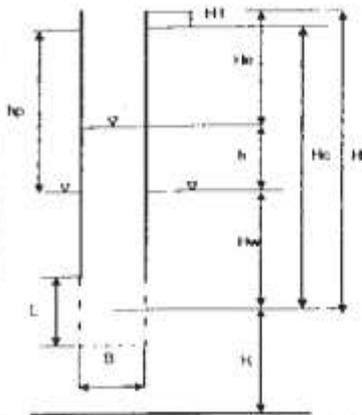


Figure : courbe d'essai Lugeons du sondage 10

Fiche technique des essais Lefranc :





Aire intérieure section de tube m		Sondage		SZ 02	
0,0154		Date		23-jan-04	
Qa mc/sec	l/m	Cote du tubage / Terrain naturel		H = 0,20	
0,000660	4,50	Niveau piézométrique : Hp m		12,50	
0,000660	4,50	Cote crête : Zc - Hc =		9,75	
0,000660	4,50	CAVITE		L m = 1,5	
h	0,90	Pertes r par rapport au bord supérieur du tubage		B m = 0,14	
		a m		c-LA3 = 10,71	
		Limite de l'aquifère		H = 0,75	
		IMPLANTATION DU SONDAGE		X m Y m Z m	

t (min)	37	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
h ₀	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
t (min)	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	45
h ₀	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50

Decharge

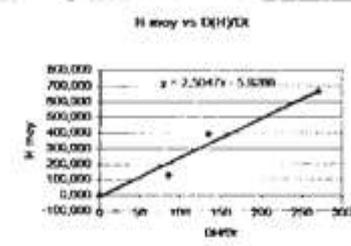
t (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
h ₀	4,50	7,20	9,90	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50
t (min)	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30			
h ₀	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50			

A	Section	0,015385			
m	$\frac{2 \cdot 3,14 \cdot c}{\ln((c^2 + 1), 5)}$		21,9394	K letrac =	Qm ² /B ² h m/s
					2,63E-04

Niveau descendant

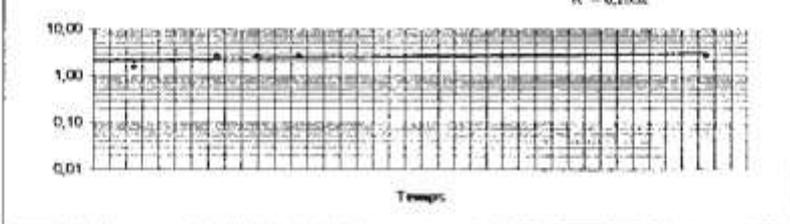
K letrac =

Temps (min) <th>D t (min) <th>h (du diaphragme) (cm) <th>H = h₀ (cm) <th>D h (cm) <th>H₀ h₀ (cm) <th>D H / D t (cm / min) <th>Y=AE(DH)-H₀ (44H₀) (cm) </th></th></th></th></th></th></th>	D t (min) <th>h (du diaphragme) (cm) <th>H = h₀ (cm) <th>D h (cm) <th>H₀ h₀ (cm) <th>D H / D t (cm / min) <th>Y=AE(DH)-H₀ (44H₀) (cm) </th></th></th></th></th></th>	h (du diaphragme) (cm) <th>H = h₀ (cm) <th>D h (cm) <th>H₀ h₀ (cm) <th>D H / D t (cm / min) <th>Y=AE(DH)-H₀ (44H₀) (cm) </th></th></th></th></th>	H = h ₀ (cm) <th>D h (cm) <th>H₀ h₀ (cm) <th>D H / D t (cm / min) <th>Y=AE(DH)-H₀ (44H₀) (cm) </th></th></th></th>	D h (cm) <th>H₀ h₀ (cm) <th>D H / D t (cm / min) <th>Y=AE(DH)-H₀ (44H₀) (cm) </th></th></th>	H ₀ h ₀ (cm) <th>D H / D t (cm / min) <th>Y=AE(DH)-H₀ (44H₀) (cm) </th></th>	D H / D t (cm / min) <th>Y=AE(DH)-H₀ (44H₀) (cm) </th>	Y=AE(DH)-H ₀ (44H ₀) (cm)
0		450,00	800,00				
1	1	720,00	530,00	270,00	665,000	270	1,60
2	1	990,00	260,00	270,00	395,000	135	2,30
3	1	1250,00	0,00	260,00	130,000	87	2,78
4	1	1250,00	0,00	0,00	0,000	0	2,78
5	1	1250,00	0,00	0,00	0,000	0	2,78
10	5	1250,00	0,00	0,00	0,000	0	2,78
15	5	1250,00	0,00	0,00	0,000	0	2,78

