

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA

FACULTÉ DES HYDROCARBURES, DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DES
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERSONO



Mémoire de Master Académique

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

THEME

**Modélisation de l'écoulement des eaux dans la nappe d'infé-
flux dans la région de Tamanrasset**

Présenté par

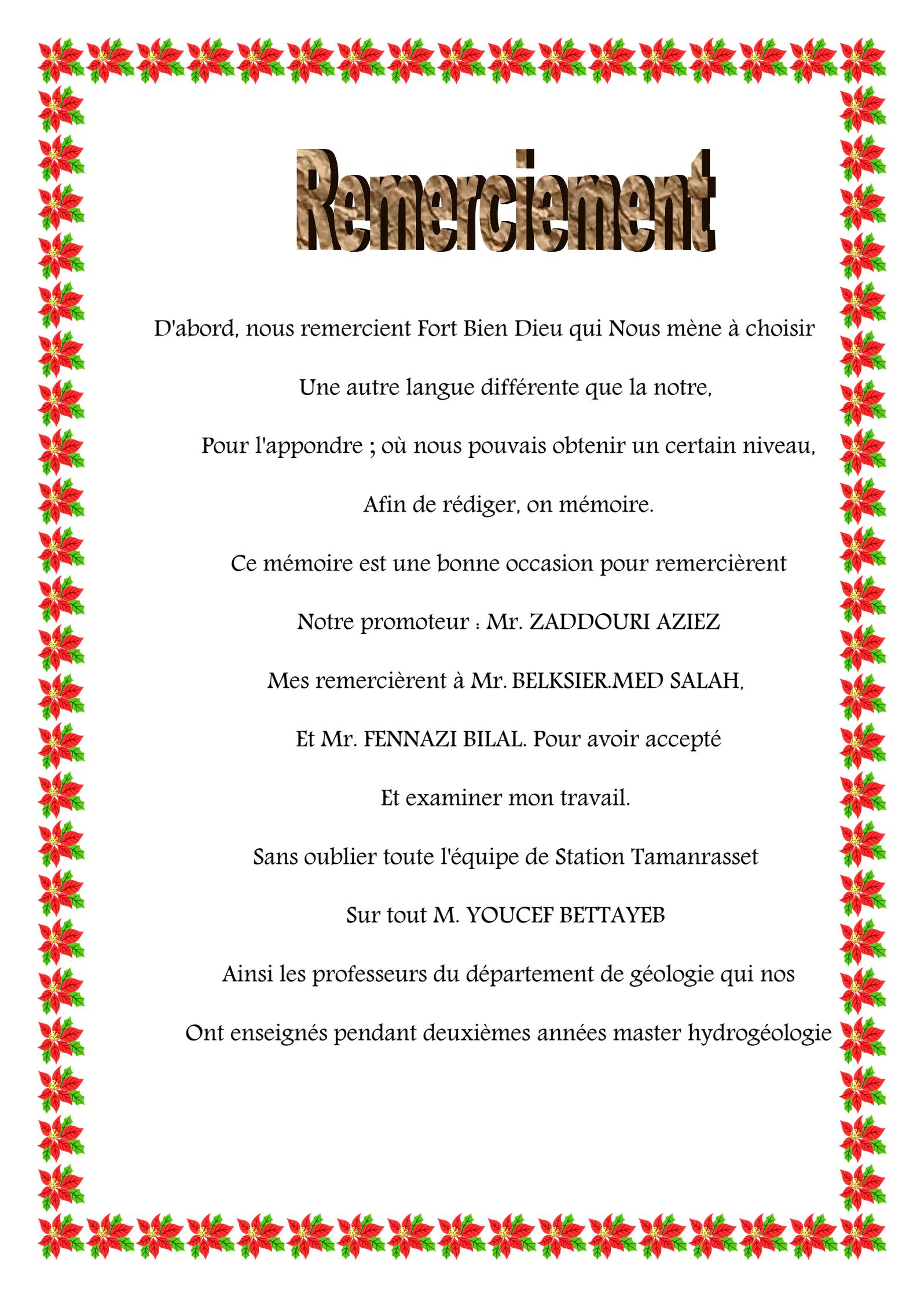
BENZAZA Riadh & DAHECH Taher

Soutenu publiquement : Le .../06/2019

Devant le jury :

Président :	Mr. BELKSIER Med salah	Pr.	Univ. Ouargla
Promoteur :	Mr. ZADDOURI Aziez	M.A.A	Univ. Ouargla
Examineur :	Mr. FANAZI Bilal	M.C.A	Univ. Ouargla

Année Universitaire : 2018/2019



Remerciement

D'abord, nous remercions Fort Bien Dieu qui Nous mène à choisir

Une autre langue différente que la notre,

Pour l'apprendre ; où nous pouvions obtenir un certain niveau,

Afin de rédiger, on mémoire.

Ce mémoire est une bonne occasion pour remercier

Notre promoteur : Mr. ZADDOURI AZIEZ

Mes remerciements à Mr. BELKSIER.MED SALAH,

Et Mr. FENNAZI BILAL. Pour avoir accepté

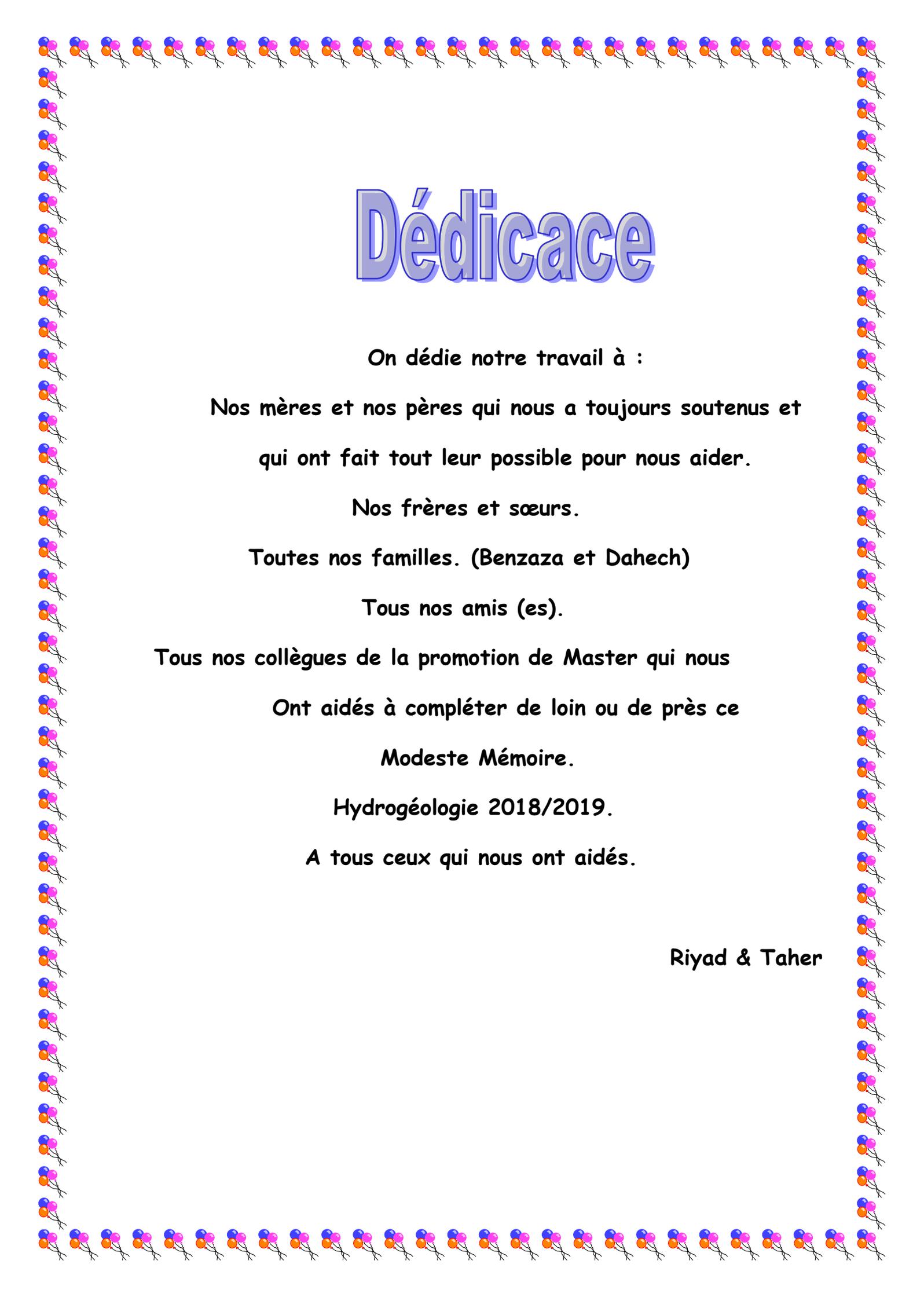
Et examiner mon travail.

Sans oublier toute l'équipe de Station Tamanrasset

Sur tout M. YUCEF BETTAYEB

Ainsi les professeurs du département de géologie qui nous

Ont enseignés pendant deuxièmes années master hydrogéologie



Dédicace

On dédie notre travail à :

**Nos mères et nos pères qui nous a toujours soutenus et
qui ont fait tout leur possible pour nous aider.**

Nos frères et sœurs.

Toutes nos familles. (Benzaza et Dahech)

Tous nos amis (es).

Tous nos collègues de la promotion de Master qui nous

Ont aidés à compléter de loin ou de près ce

Modeste Mémoire.

Hydrogéologie 2018/2019.

A tous ceux qui nous ont aidés.

Riyad & Taher

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Généralité sur la zone d'étude

I.1	Introduction :.....	2
I.2	Aspect Administratif :.....	3
I.3	Situation géographique de la zone d'étude :.....	4
I.4	Géomorphologie la wilaya de Tamanrasset :.....	5
I.4.1	Les Plateaux du Tadmait et du Tinghert.....	5
I.4.2	Les Plaines.....	5
I.4.3	Les Massifs isolés.....	5
I.4.4	Le Fossé périphérique.....	5
I.5	Cadre géologique :.....	5
I.5.1	Les ensembles géologiques.....	6
I.5.2	La géologie de la zone d'étude :.....	7
I.5.3	Structure et géologie du bassin de Tamanrasset :.....	9
I.6	Conclusion :.....	9

Chapitre II :Etude hydro climatique

II.1	Introduction :.....	10
II.2	Etude des facteurs climatiques.....	10
II.2.1	La Température.....	10
II.2.2	Précipitation :.....	11
II.2.3	Indice de de Martonne.....	12
II.2.4	Humidité :.....	13
II.2.5	Les ventes :.....	15
II.3	Estimation de l'ETP (l'évapotranspiration potentielle) :.....	15
	L'évapotranspiration Réelle :.....	16
II.4	Conclusion :.....	17
II.5	Etude hydrologique.....	18
II.5.1	Hydrographie :.....	18
II.5.2	Oued Tamanrasset :.....	18

Chapitre III : Etude hydrogéologique

III.1	Introduction :	22
III.2	notion de la nappe inféro-flux :	22
III.3	Terrains aquifères de la zone d'étude :	22
III.3.1	Les Alluvions :	22
III.3.2	Socle altéré :	22
III.3.3	Socle sain :	23
III.4	Etudes hydrogéologique antérieures :	24
III.5	Etude de la nappe d'inféro flux :	24
III.5.1	Caractéristique générale de la nappe :	24
III.5.2	Hydrodynamique de la nappe :	25
III.6	Délimitation de la zone d'étude :	26
III.6.1	Interprétation de la carte piézométrique :	28
III.6.2	Interprétation de la carte piézométrique :	31
III.6.3	Comparative entre les deux (2) cartes :	31
III.7	Mode d'exploitation de la nappe.....	31
III.8	Conclusion :	31

Chapitre IV : Molélisation de l'écoulement des eaux dans la nappe

IV.1	Matériels et Méthodes	33
IV.1.1	Méthode d'échantillonnage sur terrain :	33
IV.1.2	Modélisation des écoulements d'eaux souterraines et présentation du logiciel	33
IV.1.3	Modélisation Conceptuelle et Numérique Intégrée 3D des écoulements d'eau	33
IV.1.4	Objectif des modèles numériques.....	34
IV.1.5	Déroulement de la modélisation :	35
IV.1.6	Initialisation:	37
IV.1.7	Conditions aux limites	37
IV.1.8	Objectif et méthode du calage	37
IV.2	Campagne piézométrique de la nappe d'inféro-flux (oued Tamanrasset) :	37
IV.3	Délimitation de la zone à modéliser :	38
IV.4	Modèle topographique de la nappe d'inféro-flux :	39
IV.4.1	Discrétisation du domaine à modéliser :	40
IV.4.2	Implémentation des données :	41
IV.5	Les condition aux initiale et les condition aux limites :	43

IV.6	Calage du modèle en régime permanent :	43
IV.7	Restitution de la piézométrie :	46
IV.8	Etude du bilan après calage :	48
IV.9	Conclusion :	48

Chapitre V : Etude hydro chimique

V.1	Introduction :	50
V.2	Caractéristiques physico-chimique :	51
V.2.1	Température :	51
V.2.2	Conductivité :	51
V.2.3	Le résidu sec :	52
V.3	Classification des eaux et représentation graphique :	53
V.3.1	Classification des eaux selon stabler :	53
V.3.2	Représentation des eaux selon le diagramme de Piper :	53
V.4	Paramètres chimique :	55
V.5	Qualité chimique de l'eau :	57
V.6	Conclusion:	58
Conclusion générale :		59

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation de la région de Tamanrasset3

Figure 2: les daïras et les communes de la wilaya de Tamanrasset4

Figure 3: Situation géographique de la zone d'étude. (Google Earth)4

Figure 4: Carte géologique simplifiée de la région de Tamanrasset (Réalisée à partir d'une image Google Earth 2010).6

Figure 5: histogramme de la température moyenne mensuelle de la zone d'étude11

Figure 6: histogramme de précipitation moyenne mensuelle (station Tamanrasset).....12

Figure 7: courbe d'humidité relative de la zone d'étude (station Tamanrasset 2000-2018)14

Figure 8: Le bassin versant de la zone d'étude (Hemdi.F.213)20

Figure 9:Coup stratigraphique le long d'un profil en travers de la cuvette de l'oued (rapport hydrogéologique mission II, ENHYD)23