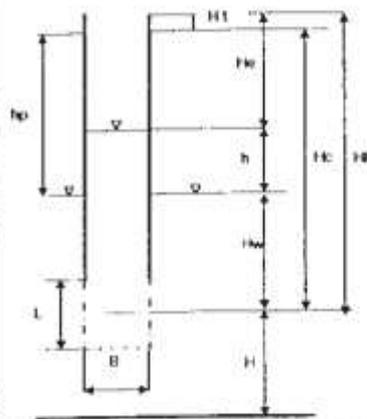


Y vs temps

$y = 2,1787e^{-0,0726x}$
 $R^2 = 0,7932$



n = 0,045



Aire intérieure section de tube m		Sondage	SZ 03
0,8154		Date	27 juin 04
Gr m/Sec	H0 m	Cot du tubage / Terrain naturel	H0 = 0,20
0,000500	2,00	Niveau piézométrique : Hp m	5,70
0,000500	2,00	Cote cavité : Zc1 - H0 =	14,75
0,000500	2,00	CAVITE' L m	1,5
h	3,70	Profondeur par rapport au bord supérieur du tubage	de m 14,2 B m = 0,14
		a m 15,7 c=L/H=	10,71
Lame de facies		H	0,75
IMPLANTATION SONDRAGE		X	X =
		Y	Y =
		Z	Z =

t (min)	30'	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hc	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
t (min)	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	45
Hc	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

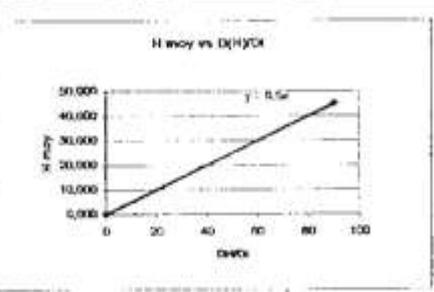
Decharge

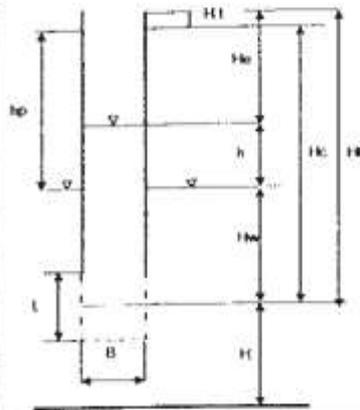
t (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hc	4,80	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70
t (min)	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30			
Hc	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70			

A Section	0,815388		
m ²	$2^2 \cdot 3,14 \cdot c$	21,9394	K lefranc =
	$\ln((c+(c^2+1),5))$		Qhw/B^2h m/s 1,102(-)

Niveau descendant	K lefranc =	S^2h / m^2B m/s 2,525(-)
-------------------	-------------	--------------------------