Figure 10: La carte Piézométrique de l'Oued Tamanrasset (Compagne 2003).....28

Figure 11: La carte Piézométrique de l'Oued Tamanrasset (compagne 2016).....30

Figure 12:Discrétisation d'un aquifère à l'aide d'un maillage en différences finies et en éléments finis35

Figure 13:les formes des maillages36

Figure 14:carte de localisation des puits (google earth)39

Figure 15:modèle 3D et extension de l'aquifère de l'oued Tamanrasset40

Figure 16:Extension du domaine modélisé.....41

Figure 17:carte localisation des piézomètres42

Figure 18:corrélation finale entre valeur mesurées et calculées de la piézométrie.....44

Figure 19:Carte de distribution des perméabilités après calage en régime permanent.....45

Figure 20:évolution du résidu et des changements de la piézométrie en fonction du nombre d'itérations46

Figure 21:carte piézométrique calculée après calage47

Figure 22:résultats du bilan après calage en régime permanent48

Figure 23 : Histogrammes des conductivités (avril 2019)52

Figure 24 : Histogrammes du résidu sec (avril 2019).....52

Figure 25: Représentation des eaux selon le diagramme de Piper (avril 2019)54

Figure 26: Représentation des eaux selon le diagramme de schoeller (avril 2019)55

Liste des tableaux

Tableau 1 : les coordonnées géographiques de la station de Tamanrasset.....	10
Tableau 2: la température moyenne mensuelle de la zone d'étude (station Tamanrasset).	11
Tableau 3 : la précipitation moyenne mensuelle de secteur d'étude	11
Tableau 4 : Indice de de Martonne	13
Tableau 5 : humidité relative de la station de tamanrasset.	14
Tableau 6 : le vent (station tamanrasset 2000-2018).	15
Tableau 7 : bilan hydrique (2000-2018).	17
Tableau 8: la géométrie de bassin versant	19
Tableau 9: les estimations de volumes (aquifère et nappe)	25
Tableau 10: Estimation des réserves exploitables.	25
Tableau 11: L'inventaire des points de la nappe inféro-flux	27
Tableau 12: coordonnées des points d'eau inventoriés dans la cuvette (oued Tamanrasset). ...	29
Tableau 13: résultats des analyses hydro chimiques en (mg/l).	51
Tableau 14: classification des eaux selon stabler.	53

Liste des abréviations

A.N.R.H : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

ENEHYD : Entreprise Nationale des Etudes Hydrauliques

A.E.P : Alimentation en eau potable

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

T : température annuelle en(C°)

ETP : évapotranspiration potentiel (mm)

P : précipitation annuelle (mm)

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

Exc : excédante (mm)

Def : déficit Agricole (mm)

RFU : réserve facilement utilisable (mm)

hr : l'humidité relative (%)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'Ahaggar est un massif cristallin et cristallophyllien situé au centre du Sahara. Il est distant de 2000 km d'Alger. Il couvre une superficie d'environ 500,000 km²

La région d'étude située dans l'amont de la ville de Tamanrasset, caractérisé par un climat aride et avec une faible pluviométrie, des températures très élevées en été et une forte évaporation.

Actuellement, les ressources en eau dont dispose la ville sont fournies par quelques nappes d'inféro-flux situées dans les environs immédiats de la ville. Elles sont peu importantes, et n'arrivent pas à couvrir les besoins d'une population en constante augmentation. L'irrigation des jardins et quelques petites unités industrielles.

Le but de ce travail est d'étudier la géologie et l'hydrogéologie dans cette zone et le principal objectif est l'étude de la modélisation de l'écoulement des eaux dans cette nappe et la caractérisation hydrodynamique qui permet de reconnaître les débits entrant et sortant dans cette zone d'étude.

CHAPITRE I :
GÉNÉRALITÉ SUR LA ZONE
D'ÉTUDE

I.1 Introduction :

La région de Tamanrasset est située au sud de l'Algérie., une vaste terre aride, au milieu du Sahara algérien, elle est la capitale du Hoggar.

Sa superficie est de 619360 km² avec une population estimée à 205 220 habitants (2010).

La ville de Tamanrasset est un axe incontournable des Nomades et des Touaregs, qui arpentent les dunes, les regs du Sahara, du Mali au Niger Passant par le Tchad et la Libye, situé dans le centre de Hoggar à 1400 mètres d'altitude et délimite par les coordonnées suivants :

22° 48 Nord et 5° 35 Est

-La wilaya de Tamanrasset est limitée par: .La Wilaya de Ghardaïa au Nord, · La wilaya de Ouargla au Nord Est, La Wilaya d'Illizi à L'Est. La Wilaya d'Adrar à l'Ouest, La République du Mali au Sud-est, · La République du Niger au Sud-ouest. (Figure. N°1.).



Figure 1 : Carte de localisation de la région de Tamanrasset

I.2 Aspect Administratif :

La wilaya de Tamanrasset, qui compte maintenant (7) Daïras et (10) Communes.ils sont : Daïra de Tamanrasset Sil les communes de cette daïra est : Tamanrasset et in-Amguel. Daïra de Silet de commune Abalessa. Daïra de In-Salah les communes de cette daïra est Fougaret-Ezzaouia et In-Salah. Daïra de In-Ghar de commune d'In-Ghar. Daïra de Tazrouk les communes de cette daïra est Tazrouk et Ideles. Daïra de In-Guezzam de commune de In-Guezzam . Daïra de Tinzaouatine de commune de Tinzaouatine

(Figure. N°2.).

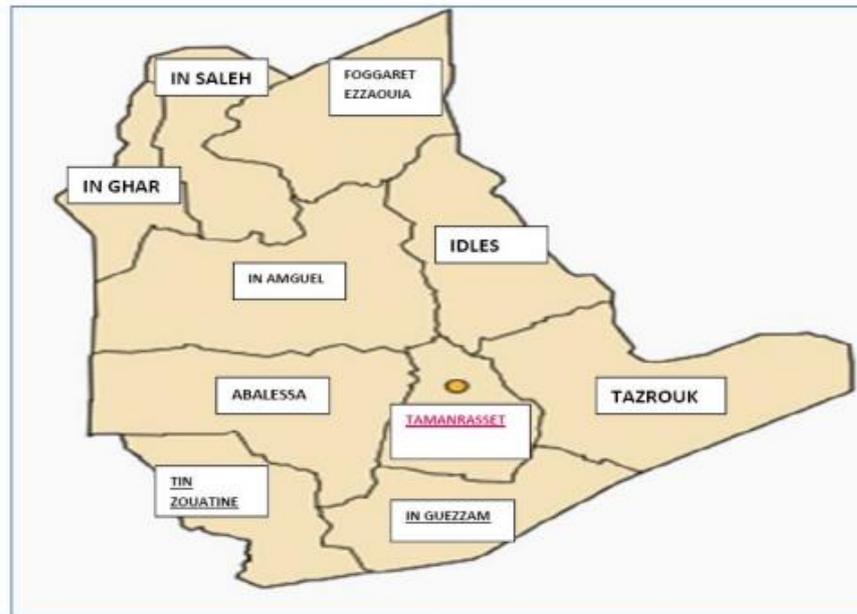


Figure 2: les daïras et les communes de la wilaya de Tamanrasset

I.3 Situation géographique de la zone d'étude :

La zone d'étude fait-partie de l'oued Tamanrasset a 11 km au Nord-est de la ville de Tamanrasset, avec les coordonnées suivantes : (Figure. N°3.).

22°50 Nord et 5°35Est

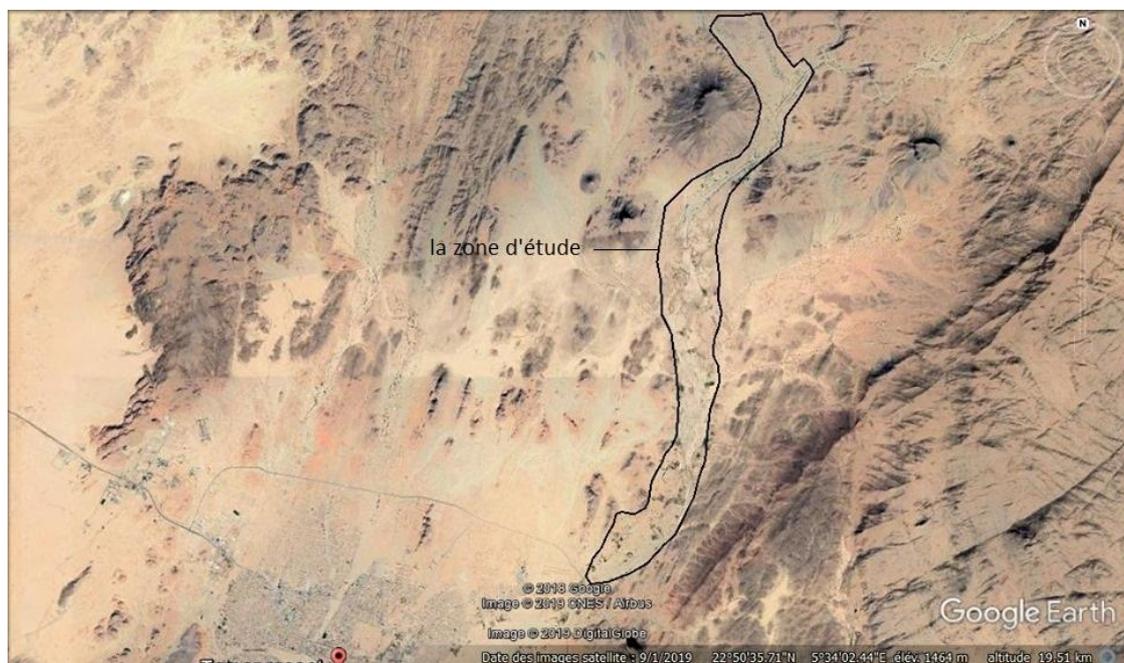


Figure 3: Situation géographique de la zone d'étude. (Google Earth)

I.4 Géomorphologie la wilaya de Tamanrasset :

-La Wilaya de Tamanrasset se caractérise par une diversité remarquable de son relief, et qui se résume en ce qui suit :

I.4.1 Les Plateaux du Tadmait et du Tinghert

Situés au Nord et au Nord-Est de la Wilaya, ils se présentent sous la forme de Hamadas et ont l'aspect de deux assises crevassées ; ils sont recouverts par endroits de dunes de sables du fait d'une érosion éolienne très active. La limite Sud du Plateau du Tadmait culmine à 836 m.

I.4.2 Les Plaines

En plus des plaines alluviales des Oueds de l'Ahaggar, on distingue : La plaine du Tidikelt au Nord (au pied du plateau de Tadmait). Elle est incisée profondément par une succession de vallées qui la traverse dans une direction EstNordEst et Sud-Ouest. Le Tanezrouft à l'Ouest une zone hyperaride dans laquelle vient se jeter à l'oued de Tamanghasset. Le Ténéré du Tafessasset aussi austère que le Tanezrouft et les Oueds de l'air (Niger) viennent s'y jeter aussi.

I.4.3 Les Massifs isolés

Ce sont les massifs d'In-zize d'origine éruptive à l'Est de l'Ahaggar, de Tebertaba (200m) qui est située à l'Est sur la piste de Tamanrasset – Djanet et le versant Nord d'Adrar Nifforas au Sud-Ouest de la Wilaya (Région de Tinzaouatine).

I.4.4 Le Fossé périphérique

C'est une suite de dépressions circulaires avec une altitude variant entre 500 et 800m, et formant une couronne autour du massif central de l'Ahaggar. - Les Tassilis C'est la ceinture extérieure de l'Ahaggar, constituée par des formations de l'ère primaire :

- le mouydir au Nord,
- la Tassili N'ajjer à l'Est et au sud-Est,
- le Tassili Ouan Ahaggar au sud,
- l'Asedjrad, l'Ahnet et l'Immidir à l'Ouest et au Nord-Ouest

I.5 Cadre géologique :

En vue de caractériser l'aquifère, nous avons procédé à une description de la nature géologique de la zone d'étude (fig.4). Le Nord du bassin versant est formé de plateaux basaltiques recouvrant la majeure partie vers l'Assekrem à 2000 m d'altitude, qui sont eux même traversés par des pointements trachytiques (Adouada, Akar Akar) et des épanchements

et généralement redressées ; de plus de vastes massifs granitiques les traversent. Elles constituent toute la zone occidentale de l'Ahaggar, limitée à l'Ouest par la discordance pharusienne. Tandis que les schistes cristallins donnent des reliefs allongés monotones.

Les séries supérieures sont formées uniquement de schistes cristallins caractérisés par la trilogie cipolins-quartzites-amphibolites, associés à des gneiss feuilletés, pyroxénites, etc Elles constituent de vastes chaînes plissées, orientées NNW-SSE, c'est la zone orientale de l'Ahaggar.

➤ **La chaîne pharusienne (Hoggar occidental) :**

Les terrains pharusiens sont beaucoup moins métamorphiques, phyllades, micaschistes et amphibolites dominant, avec des intercalations de quartzites et cipolins parfois fort importantes, les conglomérats de base sont souvent très épais, déterminant alors des lignes de hauteur, d'autres conglomérats, intra-formationnels forment également des crêtes importantes.

➤ **Les séries de couverture :**

Les séries de couverture sédimentaires qui apparaissent autour du Hoggar sont des plateaux gréseux des tassilis.

I.5.2 La géologie de la zone d'étude :

La zone d'étude appartient au Hoggar centrale polycyclique montagneux, affecté par de nombreux accidents tectoniques majeurs.

C'est un domaine de roche précambrien (suggerien) qui ont été recoupées par différents générations de granites au pharusien, lors de l'orogénèse panafricaine, et recouverte par endroit par des épandages volcaniques assez développés à la fin du tertiaire et au quaternaire.

I.5.2.1 Les formations métamorphiques :

Elles sont représentées par deux séries appartenant au Suggarien(CABY et BERTRAND , 1977).

a. La série de l'Arrechoum :

A la base, la série renferme trois formations datées à 2000 Ma caractérisées par une disposition monoclinale de direction Nord-Ouest et un pendage Nord – Est :

- Des gneiss rubanées avec des marbres et des amphibolites intercalées.