Temps (min)	D1 (min)	h (du datum) (cm)	H = h-w (cm)	D h (cm)	H-moy (cm)	D11/D1 (cm/min)	Y=AVS/11 H0y (1-14) (cm)
0		480,00	90,00				
1	1	570,00	0,00	90,00	45,000	90	1,19
2	1	570,00	0,00	0,00	0,000	0	1,19
3	1	570,00	0,00	0,00	0,000	0	1,19
4	1	570,00	0,00	0,00	0,000	0	1,19
5	1	570,00	0,00	0,00	0,000	0	1,19
10	5	570,00	0,00	0,00	0,000	0	1,19
15	5	570,00	0,00	0,00	0,000	0	1,19





Aire intérieure section du tube m		Sondage		SZ 05	
0,0154		Date		03-pai-04	
Qa m ³ /sec	Hc m	Cote du forage / Terrain naturel		Hc = 0,20	
0,000280	1,50	Niveau piézométrique : Hp m		4,20	
0,000280	1,50	Cote cavité : Z/c - Hc =		12,75	
0,000280	1,50	CAVITE		L m = 0,5	
b	2,70	Profondeur par rapport au bord supérieur du forage	de m	12,7	0 m = 0,14
			a m	13,2	0 m/LB = 3,57
Limité de l'aquifère				H = 0,25	
IMPORTATION DU SONDAGE				X = Y = Z =	

t (min)	30"	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hc	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
t (min)	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	45
Hc	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50

Decharge

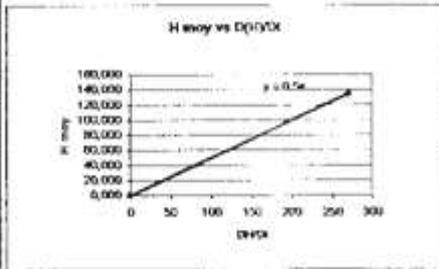
t (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hc	1,50	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20
t (min)	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30			
Hc	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20			

A	Section	0,015386											
mm	$\frac{2 \cdot 73,14 \cdot c}{k \cdot (c^2 + 1) \cdot 5}$		11,2981	K letranc =	0m ³ /m ³ h	m/s	1,38E-44						

Niveau descendant

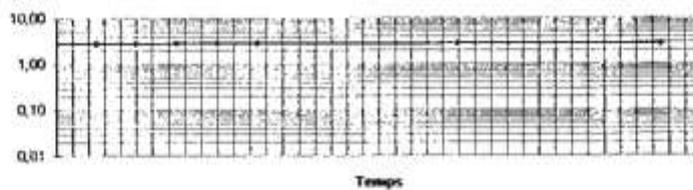
K letranc =	5 ^m / m ³ B	m/s	0,72E-03
-------------	-----------------------------------	-----	----------

Temps (min)	Dt (min)	h (du datum) (cm)	H = h + h ₀ (cm)	D h (cm)	t (min)	D H / D t (cm / min)	Y = ABS(Dt - H ₀) / H ₀ (H-H ₀) (cm)
0		150,00	270,00				
1	1	420,00	0,00	270,00	135,000	270	2,80
2	1	420,00	0,00	0,00	0,000	0	2,80
3	1	420,00	0,00	0,00	0,000	0	2,80
4	1	420,00	0,00	0,00	0,000	0	2,80
5	1	420,00	0,00	0,00	0,000	0	2,80
10	5	420,00	0,00	0,00	0,000	0	2,80
15	5	420,00	0,00	0,00	0,000	0	2,80

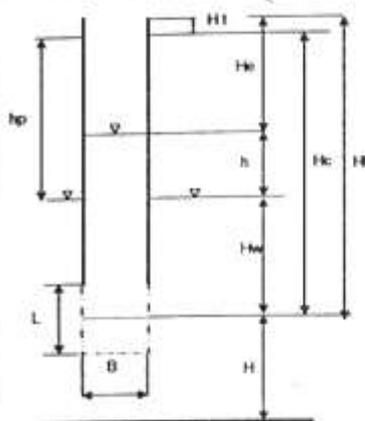


Y vs temps

$y = 2,8$
 $R^2 = 0$



R = 0,96



Aire intérieure section de tube m		Sondage		SZ 07	
0,8154		Date		10-jul-04	
Qa mc / sec	He m	Cot du tubage / Terrain naturel		Ht = 0,20	
0,001160	7,50	Niveau piézométrique - Hp m		14,70	
0,001160	7,50	Cote cavité : Znt - Hc =		17	
0,001160	7,50	CAMTE		L m = 2	
b	7,20	Profondeur par rapport au bord supérieur du tubage	de m	16,2	B m = 0,14
			a m	18,2	c-(L/B) = 14,29
		Lambe de faouiller :		H = 7,50	
		IMPLANTATION SONDAGE		DU X = Y = Z =	

t (min)	30"	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
He	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50
t (min)	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	45
He	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50

Decharge

t (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
He	7,50	11,00	14,20	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70
t (min)	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30			
He	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70			

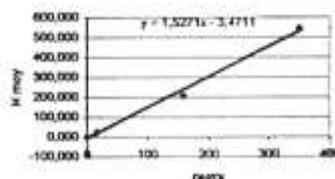
A Section	0,815386		
m ²	$\frac{2 * 3,14 * c}{ln((c^2+1),5)}$	26,7514	K lefranc = Qhs * B^3 h m/s 4,30249

Niveau descendant

K lefranc = S^2 a / m^2 B m/s 3,42E-05

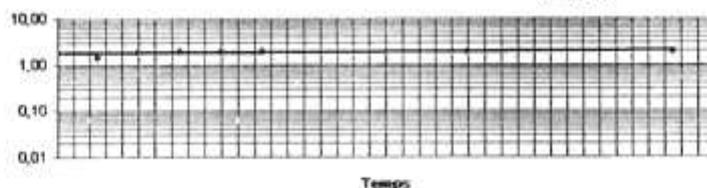
Temps (min)	Dt (min)	h (du datum) (cm)	H = h0 - h (cm)	Dh (cm)	Hmoy (cm)	DH / Dt (cm / min)	Y=ABS(H-H0) / H0 (h-H0) (cm)
0		750,00	720,00				
1	1	1100,00	370,00	350,00	545,000	350	1,47
2	1	1420,00	50,00	320,00	210,000	160	1,89
3	1	1470,00	0,00	50,00	25,000	17	1,96
4	1	1470,00	0,00	0,00	0,000	0	1,96
5	1	1470,00	0,00	0,00	0,000	0	1,96
10	5	1470,00	0,00	0,00	0,000	0	1,96
15	5	1470,00	0,00	0,00	0,000	0	1,96

H moy vs D(h)/Dt

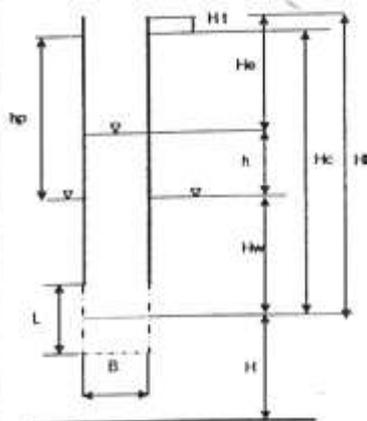


Y vs temps

$y = 1,7685e^{-0,0005x}$
 $R^2 = 0,2103$



n = 0,02



Aire intérieure section de tube m		Sondage		SZ 08	
0,8154		Date		18-jul-04	
Qa mc/sec	Ha m	Coté du tubage / Terrain naturel		Ht = 0,20	
0,000600	0,50	Niveau piézométrique : Hp m		3,20	
0,000600	0,50	Cote cavité : Zc - Hc =		12,25	
0,000600	0,50	CAVITE'		L m = 0,5	
h	2,70	Profondeur par rapport au bord supérieur du tubage	de m	16,2	B m = 0,14
			a m	18,2	c-LAB = 3,57
Limite de l'aquifère		IMPLANTATION OU SONDAGE		H = 0,25 X = Y = Z =	

t (min)	30"	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
He	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
t (min)	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	45
He	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Decharge