- Des formations méta sédimentaires renfermant du marbre, micaschistes des pyroxydénites et des gneiss. Des gneiss ocellés.

b. La série de l'Aleksod :

Elle caractérisée par des formations d'âge Protérozoïque moyen. On distingue de bas en haut: des amphibolites massives recoupées par des pegmatites.

- Une formation gneissique.
- Une formation d'amphibolites massives, des pyroxénites et des gneiss.
- Des gneiss à muscovite.
- Les granites :

Les granites syntectoniques (650 – 600 Ma) sont liés au grandes zones magmatiques et

I.5.2.2 Les formations volcaniques :

Les épanchements basaltiques du Miocène constituent les plateaux du Hoggar central ainsi qu'une partie du massif de l'Atakor

I.5.2.3 Les alluvions d'Oueds :

Le profil géologique dans les vallées alluviales du Hoggar est représenté habituellement, de haut en bas : Des alluvions sableuses de 10 à 20 m d'épaisseur.

- Une couche d'altération du socle (10 à 30 m) qui repose sur un socle fissuré.
- Passant progressivement au socle sain. En rive droite, les couches sont composées essentiellement de limon. L'épaisseur de la couche alluvionnaire est de l'ordre de 6m.

En rive gauche, les alluvionnaire sont hétérogènes, composées de sable propre moyen à grossier, plus ou moins graveleux, avec par endroit de gros galets. Tectonique et sismicité de la région : Le Hoggar et sa périphérie sont classés à très faible sismicité. Dans la région de Tamanrasset la seule activité enregistrée concerne la période 1957 – 1970 selon A Granjean ou de très faibles secousses ont été ressenties en 1957 et 1958.

Le Hoggar est fortement tectonisé plusieurs phases ont été à l'origine d'importants plissements ayant affecté les formations de base à l'échelle régionale IL à une structure complexe caractérisée par deux types d'accidents : Les accidents méridiens et les accidents 70 Est.

I.5.3 Structure et géologie du bassin de Tamanrasset :

Le bassin versant de Tamanrasset couvre une superficie d'environ 500 Km² dont la majorité est comprise entre 1300 et 1500 m d'altitude. L'amont du bassin est formé de plateaux basaltiques (vers l'Assekrem à 2000 m) et l'aval dans le haute vallée par les granites sur une vingtaine de km le long de l'oued Tamanrasset.

Les différentes formations géologiques qui prédominent dans la zone d'étude se superposent comme suit : de bas en haut on observe le bed rock, le socle altéré et les alluvions récentes.

a. Le socle sain :

Il constitue le substratum des formations détritiques. Il est composé de granites souvent diaclasses, de gneiss et de micaschistes.

b. Formation intermédiaire :

L'altération transforme les gneiss et micaschistes anté-Cambrien du bed rock en formation meuble. Il s'agit en fait de l'association conjointe d'une perméabilité d'interstices et de fissures.

I.6 Conclusion :

Les structures géologiques de la zone d'étude sont complexes et fortement tectonisées. à la faveur d'un dense réseau de failles et des plissements accentués.

Le complexe alluvionnaire s'est développé sur un faciès métamorphique de type gneissique et qui forme le substratum. Il s'agit d'un gneiss rubané, à grains grossiers, mésocrate. Des graites d'âge suggarien juxtaposent les formations métamorphiques de même âge dont fait partie le substratum. Les failles d'extension régionale se situent au contact des faciès volcanique et métamorphique. La faille la plus proche de l'aire d'étude se situe à la limite de la formation gneissique de la cuvette et du relief de l'Adriane volcanique.

CHAPITRE II :
ETUDE HYDRO CLIMATIQUE

II.1 Introduction :

Le climat joue un rôle capital dans le fonctionnement hydrologique. La connaissance des facteurs climatiques s'avère indispensable pour mieux comprendre les phénomènes d'écoulement, les précipitations échappent à l'emprise de l'évapotranspiration et participent à la recharge des nappes dites pluies efficaces. L'infiltration d'une lame d'eau dans la nappe assure le renouvellement de la ressource c'est ainsi que se poursuit le cycle de l'eau et ses différentes composantes (précipitation, humidité, infiltration...etc.). Pour préciser les caractéristiques du climat, il est nécessaire d'étudier les différents facteurs qui le composent notamment ; les précipitations, les températures et l'humidité, le vent

Les coordonnées géographiques de la station météorologique Tamanrasset sont représentées dans le tableau suivant:

Tableau 1 : les coordonnées géographiques de la station de Tamanrasset

Station	coordonnées		
	latitude	longitude	Altitude (m)
Tamanrasset	22.48°	5.35°	1400

La zone d'étude se situe dans la zone tropicale qui se caractérise par des hautes pressions atmosphériques et une très faible pluviométrie.

Les précipitations dans cette zone ont généralement lieu en été et sont liées aux avancées extrêmes de la (mousson) provenant du sud. C'est à dire du golfe de guinée. D'autres pluies moins importantes ont lieu en hiver et au printemps et proviennent du nord. La zone d'étude se caractérise par un climat différent de celui du reste du Sahara.

II.2 Etude des facteurs climatiques

II.2.1 La Température

: La température est un élément fondamental du climat. Elle est liée à la radiation solaire. Sa variation influe sur la transformation de l'eau en vapeur, surtout en surface. De ce fait, elle influe sur le degré d'évapotranspiration.

Tableau 2: la température moyenne mensuelle de la zone d'étude (station Tamanrasset).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T°(C)	27.85	23.75	18.36	14.47	12.94	15.31	19.16	23.75	27.45	29.6	29.9	29.3

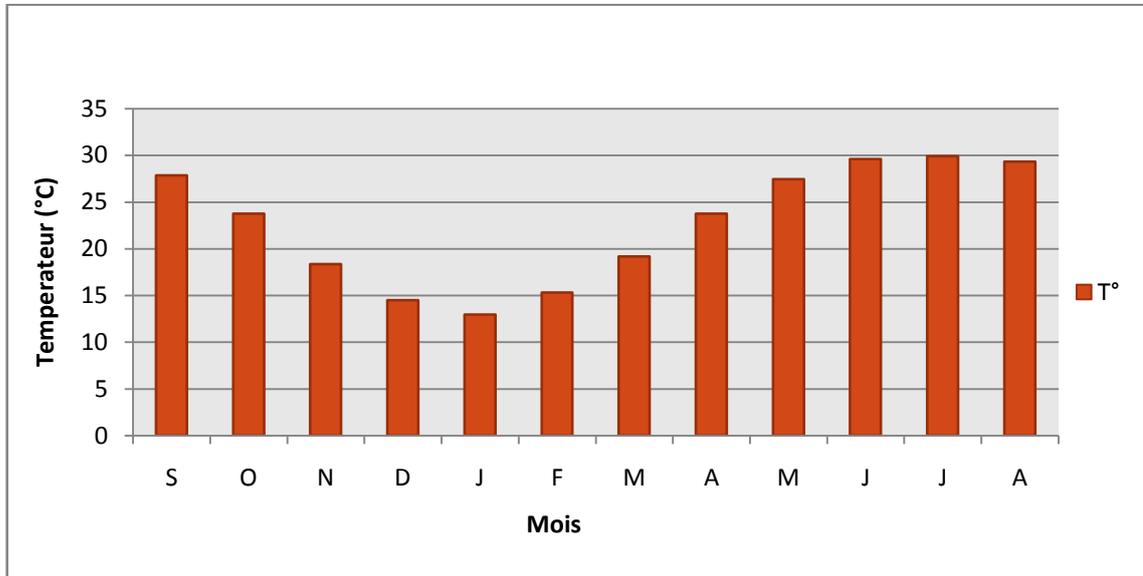


Figure 5: histogramme de la température moyenne mensuelle de la zone d'étude

Interprétation :

Le mois le plus froid au période (2000-2018) est le mois de janvier avec une température moyenne mensuelle de 12.9 °C. Juin et Juillet sont les mois les plus chauds avec une température moyenne mensuelle de 29.9°C.

II.2.2 Précipitation :

La précipitation est la quantité d'eau météorique totale, liquide (Pluie, brouillard, rosée) ou solide (neige, grêle...) qui tombe sur une surface horizontale. L'étude des précipitations est très importante, elle permet de déterminer la part d'eau qui parvient pour l'alimentation des ressources souterraines.

Tableau 3 : la précipitation moyenne mensuelle de secteur d'étude (station Tamanrasset 2000-2018).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOT
P(mm)	8.3	3.2	2.1	1.6	1.3	1.3	2.6	1.8	5.1	3.9	4.8	6.5	42.5

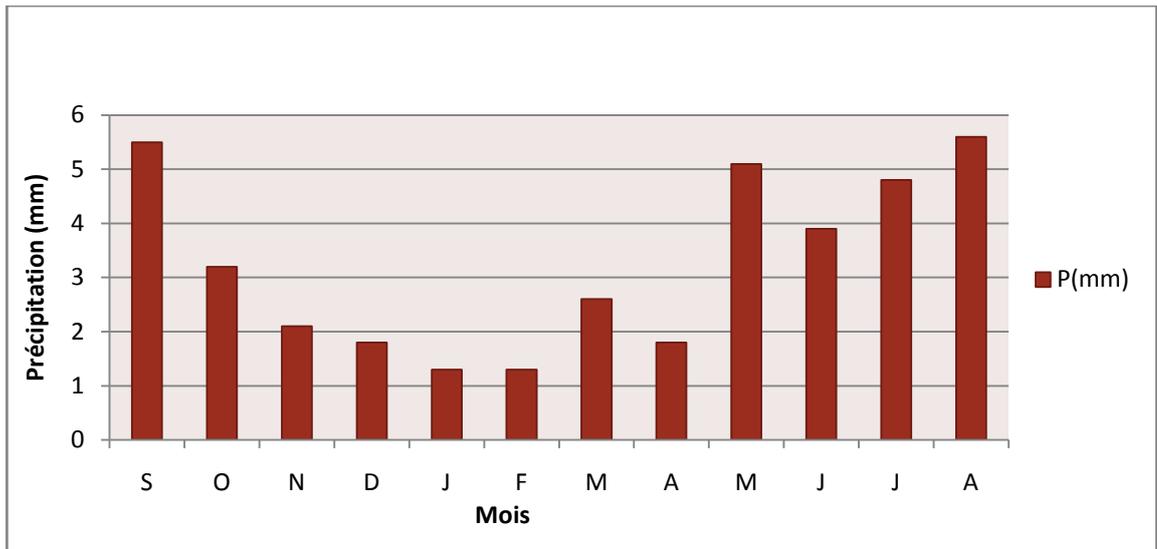


Figure 6: histogramme de précipitation moyenne mensuelle (station Tamanrasset 2000-2018)

Interprétation :

Indique que le mois le plus arrosé est le mois d'Août et septembre avec des précipitations moyennes mensuelles de 8.5 mm. Par contre le mois le plus sec correspond au moi de Février avec une précipitation moyenne mensuelle de l'ordre de 1.3 mm.

On remarque que pour la période (2000-2018) la moyenne des précipitations est de 42.5 mm. Elle traduit une seconde phase pluvieuse.

Les crues d'oueds sont à l'origine de l'alimentation des nappes d'infero-flux de la région de l'AHGGAR., permettent de générer un ruissellement et donc des crues.

La vitesse de concentration du ruissellement est fonction du bassin versant .de sa pente globale et de la nature lithologique de l'impluvium.

à 25° ans puis à une diminution progressive jusqu'à la fin du mois de mars pour que l'ascension commence, permettent de dire qu'il existe une relation inverse entre elles.

II.2.3 Indice de de Martonne

Cet indice est calculé en fonction des températures et des précipitations ; L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. L'indice de Martonne (1926) a défini l'aridité du climat à l'échelle annuelle par l'équation :

$$I = p / t + 10$$

Où

I : indice d'aridité

P : précipitations moyennes annuelles en mm.

T : température moyenne annuelle en °C.

Application :

P = 3.54 mm

T = 22.65 °C

Ce qui donne : I = 0.11

Selon les valeurs de (I) l'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Au niveau mondial, De Martonne (1962) a proposé différents types de macroclimat et a établi la classification suivante :

Tableau 4 : Indice de de Martonne

Intervalle de l'indice	Type de Climat
$I < 5$	Climat hyperaride
$5 < I < 7,5$	Climat désertique
$7,5 < I < 10$	Climat steppique
$10 < I < 20$	Climat semi-aride
$20 < I < 30$	Climat tempéré

Selon l'indice, calculé avec les paramètres enregistrés au niveau de la station de Tamanrasset, la région est caractérisée par un climat hyperaride.

II.2.4 Humidité :

L'humidité de l'air est un paramètre météorologique aussi important que la précipitation pour la caractérisation du climat d'une région.

L'humidité relative est le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air humide (e) et la pression de saturation (e_w), à la même température. Elle est exprimée en pourcentage suivant la formule :

$$hr (\%) = (e / e_w) 100$$

Les valeurs de l'humidité relative du tableau N°5 ont été relevées à la station de Tamanrasset durant la période 2000-2018. Il s'agit des moyennes mensuelles et annuelles.