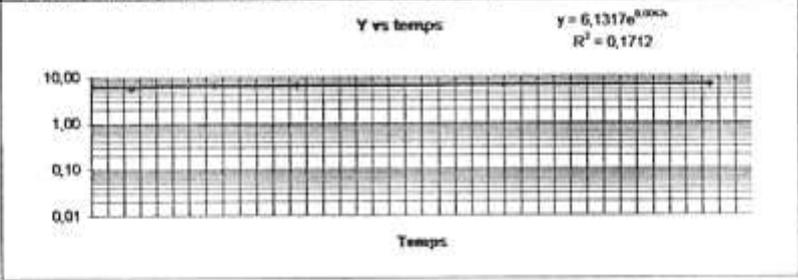
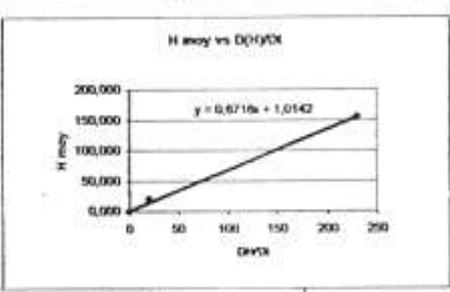
t (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
He	0,50	2,80	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
t (min)	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30			
He	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20			

A Section	8,815386			
m ²	$\frac{2 \cdot 3,14 \cdot c}{\ln((c^2+1),5)}$	11,2981	K lefranc =	Qh*B*h m/s 1,40E-01

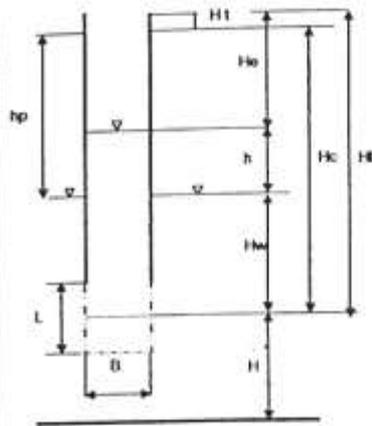
Niveau descendant

K lefranc = 5th / m²B m/s 6,43E-01

Temps (min)	D1 (min)	h (du datum) (cm)	H = hwh (cm)	Dh (cm)	Hmoy (cm)	DH / D1 (cm / min)	Y=ABS(D1-Hmoy) (1-h/h) (cm)
0		50,00	270,00				
1	1	280,00	40,00	230,00	155,000	230	5,60
2	1	320,00	0,00	40,00	20,000	20	6,40
3	1	320,00	0,00	0,00	0,000	0	6,40
4	1	320,00	0,00	0,00	0,000	0	6,40
5	1	320,00	0,00	0,00	0,000	0	6,40
10	5	320,00	0,00	0,00	0,000	0	6,40
15	5	320,00	0,00	0,00	0,000	0	6,40



n 0,04



Aire interne section de tube m		Sondage		SZ 10	
0,8154		Date		23-jul-04	
Ca mc / sec	He m	Cot du tubage / Terrain naturel		Hh = 0,20	
0,000500	1,00	Niveau piézométrique : Hp m		3,20	
0,000500	1,00	Cote cavité : Znt - Hc =		8,25	
0,000500	1,00	CAVITE' L m =		0,5	
h	2,20	Profondeur par rapport au bord supérieur du tubage	de m	8,2	B m = 0,14
		a m	8,7	c-LAB = 3,57	
		Limite de l'aquifer :		H = 0,25	
		IMPLANTATION DU SONDAGE		X = Y = Z =	

t (min)	30"	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
He	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
t (min)	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	45
He	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

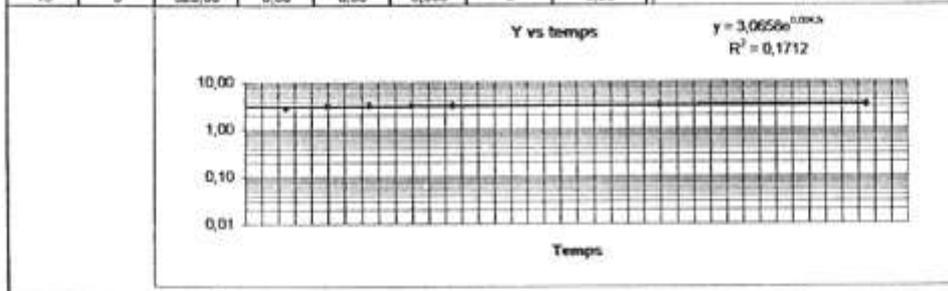
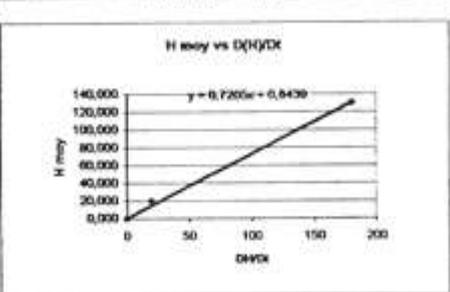
Decharge

t (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
He	1,00	2,80	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
t (min)	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30			
He	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20			

A Section	0,815386			
mm	$\frac{2 \cdot 3,14 \cdot c}{\ln[(c^2 + 1), 5]}$	11,2981	K lefranc =	$Q/m^3 \cdot h$ m/s
				1,44E-01

Niveau descendant		K lefranc =	$S^2/a / m^2$ m/s	1,42E-01
-------------------	--	-------------	-------------------	----------

Temps (min)	Dt (min)	h (du datum) (cm)	H = h - h0 (cm)	Dh (cm)	Hmoy (cm)	DH / Dt (cm / min)	Y = ABS(H - H0) / H0v (H - H0) (cm)
0		100,00	220,00				
1	1	280,00	40,00	180,00	130,000	180	2,80
2	1	320,00	0,00	40,00	20,000	20	3,20
3	1	320,00	0,00	0,00	0,000	0	3,20
4	1	320,00	0,00	0,00	0,000	0	3,20
5	1	320,00	0,00	0,00	0,000	0	3,20
10	5	320,00	0,00	0,00	0,000	0	3,20
15	5	320,00	0,00	0,00	0,000	0	3,20



0,07

Annexe III

Tableau : les analyses chimiques des forages de Tamanrasset

Forage	Résidu sec	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	CL ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	dureté
SORRO F1	314	54,11	4,86	25,97	1,58	195,23	53,25	43,05	6,72	16
FORAGE F 13	210	30,06	4,86	17,07	2,41	152,53	39,05	45,92	2,94	9
forage Assihar	516	78,16	18,2	59,36	5,07	427,07	56,8	68,06	5,46	27
Forage F14	250	32,06	4,86	17,81	2,41	134,22	35,5	34,44	8,19	10
Forage F14a	220	32,06	9,73	14,84	2,24	158,63	31,95	42,64	9,24	12
Forage F14b	204	32,06	6,08	16,32	2,08	152,53	31,95	63,14	12,39	11
matnatallet F2	352	56,11	9,73	27,45	1,33	195,23	63,9	54,12	12,81	18
Teheguine F2	612	52,1	12,2	103,88	4,49	396,57	99,4	109,9	3,57	18
matnatallet F1	1392	194,39	37,7	90,52	4,24	195,23	230,8	143,9	31,92	64
Forage F11	244	32,06	10,9	24,49	2,24	189,13	35,5	35,26	9,45	13
Forage F12	1056	140,28	35,3	138,01	12,04	1049,4	67,45	29,52	7,98	50
Teheguine F1	1040	110,22	41,3	103,88	4,65	292,85	209,5	127,1	3,15	45