Tableau 5 : humidité relative de la station de Tamanrasset.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Humidité	24.1	22.2	19.3	19.2	19.8	20	20.2	21.8	24	27.9	28.1	27.3	22.82

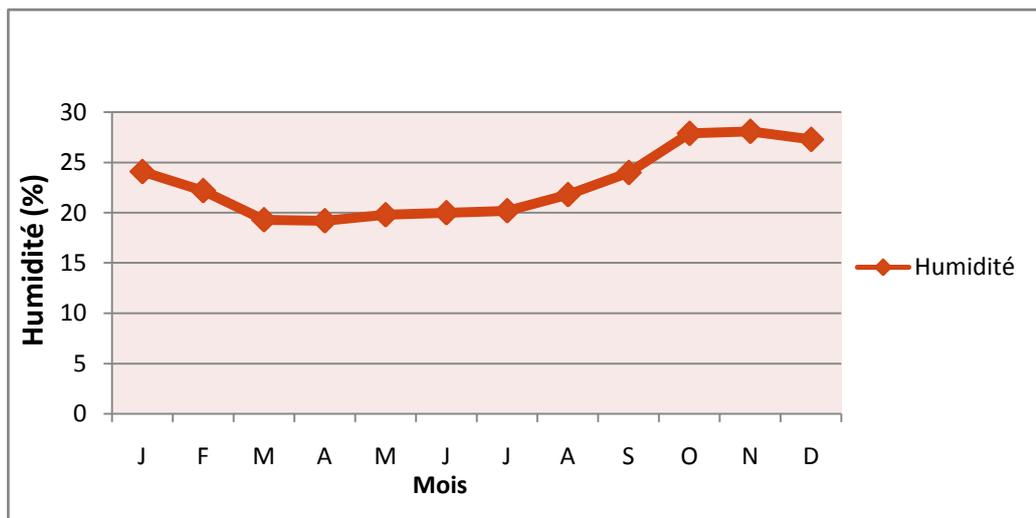


Figure 7: courbe d'humidité relative de la zone d'étude (station Tamanrasset 2000-2018)

Interprétation de tableau :

Ainsi que le graphe obtenu en l'axe de (Y) en ordonnée l'humidité relative moyennée (%). et en l'axe de (X) les mois. montrent que ces taux d'humidité restent inférieurs à 29% à Tamanrasset.

Les valeurs moyennes d'humidité relative sont comprises entre 16 et 29%.

II.2.5 Les vents :

Les vents jouent un rôle important pour le climat au printemps (avril-mai), les vents occidentaux soufflent sur le massif montagneux du Hoggar et peuvent apporter des pluies printanières atlantiques ou méditerranées.

Tableau 6 : le vente (station Tamanrasset 2000-2018).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Moy m/s	3.1	3.8	4.2	4.7	4.2	4.5	4.4	4	4.2	3.5	2.8	2.5	3.8

En été (juin-octobre), les vents du Sud-est, d'intensité régulière.

En hiver, les vents s'affaiblissent (2.5). Et sont de direction variable

Les vents de sables soufflent assez fort, surtout en mars et avril.

II.3 Estimation de l'ETP (l'évapotranspiration potentielle) :

L'évapotranspiration potentielle est la quantité d'eau qui, compte tenu du climat et particulièrement de la température pourrait être évaporée et transpirée si l'approvisionnement en eau était suffisant pour répondre à tous les besoins d'une végétation couvrant complètement le sol. Pour l'estimation d'ETP, nous avons utilisé l'abaque de C.W THORNTHWAITE. La formule d'approximation de THORNTHWAITE s'écrit :

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

$$\text{Avec : } i = (t/5)1,514$$

$$a = 1,6 I/100 + 0,5$$

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle (mm)

I : indice thermique mensuel.

a : paramètre arbitraire lié à la température

I : somme des indices thermiques mensuels.

t : température moyenne mensuel (°C).

K : coefficient d'ajustement mensuel.

Les résultats de calcul de l'ETP par la méthode de C.W.Thornthwaite sont présentés dans le tableau ci-après.

L'évapotranspiration Réelle :

C'est la quantité d'eau évaporée et transpirée réellement. Pour l'évaluation de l'ETR, nous utiliserons la formule de C.W.Thornthwaite

Calcul de l'ETR, selon la méthode de bilan d'eau de C.W.Thornthwaite

Pour calculer l'ETR par cette méthode, il faut prendre pour le sol une certaine valeur de la réserve facilement utilisable (RFU). Dans notre cas, on prend 80 mm Elle correspond à la quantité optimale d'eau que le sol peut retenir ou soustraire à l'écoulement interne.

Le bilan d'eau de C.W.Thornthwaite, fait intervenir, d'une part l'évapotranspiration potentielle et d'autre part, la pluviométrie(P).

Nous avons appliqué cette méthode de calcul de l'ETR à la station de Tamanrasset

Le principe de cette méthode est basé sur 2 cas :

1^{er} cas : Si $P > ETP \rightarrow$ l'ETR est égale l'ETP.

Et l'excédent des précipitations sur l'ETP est stocké dans le sol sous forme d'humidité. Pour Thornthwaite, la saturation est atteinte lorsque les réserves superficielles cumulées atteignent la valeur de la réserve utile (RU).

Le surplus va s'écouler en profondeur (i= infiltration) ou en surface vers les oueds (R= ruissellement). Ceci constitue l'excédent du bilan.

2^{ème} cas : Si $P < ETP \rightarrow$ dans ce cas on puisera dans les réserves du sol jusqu'à l'ETR soit égale à l'ETP. Une fois le stock épuisé, l'ETR sera égale à la pluviométrie

(L'ETR = P).

Tableau 7 : bilan hydrique (2000-2018).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOTAL
T°	27.85	23.75	18.36	14.47	12.94	15.31	19.16	23.75	27.45	29.6	29.9	29.3	-
P(mm)	8.3	3.2	2.1	1.6	1.3	1.3	2.6	1.8	5.1	3.9	4.8	6.5	42.5
I	13.47	10.58	7.166	4.997	4.219	5.443	7.644	10.58	13.17	14.77	14.99	14.54	-
I	121.57												-
A	2.44512												-
F	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.4	1.5	1.5	1.4	-
K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16	-
ETP	125.1	79.8	37.71	20.58	16.22	23.9	50.12	90.5	141.8	172	179.1	159.5	1187.83
ETPc	175.1	111.7	49.02	26.75	21.08	33.46	70.17	135.7	198.6	257.9	268.7	223.3	1702.43
ETR	8.3	3.2	2.1	1.6	1.3	1.3	2.6	1.8	5.1	3.9	4.8	6.5	42.5
RFU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
DA	166.8	108.5	46.92	25.15	19.78	32.16	67.57	133.9	193.5	254	263.9	216.8	1528.98

On aura donc un déficit du bilan qui représente la quantité d'eau qu'il faudra ajouter dans ce cas à l'ETR pour atteindre l'ETP.

Pour notre zone d'étude, nous constatons que nous avons toujours $P \leq ETP$ selon le deuxième cas précité, l'ETR sera toujours égale aux précipitations.

On constate, d'après le tableau N°7 que tous les mois sont déficitaires. L'ETR moyenne annuelle est égale à 42.5mm, soit 100 % des précipitations.

Le bilan hydrique établi par la méthode de Thornthwaite pour la station de Tamanrasset a montré que l'ETP atteint le maximum au mois de juillet (268.7 mm) et son minimum au mois de janvier (21.08 mm).

La constitution de la RFU est nul dans toute l'année.

II.4 Conclusion :

La région de l'AHGGAR est connue par un climat relativement doux. La moyenne annuelle des précipitations à l'oued Tamanrasset est de 42.5 mm. Les diagrammes des précipitations, mettent en évidence, les pluies estivales. On note aussi la présence des pluies sporadiques d'hiver et de printemps. La moyenne annuelle des températures à Tamanrasset est de 22 °C

II.5 Etude hydrologique

Les oueds de la région du Hoggar présentent généralement dans leur partie amont, une zone montagneuse de forte pente et des lits relativement bien encaissés. Dans la partie basse, occupée par des regs. La pente de l'oued est estimée entre 4% et 5%, les bordures du lit mineur forment une (terrasse) sablo- limoneuse élevée de 0,5 à 1m sur laquelle est installée la plus grande partie des exploitations agricoles.

II.5.1 Hydrographie :

L'analyse des images satellites met en évidence une étroite relation entre la fracturation du sol et les réseaux hydrographiques.

Le système hydrographique de la zone d'études se matérialise par une succession d'oueds. D'orientation nord – sud drainant le flanc sud du massif de l'atakor. Et disparaissant sur le pourtour du massif de l'ahaggar après un parcours de plusieurs centaines de kilomètres. Les bassins versants présentent généralement des formes longitudinales.

Oued Tamanrasset occupe le versant sud-ouest du Hoggar. Il fait partie du grand bassin versant du Sahara occidental qui couvre 2400000km² de superficie totale.

La partie amont du bassin versant de l'oued Tamanrasset (de l'amont de l'agglomération de Tamanrasset jusqu'à l'assekrem) est comprise entre 1300 et 1500m d'altitude vers l'Assekrem à 2000 m il se développe d'abord sur un plateau basaltique puis. (La haute vallée) sur une vingtaine de kilomètres sur des granites.

II.5.2 Oued Tamanrasset :

Nous intéressons ici à la partie de cet oued situé en amont de l'agglomération de Tamanrasset. Du point de vue de la ressource en eau, on peut distinguer deux tronçons bien distincts qui offrent des possibilités très inégales pour l'emmagasinement des eaux souterraines :

Un cours supérieur limité à la portion de cette Oued comprise entre l'Assekrem et les gueltes d'Imlaoulaouen le lit de l'oued y présente toutes les caractéristiques d'un torrent pente élevée, abondance d'affleurements rocheux forment seuils alluvions mal classées de petites réserves peuvent se constituer localement dans les bouches alluvionnaires et alimenter de simples trous (abankors), plus rarement des puits (ânous).

Un cours inférieur où la pente devient nettement moins prononcée , permettent le dépôt d'importantes masses alluviales dont la granulométrie devient plus fine et régulière là

encore les alluvions se présente se forme des vastes cuvettes en forme d'amygdales communiquant entre elles par des seuils rochoux enfouis sous un mince recouvrement d'alluvions ou même venant à l'affleurement (takaraba de S_W de tamanrasset).

Ce sont ces cuvettes dont la superficie peut atteindre plusieurs km² qui offrent les possibilités les plus intéressantes d'accumulation des réserves. La nappe ainsi formée dite d'infiltration (le terme de colluviale serait préférable) est réalimentée périodiquement à la faveur des crues de l'Oued. Le tronçon le plus fréquemment alimenté par les crues se situe en amont de Tamanrasset.

a. caractéristique géométrique du bassin versant :

On détermine la caractéristique géométrique du bassin versant (surface et périmètre) par planimétrie. Pour la superficie, et curvimétrage pour le périmètre.

Les résultats obtenus sur l'oued Tamanrasset amont sont :

Tableau 8: la géométrie de bassin versant

Bassin versant	Superficie (km ²)	Périmètre p (km)
La zone d'étude	50.6	31.8

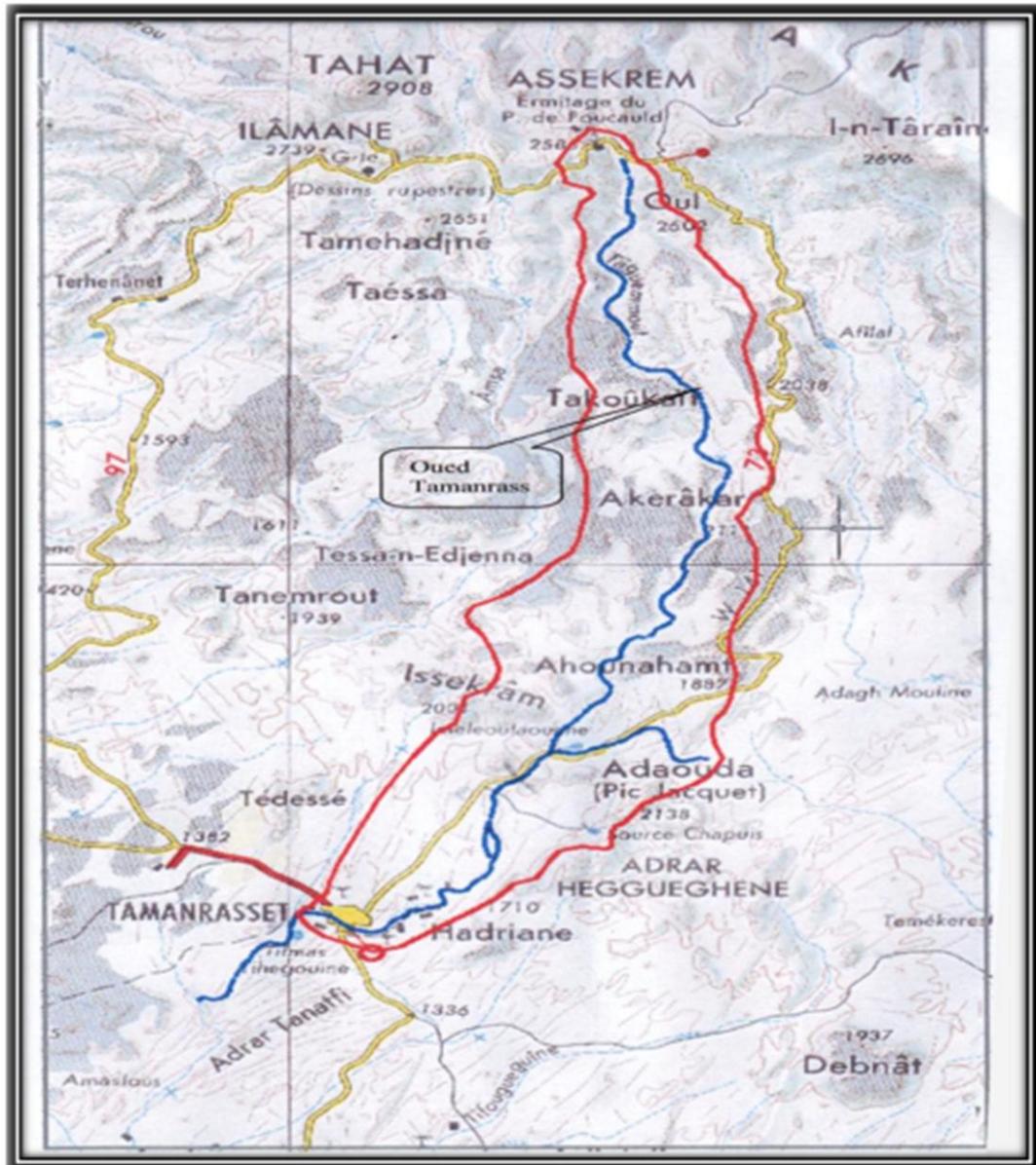


Figure 8: Le bassin versant de la zone d'étude (Hemdi.F.213)

b. Indice de forme :

La forme du bassin est déterminée par l'indice de compacité de Gravelius

K_c : il est exprimé par le rapport du périmètre (p) du bassin à celui d'un cercle de même superficie (A)

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

K_C : indice de compacité de Gravelius

P : périmètre du bassin versant (km)

A : surface du bassin versant (km²)

- Si K est proche de 1 cela signifie que le bassin est de forme ramassée.
- Si K augmente le bassin est étiré.