Tableau: composition isotopique des eaux souterraines

Les eaux des alluvions	¹⁸ O	D	Carbone 13	Carbone 14	tritium
Guetaa el oued	-2.9	-18.3			
Outoul P2	-2.8	-15			19.1 +/-3.4
Outoul P7	-2.5	-14.5			13.2 +/-2.5
Outoul P8	-2.9	-15			19.6+/-3.6
Outoul P11	-2.3	-13			10.6 +/-2
Outoul P14	-2.3	-8			11.6+/-2.2
Outoul st pompage 1	-2.7	-18			
Outoul st pompage 2	-2.3	-14			
Outoul village	-2.9	-17.8			
Outoul jardin	-3.9	-16.7			
Tit 1	-3.1				
Tit 2	-3.2	-16.9			
Esli skein	-2.3	-11.8	-8.3	110 +/-1	20+/-3.7
In Eddid 1	-2.6	-11.3	-11.4	115 +/-0.9	13 +/- 2.5
In Eddid 2	3.6	-14.4			
Iglen	-2.7				
Ablessa1	-3.6	-18			
Ablessa 2	-3.3				
Ablessa3	-3.1				
Ezerzi	-2.2	-8.9			
Amsel 1	-1.3				
Amsel 2	-2.7	-16			
Amsel 3	-3.0	-16			
Amsel 4	-2.6	-12			
Tin Amzi (ggf)		-17			
Tin Amzi 2	-2.5	-12.7			
Tazrouk selemedj	-2.8	-13.6			

Aquifere de la zone altere	¹⁸ O	D	Carbone 13	Carbone 14	tritium
Forage 10	-4.2	-27.5			54 +/-1
Hadariane Hamo	-5.3	-29	-1.31	14.4 +/- -0.9	77 +/-2
H adariane kaolin	-4.5	-24			
In -Zaouane camping	-4.7	-30.7	-0.96	21 +/-0.9	63 +/- 1.7
In -Zaouane tamanrasset	-4.5	-31.4			
Sersouf nord	-4.4	-26.3			
Observatoire	-4.3	-26.7			
Fraternaite	-4.3	-27			
Antoin e	-4.0	-26			
St. Rec zone desert	-3.3	-19.3			
Sorro mosque	-4.4	-20.4			
Sorro mosque	-3.5	-21.6			
Amsel P27	-4.0	-23.5	-2.27	19 +/-0.9	53 +/-1
Amsel vas1	-5.0	-29.8			
Taghaouhaoute	-4.7	-23			
Outoul granite	-4.2		1.39	22.1 +/-1	14 +/-1.5
Forage Ablessa	-5.3				
Silet	-4.1	-24	-8.97	74.7 +/-0.6	
Idles el garraret	-4.3	-26.2			
Idles palmeriae	-4.3				
In -Amguel F3	-5.0	-29			
In -Amguel F7	-3.9	-24.6			
Tahifet APE	-4.4	-23.5			
Tahifet ecole	-4.5	-26.5			
Hirafok coop		-26.6			
Tahabort 11/81	-10.3	-73			<1.6 +/- -0.1
Tahabort 3/82	-9.9	-57			0.3+ /-0.1
Tahabort 4/93	-9.9				
Tahabort 6/93	-10.1	-72			
Tahabort 8/93	-9.7	-62			
Tahabort 10/93	-10.4	-74			
Tahabort 1/94	-9.9				
Tahabort 4/94	-9.8	-67			
Tahabort 8/94	-10.3	-71			
Tahabort 4/95	-9.9	-69.2	-3.05	2.4 +/-0.5	<1.3 +/-0.1
Tahabort 1/96	-9.8	-67			
Ahidja 1/94	-9.4				
Ahidja 1/96	-9.1	-61			