Dans notre cas $K = 2.53$ le bassin est donc allongé.

c. Topographie du lit de l'oued :

Le lit de l'oued a une pente relativement de l'ordre de 7%. Les eaux s'écoulement donc rapidement (hauteur de 30cm et une largeur de 50m). La vitesse d'écoulement est de

2 m/s. de façon très turbulente.

CHAPITRE III :
ETUDE HYDROGÉOLOGIQUE

III.1 Introduction :

L'étude hydrogéologique qui fait l'objet de ce chapitre repose fondamentalement sur les paramètres hydrodynamiques obtenus antérieurement dans la cuvette de l'Adriane. Par ailleurs, une estimation des potentialités locales en eaux ainsi qu'une étude du fonctionnement hydrogéologique de la cuvette ont déjà été réalisées. Il s'agit donc dans ce qui suit d'une actualisation des connaissances déjà acquises.

III.2 Notion de la nappe inféro-flux :

La mise en place de ce type de nappe s'explique tout d'abord par l'extension du bassin découpé en amont dans le massif de l'assekrem (ruissèlement important en période de crue) et par le développement des alluvions grossières. Il faut signaler que le lit majeur de l'oued emprunte presque la totalité de la largeur des alluvions (200 à 600m). par ailleurs, ce lit n'est réellement activé qu'après passage d'une d'alluvions fonctionne alors comme un vaste drain collecteur de toute l'eau environnante.

III.3 Terrains aquifères de la zone d'étude :

Les prospections sismiques réalisées permettent de définir les terrains selon leur vitesse de propagations des ondes, la succession des terrains de haut en bas.

Alluvions, Socle altéré et Socle sain.

III.3.1 Les Alluvions :

Elles sont constituées de fragments de composées essentiellement de granite, de quartz, des feldspaths et les paillettes de micas visibles, le gneiss produit une arène .très voisine contenant Une plus grande proportion d'élément fin .ces alluvions basaltiques sont mal classées avec des galets et sable moyen .ce matériaux se déposent selon deux modes principaux :

Les plus grossiers sur de fortes épaisseurs dans les lits d'oueds où ils forment le siège d'inféro-flux importants. Les autres dans de larges baignoires, ou sur les plateaux bas.

III.3.2 Socle altéré :

L'altération transformée des gneiss et micaschistes .antécambrien du substratum de la façon suivant :

1ère phase : altération argileuse des feldspaths .la roche résiduelle riche en argile est pratiquement peu perméable.

2^{ème} phase : formation des arènes plus ou moins argileuse suivant d'altération de la roche mère.

3^{ème} phase : élimination de tous les constituants minéraux plus ou moins solubles restent les grains de quartz qui donnent un sable.

III.3.3 Socle sain :

L'Oued du Tamanrasset a creusé son lit dans un substratum des roches cristallines et cristallophylliennes gneiss, micaschistes, et granites absolument imperméables. Les méthodes de prospection qui ont été employées (électrique et sismique) sont bien adaptées à la reconnaissance d'un substratum résistant.

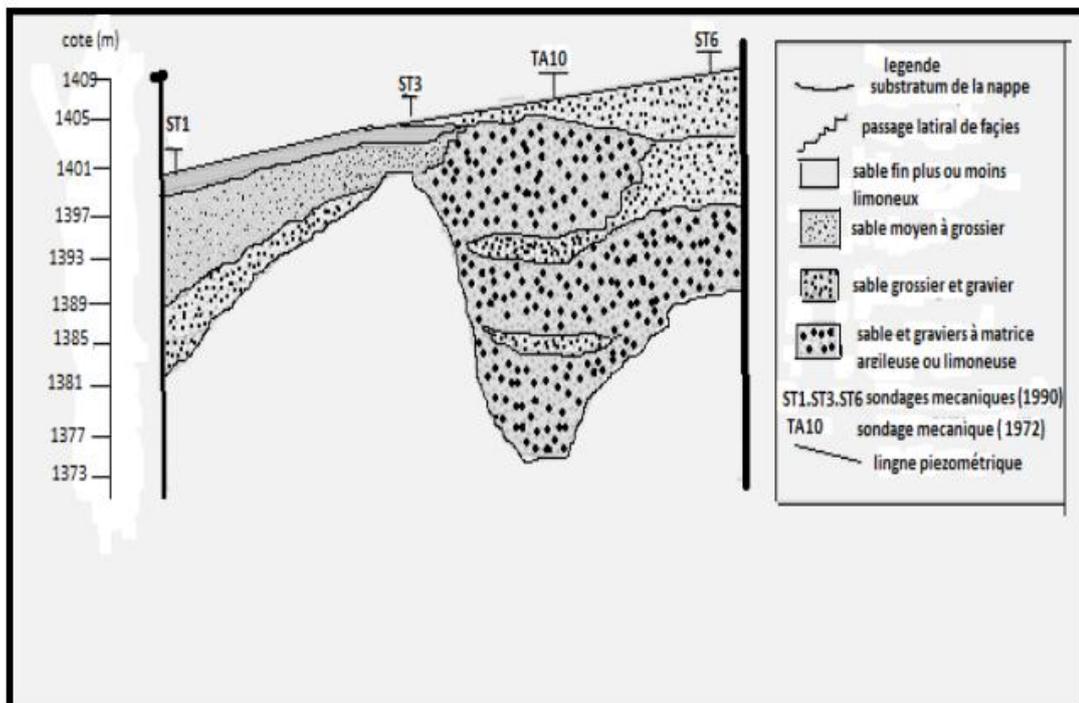


Figure 9: Coup géologique le long d'un profil en travers de la cuvette de l'oued (rapport hydrogéologique mission II, ENHYD)

III.4 Etudes hydrogéologique antérieures :

Certains travaux ont été réalisés par Levassor en 1970. Ces études hydrogéologiques ont mis en évidence la continuité hydraulique de l'écoulement, la configuration et la nature dans des milieux aquifères, ainsi que l'état piézométrique général de la nappe. Elles présentent dans une large mesure le milieu physique, et l'état des ressources souterraines dans la cuvette.

Les résultats suivants en découlent :

Il existe une nappe souterraine libre dans un aquifère poreux a roches meuble très hétérogènes.

- L'épaisseur de la nappe représente la moitié de l'épaisseur de l'aquifère.
- Les profondeurs des niveaux d'eaux sont assez importantes comparativement une cuvette de In Amguel et Outoul.
- la surface libre de la nappe se situerait en grande partie à une profondeur comprise entre 10et 22 mètres.
- La nappe s'écoule naturellement sous un faible gradient. Le gradient moyen de la nappe est de $4.5 \cdot 10^{-3}$, et certaines zones au fort gradient de $(i=1.12 \cdot 10^{-2})$

III.5 Etude de la nappe d'inféro flux :

III.5.1 Caractéristique générale de la nappe :

C'est une nappe de terrains mixtes (alluvion et socle métamorphique altéré). à perméabilité d'interstices et peut-être de fissures, qui est alimenté périodiquement par sa surface libre en période des crues d'oueds, et qui est limité vers le bas par un substratum imperméable, constitué par le socle sain.

L'écoulement est limité latéralement par le socle, qui constitue les parois de la nappe.

Les limites naturelles du réservoir de cette nappe sont :

-Latéralement, l'aquifère est délimité par les rives gneissiques, continues et étanches.

-En profondeur, le mur de l'aquifère est également gneissique.

- l'amont, le réservoir diminue progressivement d'épaisseur jusqu'à la limite des affleurements formant le relief.

On admet que la proportionnalité d'aquifère, représentent environ 46%de l'épaisseu1-

Tableau 9: les estimations de volumes (aquifère et nappe)

Aquifère et nappes	Volumes millions de m ³
Volume aquifère potentiel correspondant à la surface dynamique de la nappe	134
volume géologique de la nappe	67
Volume des réserves totales	3

On n'admet que la proportionnalité d'aquifère, représentant environ 46% de l'épaisseur alluvionnaire totale, précise aux milieux la qualité au stockage d'eau de ces dépôts.

III.5.2 Hydrodynamique de la nappe :

III.5.2.1 Ancienne étude :

Il s'agait de confronter, au cours d'une période donnée de temps, les quantités d'eau qui entrent (actif) et sortent (passif) à travers les limites de la nappes.

Les zssais de pompage réalisés au niveau des forages F2, F3, et le puits P2 (1979) ont donné une transmissivité égale à $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Le d'ébit d'inféro-flux donné par la loi de Darcy en 1970, par levasson est de 15 l/s.

Tableau 10: Estimation des réserves exploitable.

Période	Epaisseur moyenne de l'aquifère	Réserve exploitables
1970	11.6	1.86
1979	9.22	1.48

En dix d'exploitation, la réserve exploitable a diminué de $0.38 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

III.5.2.2 Alimentation de la nappe :

La nappe est encaissée entre la bordure de roches métamorphiques formant le relief, de sorte que le réseau hydrographique achemine les eaux de précipitation en convergent vers l'aquifère alluvionnaire (cuvette) et alimente donc la nappe.

Les eaux pluviales sont collectées dans l'aire de la cuvette ou s'établissent des crues.

La réalimentation de la nappe s'effectue, soit par infiltration directe des pluies soit par infiltration des eaux de crues qui s'étalent sur les alluvions.

La topographie avoisinante à la cuvette est plutôt favorable au ruissellement vers les bordures du lit majeur.

La recharge favorisée par une faible pente du lit de l'oued, la lithologie perméable des alluvions de surface, les dimensions de la cuvette (grande aire réceptrice, possibilité d'épandage des crues ...) et les longueurs des crues qui dépassent le site de barrage, couvrant ainsi toute la cuvette, sont fréquentes.

III.6 Délimitation de la zone d'étude :

La zone d'étude s'étend à l'amont de la ville de Tamanrasset se présente sous l'aspect d'un étroit couloir allongé sur 11 km environ pour une largeur n'excédant pas 5 km.

L'aquifère alluvionnaire repose sur le substratum altéré. Il est légèrement pentu vers l'aval. La pente du mur des alluvions est d'environ 4‰ et celle de la surface de la cuvette de 5‰.

Tableau 11: L'inventaire des points de la nappe inféro-flux compagne 2003 (IMEN.T.2003)

puits	Niveau/sol	Z	X	Y	NS
F14	12.95	1459	765.679	2529.989	1446.05
F9	13.5	1416	765.11	2524.334	1402.5
P1	13.5	1458	764.89	2531.417	144.5
P2	13.65	1466	764.159	2526.182	1452.35
P3	13.5	1439	765.46	2526.507	1425.5
P4	14.4	1438	765.621	2526.109	1423.6
P5	17.35	1435	765.416	2526.14	1417.65
P6	18.8	1440	765.215	2526.022	1421.2
P7	15.6	1439	765.916	2526.146	1423.4
P8	19.5	1433	765.0.88	2525.094	1413.5
P9	14.5	1425	765.142	2524.984	1410.5
P10	14.4	1459	765.225	2525.096	1444.6
P11	15.8	1426	765.459	2524.596	1410.2
P12	23.2	1425	764.539	2524.355	1401.8
P13	27	1421	764.477	2524.498	1394
P14	22	1425	764.275	2523.602	1403
P15	18.8	1422	764.068	2523.029	1403.2
P16	19.4	1417	764.006	2523.019	1497.6
P17	13.8	1413	764.617	2523.968	1399.2
P18	20	1420	764.901	2524.367	1400
P19	-	1415	764.949	2523.836	1415
P20	23.2	1413	763.84	2523.671	1389.8
P21	21.2	1416	763.323	2519.581	1394.8
P22	18.8	1409	763.063	2523.079	1390.2
P23	19.5	1412	763.899	2522.778	1392.5
P24	20.2	1412	762.905	2522.348	1391.8
P25	20	1434	765.121	2525.156	1416.6

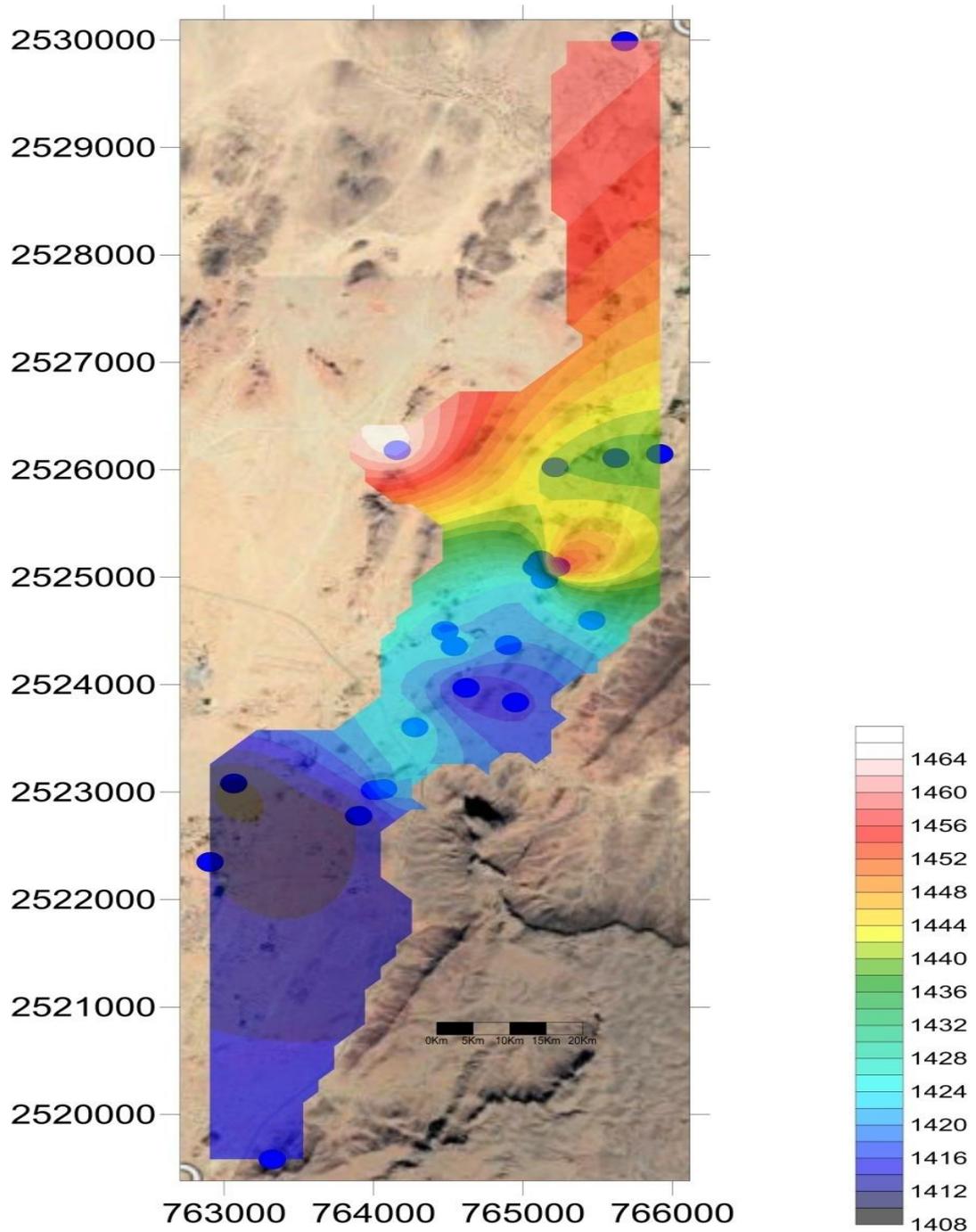


Figure 10: La carte Piézométrique de l'Oued Tamanrasset (Compagne 2003)

III.6.1 Interprétation de la carte piézométrique :

La carte piézométrique établie à partir des données des piézomètres (Compagne 2003).

On a remarqué dans cette carte l'écoulement général suit celui de l'inféoflux et les eaux convergent vers les cones de dépression où il y a une forte exploitation par la mise en fonction des stations de pompage.

Le gradient hydraulique de la nappe coule sous un gradient moyen $4.6 \cdot 10^{-3}$.

Tableau 12: L'inventaire des points de la nappe inféro-flux (compagne 2016)

Nom	lat (x)	log (Y)	Alt (Z) (m)	Ns (m)	Np (m)
P01	22°53'17,40"	5°36'38"	1473	12.6	1460.4
P03	22°52'26,97"	5°36'02,7"	1456	12.4	1443.6
P04	22° 52' 19,92"	5° 36' 1,62"	1454	10.1	1443.9
P05	22° 52' 18,14"	5° 36' 1,13"	1454	7.1	1446.9
P07	22° 52' 16,65"	5° 35' 59,9"	1454	10.6	1443.4
P10	22° 52' 14,57"	5° 35' 59,42"	1455	11.7	1443.3
P11	22°51'13,60"	5°36'00"	1456	12.5	1443.5
P12	22°52'12,94"	5°35'58,39"	1455	12.1	1442.9
P13	22°49'34,4"	5°35' 17,06"	1453	11.3	1441.7
P15	22°52'16,54"	5°35'46,79"	1453	11.2	1441.8
P16	22°52'19,11"	5°35'37,27"	1457	14.4	1442.6
P20	22° 51' 3,82"	5° 35' 31,42"	1438	14.1	1423.9
P27	22° 50' 15,21"	5° 35' 35,76"	1432	14	1418
P28	22°50'17,13"	5°35'14,31"	1431	19.7	1411.3
P30	22°49'56"	5°35'37,9"	1428	16.1	1411.9
P31	22°50'03,55"	5°35'22,34"	1426	15.8	1410.2
P33	22°50'04,69"	5°35'16,99"	1428	22.1	1405.9
P34	22°50'01,83"	5°35'15,13"	1429	19.3	1409.7
P35	22°49'59,6"	5°35'15,47"	1428	18.6	1409.4
P36	22°49'56,88"	5°35'15,63"	1427	17.4	1409.6
P37	22°49'56,1"	5°35'3,2"	1428	21.8	1406.2
P38	22°49'52,59"	5°35'17,67"	1425	17.9	1407.1
P39	22°49'45,8"	5°35'16,5"	1424	18.2	1405.8
P40	22°49'31,9"	5°35'17,2"	1422	15.5	1406.5
P48	22°49'00,1"	5°34'59,9"	1416	26.8	1389.2
P53	22° 48' 35,21"	5° 34' 57,9"	1412	18.2	1393.8
P54	22° 48' 33,96"	5° 34' 50,05"	1411	17.7	1393.3
P55	22°48'28,9"	5°34'57,5"	1413	12	1401
P57	22°48'23,6"	5°34'40,1"	1407	8	1399
P58	22° 48' 20,25"	5° 34' 38,57"	1407	12	1395
P59	22°48'15,2"	5°34'29,7"	1410	6.6	1403.4

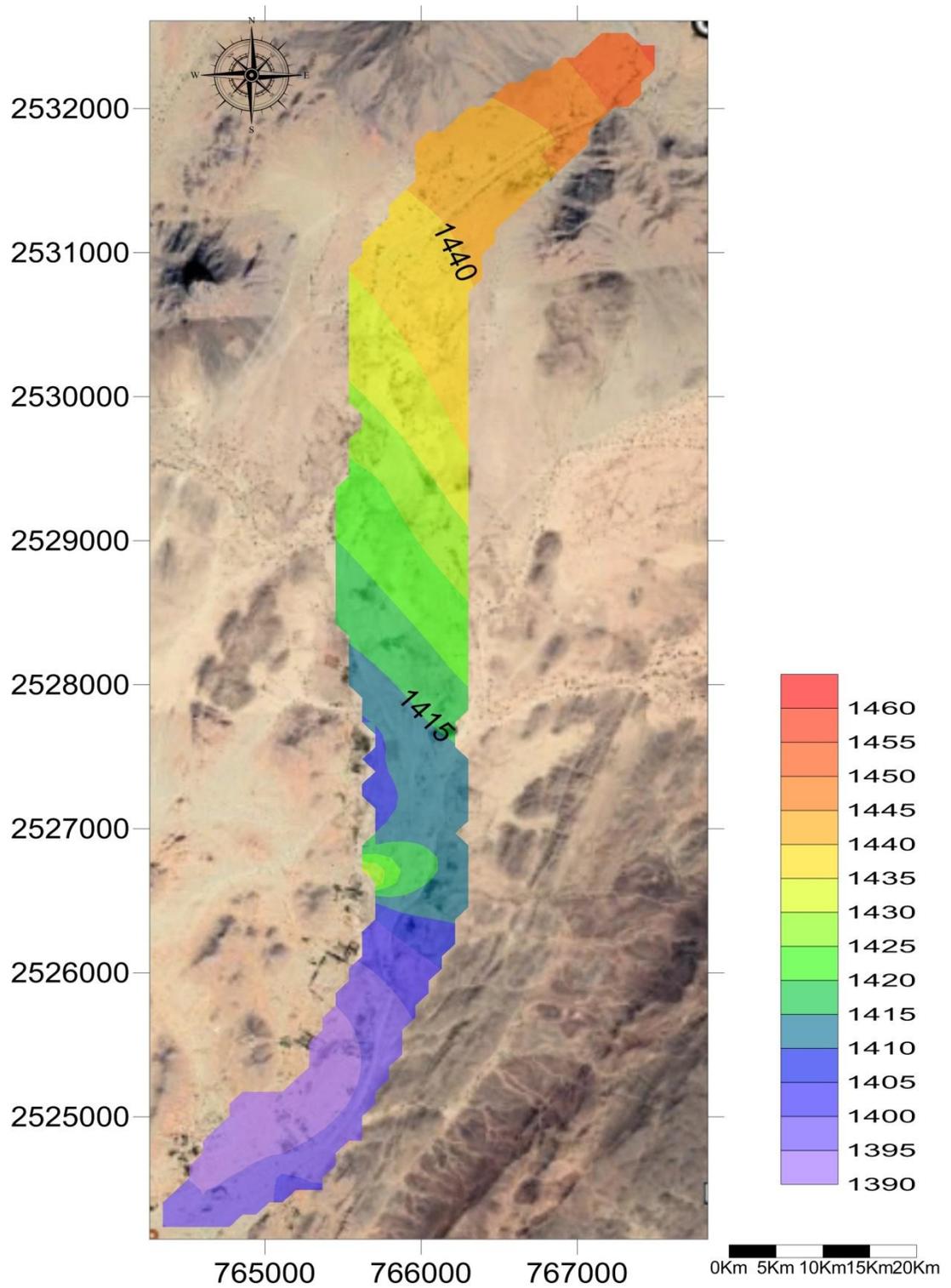


Figure 11: La carte Piézométrique de l'Oued Tamanrasset (compagne 2016)

III.6.2 Interprétation de la carte piézométrique :

La carte piézométrique établie à partir des données des piézomètres (campagne 2016) et réalisée par image google earth, a permis de tracer les lignes de courant et par conséquent les principaux axes d'écoulement et les lignes de partage des eaux.

Les lignes de courant convergent vers le centre d'oued Tamanrasset. On a remarqué un abaissement de niveaux piézométriques, donc il existe des puits de captage de cette zone. La cote la plus élevée est de 1460.4m et la plus faible est de 1389.2m.

III.6.3 Comparative entre les deux (2) cartes :

On a remarqué dans la carte piézométrique (campagne 2003) le niveau piézométrique qui diminue du nord vers le sud à partir du facteur principal c'est la topographie de la zone d'étude par contre le niveau piézométrique dans la carte (2016) elle diminue dans la zone de centre (barrage) et l'aval (la cuvette de l'aderien) à cause de puits de captage.

III.7 Mode d'exploitation de la nappe

La nappe est exploitée, d'une part à partir des puits paysans pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable des petits regroupements des populations du village de la ville de Tamanrasset. Les puits paysans étant imparfaitement réalisés, ne remplissent pas les meilleures conditions d'exploitation. Ils sont donc sensibles aux fluctuations des niveaux piézométriques lors des passages de quelques crues.

Ainsi, il arrive que des puits s'assèchent complètement pendant la période de forte demande en eau (été).

III.8 Conclusion :

La nappe de l'infero-flux est caractérisée par :

L'épaisseur alluvionnaire ne dépasse pas 22,5 m.

La carte piézométrique montre que le sens d'écoulement de l'infero flux suit parfaitement l'axe de la vallée (amont vers l'aval).

Le gradient hydraulique d'envoi de $4.6 \cdot 10^{-3}$

Le débit de l'infero-flux estimé à l'aide de la formule de DARCY est de 5 l/s.

Le transmissivité déterminée est égal à $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Le Coefficient d'emmagasinement varie 5% et 10%.

L'alimentation de la nappe se fait essentiellement par les crues.

La mode d'exploitation de la nappe d'une part à partir des puits paysans pour l'irrigation et d'autre part à partir des forages d'A.E.P.

CHAPITRE IV :
MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT
DES EAUX DE LA NAPPE

IV.1 Matériels et Méthodes

Avant d'exposer les résultats des mesures, sur les eaux de la nappe alluviale nous jugeons utile de présenter les conditions ainsi que les techniques de mesure. Des outils informatiques (logiciels), employés pour le traitement de nos résultats, nécessitent d'être brièvement présentés.

IV.1.1 Méthode d'échantillonnage sur terrain :

Une étude piézométrique de la nappe alluviale d'oued de Tamanrasset a été menée durant le mois de (septembre 2016). Le relevé du niveau de la nappe a porté sur 31 puits bien répartis sur la nappe d'inféro-flux.

L'étude piézométrique de la nappe consiste en la mesure de la profondeur de la nappe, ses coordonnées géographiques et sa cote dans chaque puits. Cela dans le but de déterminer le sens d'écoulement de cette nappe et le gradient hydraulique.

- ❖ La mesure de la profondeur de la nappe a été effectuée par une sonde électrique graduée.
- ❖ Les coordonnées géographiques des points d'eau ont été mesurées par un GPS.

La mesure de la profondeur du substratum de la nappe superficielle qui coïncide généralement avec la profondeur totale des puits.

IV.1.2 Modélisation des écoulements d'eaux souterraines et présentation du logiciel utilisé :

Avec Visual MODFLOW, on dispose d'un ensemble complet d'outils qui permettra de traiter les modalités des écoulements d'eaux souterraines, et les initiatives concernant la protection des eaux de source.

IV.1.3 Modélisation Conceptuelle et Numérique Intégrée 3D des écoulements d'eaux souterraines :

Visual MODFLOW assure une transition transparente entre les données brutes et le modèle numérique, en passant par la conceptualisation, le tout dans un seul environnement de modélisation intuitive. Cette conceptualisation consiste à réaliser les étapes suivantes :

- Définir la géologie et les couches de modèles complexes à l'aide des données de coupes de fonds de trous et des coupes transversales
- Interpréter les données SIG pour définir les propriétés hydrogéologiques et les limites sans les contraintes du maillage

- Dérouler, analyser, et valider les résultats du modèle à l'aide des données brutes en 2D, 3D, et des sections transversales
- Créer facilement des conceptualisations multiples ; générer de nombreux maillages et modèles de scénarios en parallèle dans un unique projet.
- Etablir les incertitudes en comparant les potentiels hydrauliques à partir d'exécutions de modèles multiples en 2D, 3D ou sur des diagrammes

IV.1.4 Objectif des modèles numériques.

En *hydrogéologie*, la modélisation numérique s'applique à retranscrire, à l'aide de la programmation informatique, l'écoulement des eaux souterraines et la migration des polluants dans le système aquifère. La démarche de représentation théorique simplifiée d'un tel système comporte :

- la définition d'une structure (architecture ou géométrie des réservoirs),
- la formulation de lois (relations déterministes ou probabilistes) reliant les impulsions ou entrées du système à ses réponses ou sorties,
- la définition des paramètres (constants ou variables) entrant dans ces relations.

Les modèles numériques sont utilisés en tant que :

- outil de compréhension, parce qu'ils permettent d'inventorier l'ensemble des données disponibles sur un site d'étude et de comprendre son fonctionnement. A contrario, ils identifient les zones en déficit d'informations, qui pourront être investiguées et les zones à surveiller ;
- outil de gestion et de prédiction des ressources et/ou de la qualité des eaux. Les modèles servent à prédire l'influence d'un pompage, estimer l'impact d'aménagements (barrage, bâtiments...) sur les niveaux d'eau dans les nappes et les débits dans les cours d'eau, prévoir l'évolution d'une pollution (trajectoires, temps de transfert, concentration) ou encore, à partir d'un modèle de gestion valide (ex. : Modèle Nord-Aquitain), aider à la définition de schéma de gestion et/ou évaluer les conséquences des changements climatiques sur les réserves en eau.

Les modèles intègrent diverses équations mathématiques qui sont communément résolues au moyen de deux méthodes :

La méthode des différences finies et la méthode des éléments finis. Dans les deux cas, la modélisation nécessite que le système aquifère soit discrétisé (ou segmenté) en mailles (ou cellules) de formes variables.

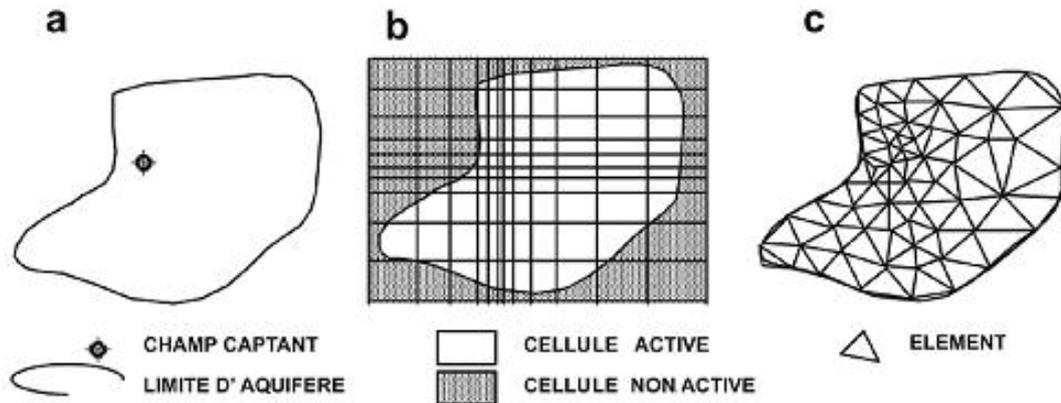


Figure 12: Discretisation d'un aquifère à l'aide d'un maillage en différences finies et en éléments finis

Le maillage en différences finies consiste en des cellules parallélépipédiques rectangulaires généralement cubiques mais des modifications permettent de resserrer le maillage au niveau d'une zone d'intérêt comme ici au droit du champ captant. Le maillage en éléments finis est représenté par des cellules polygonales quelconques (triangles, quadrilatères...) et offre donc plus de flexibilité dans la représentation d'un système irrégulier.

Même si chaque approche a ses avantages et ses inconvénients, il y a très peu de problèmes hydrogéologiques pour lesquels l'une est clairement meilleure que l'autre.

Les méthodes se différencient notamment par les difficultés de programmation et les précisions numériques.

IV.1.5 Déroulement de la modélisation :

IV.1.5.1 Cadrage :

Délimiter la zone modélisée, découper le domaine modélisé en mailles.

IV.1.5.2 Calage validation:

Initialiser les caractéristiques de chaque maille calée le modèle sur un état donné. Il est indispensable de vérifier la robustesse du calage sur un jeu de données complémentaires (une autre période bien connue).

IV.1.5.3 Simulation:

Exploiter le modèle (test de scénarios, etc.)

IV.1.5.4 Le maillage :

Discretisation du domaine étudié en formes élémentaires où seront résolues les équations des écoulements souterrains quelle géométrie et quelle représentation choisir ? 2D (vertical, horizontal) quasi-3D (2D multicouches) vrai 3D selon la complexité du terrain selon la quantité et qualité des données disponibles.

Forme du maillage souvent liée à la méthode de résolution numérique : différences finies (approximation par fonction constante); maillage quadrangulaire éléments finis (approximations polynomiales); maillage triangulaire orientation générale du maillage à adapter en fonction des directions d'écoulement, des limites principales, etc.

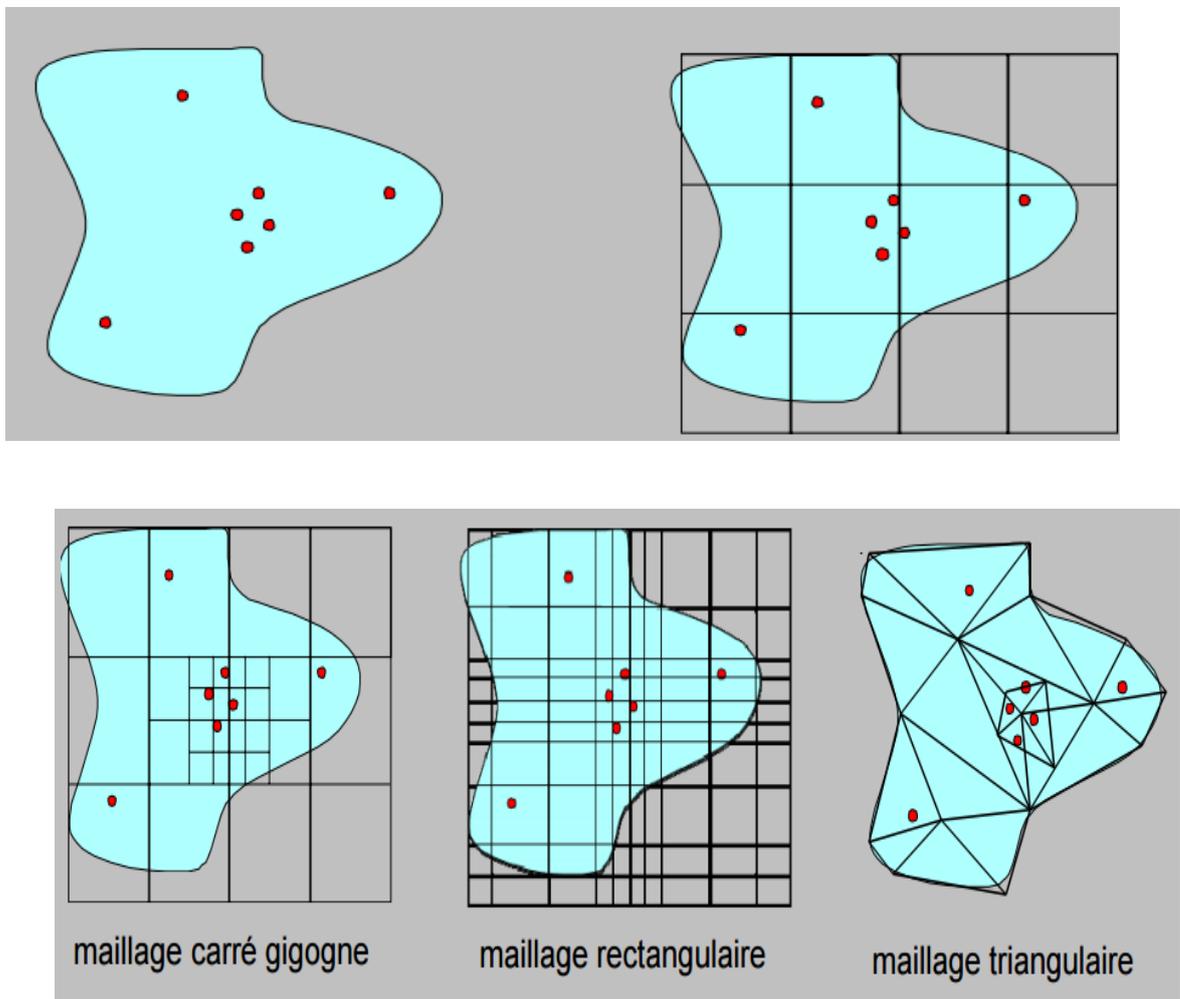


Figure 13:les formes des maillages

Notre domaine a été découpé en 110 lignes et 46 colonnes en utilisant un maillage carré de 100 m de coté. Cela a donné un nombre total de mailles égales à 5060

Initialisation:

Pour chaque maille (ou chaque sommet de maille) rentrer : - les données structurales (topographie, géométrie horizontale et verticale de chaque niveau aquifère) généralement non remises en cause par la suite - les caractéristiques hydrodynamiques et hydro chimiques (K, T, S, dispersion) - les flux entrants et sortants imposés au modèle (naturels ou anthropiques).

IV.1.6 Conditions aux limites

potentiel imposé (condition de Dirichlet) ex. un grand plan d'eau libre flux imposé (condition de Neumann) ex. échange avec un autre aquifère, recharge condition mixte avec seuil (condition de Cauchy) ex drain, rivière toujours vérifier que les flux calculés via les potentiels imposés sont compatibles avec les observations de terrain vérifier l'effet des limites sur les calculs si le modèle ne couvre pas tout l'aquifère conditions pouvant varier dans le temps mais fixes pour un pas de temps de calcul.

IV.1.7 Objectif et méthode du calage

reproduire le mieux possible la piézométrie observée critères empiriques (expertise) critères statistiques (minimiser les différences observé/simulé) toutes les zones n'ont pas besoin d'être calées avec la même précision appréciation subjective dépendant de la quantité et de la représentativité de l'info modification progressive des variables Q, T, S méthode directe : par tâtonnements successifs, long mais instructif méthode inverse : rapide et fragile, unicité de la solution ? Nécessité de rester dans une gamme de valeurs raisonnable

IV.2 Campagne piézométrique de la nappe d'inféro-flux (oued Tamanrasset) :

Une campagne piézométrique a été effectuée le septembre 2016. Nous sommes déplacé à la région de oued Tamanrasset pour étudier d'écoulement d'eau souterraine de la nappe d'inféro-flux. Les travaux de terrain consistent en la mesure de la profondeur du substratum et le niveau piézométrique à partir de 31 puits répartis sur l'oued .Un relevé systématique des coordonnées géographiques et des côtes dans chaque puits. Nous ont constaté l'existence d'un nombre important de puits dans cette zone.

Le premier forage se situe au Nord-Ouest de l'oued (forage P01 de débit de 15 l/s), et le deuxième forage est situé au centre de l'oued tamanrasset (forage P03 de débit égale à 5l/s). Le but de l'implantation de ces forages est de renforcer la nappe etudier.

Les relevés de la topographie et de la profondeur du substratum de nappe et du niveau piézométrique, ont été faits sur 31 puits par d'utilisation d'un matériel adapté composé de

sonde piézométrique d'un GPS et d'une corde graduée pour mesurer la profondeur de chaque puits.

Les résultats des mesures des coordonnées géographiques des puits et des profondeurs de la nappe sont présentés dans le tableau (chapitre 02).

Les résultats des mesures sur terrain montre que la profondeur du substratum de la nappe est variable et la valeur la plus grande est enregistrée à l'est avec 22.1 m.par contre, la profondeur de puits le plus haut est de 6.6m.

IV.3 Délimitation de la zone à modéliser :

Pour la réalisation du présent travail, on a opté pour la nappe d'inféro-flux d'oued Tamanrasset qui a une superficie de 50.6 km et de périmètre de 31.2 km. Ce sont des alluvions qui contiennent une nappe alluviale, alimentée par les eaux des forages d'irrigation.

La figure suivante donne le plan général de la zone d'étude qui se situe à peu près entre les coordonnées :

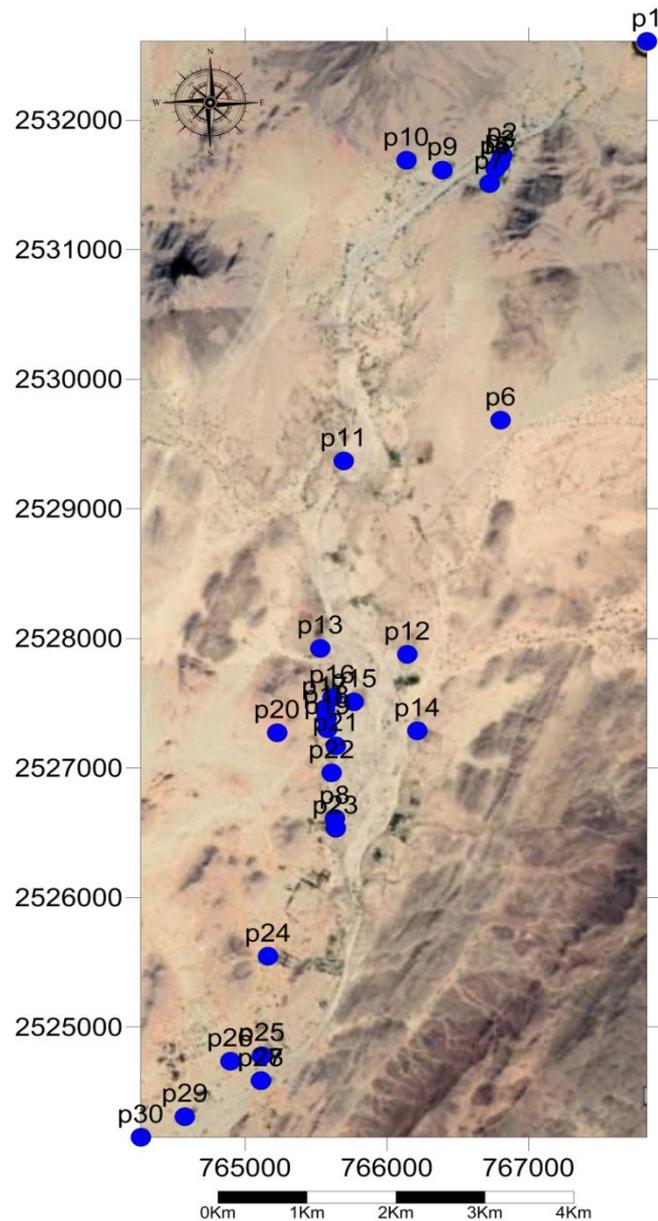


Figure 14: carte de localisation des puits (google earth)

Après la collecte de toutes les données, on limité la zone de l'oued Tamanrasset sur Google Earth entrée les coordonnées géographiques des (31) puits dans ce programme et en sortir l'élévation de chaque puits.

IV.4 Modèle topographique de la nappe d'inféro-flux :

Après avoir délimité l'oued, on doit préciser les élévations de chaque couche : la surface topographique du sol et la surface topographique du substratum.

Une application en ligne appelée Z-Terrain proposée par la compagnie « Zonum Solution » permet de télécharger les élévations de n'importe quel endroit du globe. L'élévation d'un emplacement spécifique est obtenue à partir des ensembles de données 'USGS Seamless

Elevation' hébergés chez USGS / EROS. Les valeurs d'élévation sont retournées par défaut à la source de données la plus disponible (la plus haute résolution) disponible au point spécifié. Si vous ne parvenez pas à trouver des données au point demandé, une valeur négative extrêmement élevée est renvoyée. La figure suivante montre le processus d'extraction des altitudes dans Z-Terrain. Au total, 3600 valeurs de XYZ sont extraites pour construire un MNT sous forme d'un fichier topographique dans le logiciel Surfer (topo.grd) qui sera par la suite importé dans Modflow.

Un fichier similaire concernant le substratum a été généré dans le logiciel Surfer en utilisant les données de terrain des profondeurs totales des puits (substratum.grd).

L'importation de ces deux surfaces a permis la construction du modèle géométrique en 3D.

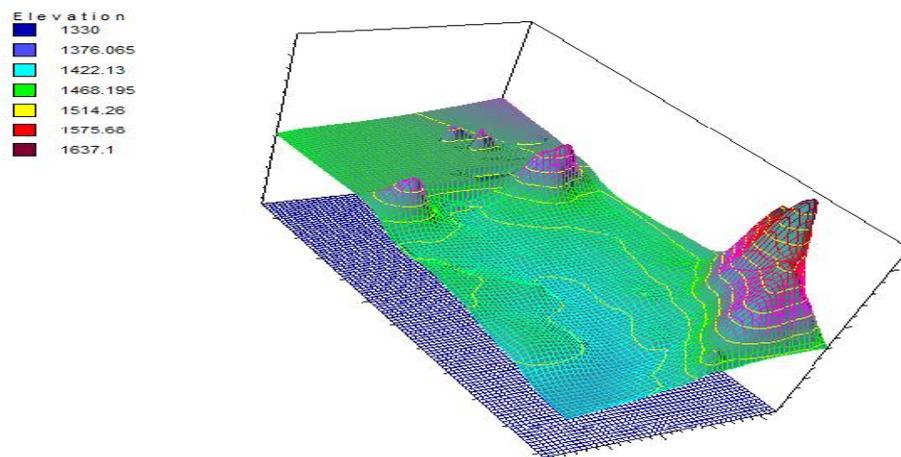


Figure 15: modèle 3D et extension de l'aquifère de l'oued Tamanrasset

IV.4.1 Discrétisation du domaine à modéliser :

On commence sur le logiciel Modflow par la détermination du nombre de mailles (110 lignes et 46 sur colonnes), donc il y a 5060 cellules rectangulaires pour obtenir la résolution optimale. En même temps, on précise les limites (X min, X max) et (Y min Y max) dans cette fenêtre. Ce choix des dimensions des mailles est justifié par le nombre des données disponibles parce que la distance moyenne entre les puits est environ 100 m suivant l'axe des X et 50 suivant l'axe des Y.

Après, on a inséré l'image de la zone limitée comme fond du maillage et on a désactivé les cellules se trouvant hors limite de l'oued (cellules en vert). L'extension du domaine est présentée sur la figure suivante :

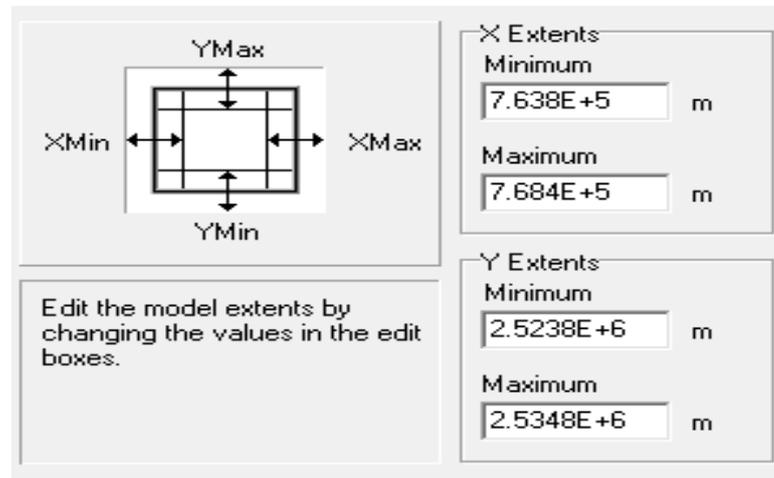


Figure 16:Extension du domaine modélisé

IV.4.2 Implémentation des données :

Après l'étape de la délimitation du domaine, on procède par la suite à faire entrer toutes les données nécessaires à la réalisation du modèle.

Il s'agit en premier lieu d'introduire les informations relatives aux forages de pompage (pumping wells) et les piézomètres (head observation wells). Les informations indispensables varient entre la position du puits, la position de la crépine, le calendrier et le débit de pompage, et le niveau piézométrique.

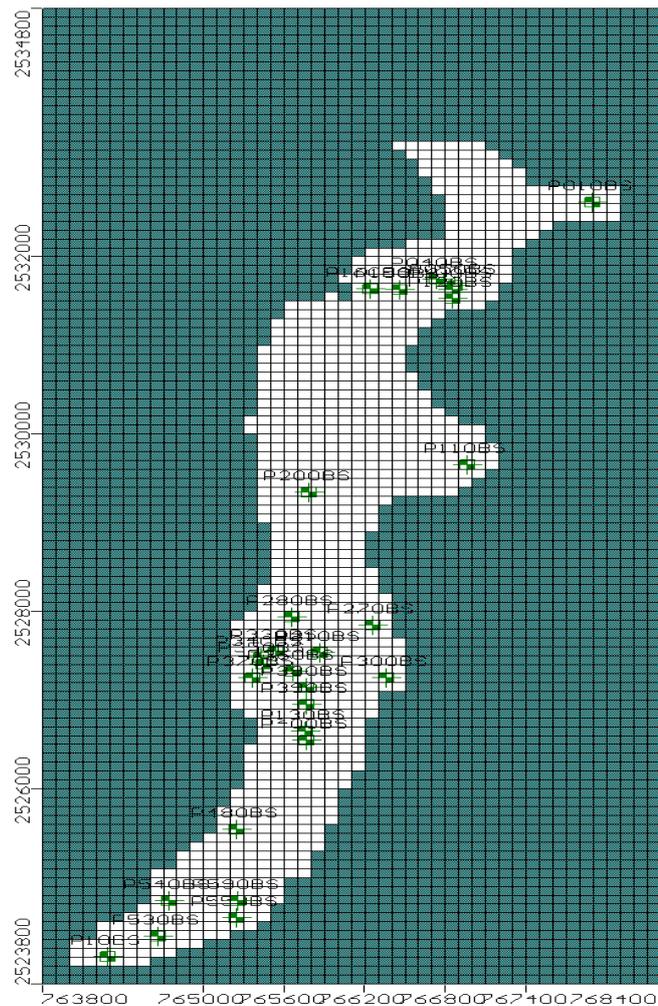


Figure 17:carte localisation des piézomètres

L'étape suivante concerne les paramètres hydrodynamiques des alluvions dans cette région : la porosité, l'emmagasinement et la perméabilité.

Les données hydrodynamiques proviennent des essais réalisés sur terrain et parfois des estimations selon la lithologie et les travaux bibliographiques. Les analyses granulométriques des échantillons de sols prélevés à des profondeurs variables (de 15 cm à 60 cm) ont permis une estimation des paramètres hydrodynamiques (porosité et perméabilité). Des essais de perméabilité en utilisant le perméamètre de Viguier ont donné des valeurs variant entre 10^{-4} et 10^{-6} m/s (Hamedi, 2014 ; Imen.T, 2003).

D'après ces travaux on réaliser une zonation des paramètres hydrodynamiques.

Le coefficient d'emmagasinement pour une nappe libre est égal à la porosité efficace. Il varie entre 15% et 20%, alors que la porosité totale pour les alluvions varie entre 20 et 30%. (Imen.T.2003).

La recharge de la nappe est assurée par trois sources : les précipitations, les eaux d'irrigation et les fuites des forages.

La valeur moyenne des précipitations dans la région de Tamanrasset est de l'ordre de 42.5 mm. On estime la précipitation efficace à 20 % de la valeur totale c.a.d. 8.5 mm/an.

D'après le bilan hydrologique, l'évapotranspiration potentielle (ETP) est estimée d'après la méthode de Thornthwaite à 1700mm /an (chapitre2).

IV.5 Les conditions aux initiales et les conditions aux limites :

Les conditions aux limites concernent les règles d'échanges des flux d'eaux ou de matière entre le domaine modélisé et le milieu extérieur. La détermination de ces conditions est nécessaire pour résoudre l'équation de diffusivité et assurer une convergence du système d'équations du modèle.

La configuration du système hydrogéologique de la nappe aquifère d'oued Tamanrasset permet de définir les conditions aux limites comme suite :

- Limite à flux entrant : situés à nord Est et au nord de l'oued.
- Limite à flux sortant : située au sud de l'oued

L'introduction de ces limites est assuré dans Modflow par Boundaries/ GBH, Wall et River.

-Les conditions initiales sont représentées par l'état de la nappe dans une période de référence.

IV.6 Calage du modèle en régime permanent :

L'objectif de cette étape est de reproduire un état stable de la piézométrie, c'est-à-dire minimiser l'écart entre les niveaux piézométriques calculés et celles observés en modifiant les valeurs locales de la perméabilité des alluvions.

On a procédé par tâtonnement visant à réduire l'erreur RMS et la valeur maximale du résidu entre valeurs calculées et valeurs observées de la piézométrie.

La figure suivante représente le cas de la calibration avec la valeur de RMS obtenir une valeur acceptable pour arrêter l'opération du calage. Cette valeur est de 6.192 % (inférieure à 10%).

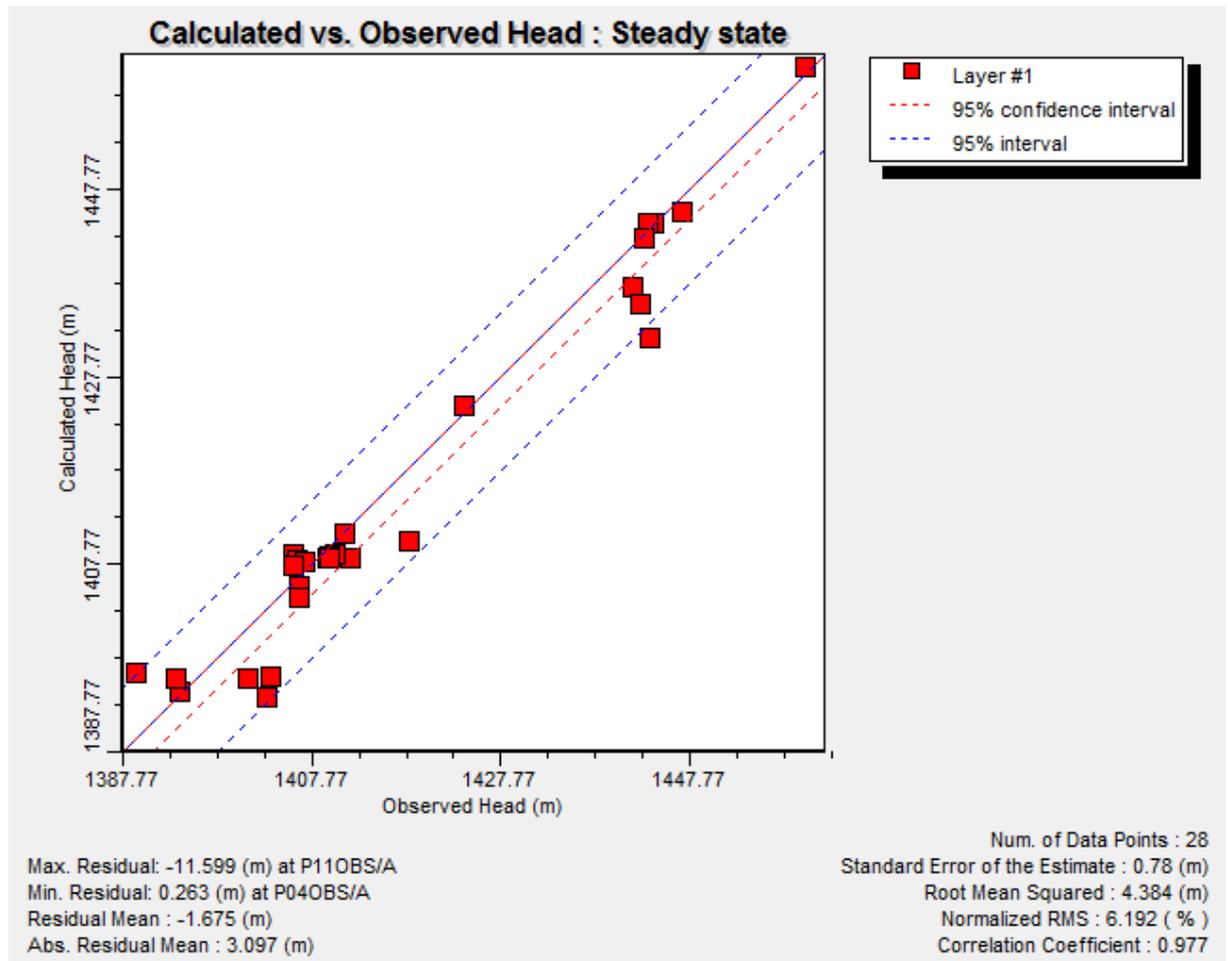


Figure 18: corrélation finale entre valeur mesurées et calculées de la piézométrie

L'état final du calage correspond à une configuration améliorée de la perméabilité des alluvions. Le logiciel Modflow reproduit la carte des perméabilités après calage représentée par la figure suivante :

	Zone	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]	Active	Distribution Array
▶	1	0.0001	0.0001	1E-5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2	0.012	0.012	0.0012	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3	0.005	0.005	0.0005	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4	0.03	0.03	0.0012	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	5	0.0001	0.0001	1E-5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	6	0.05	0.05	0.001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	7	0.001	0.001	0.0001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

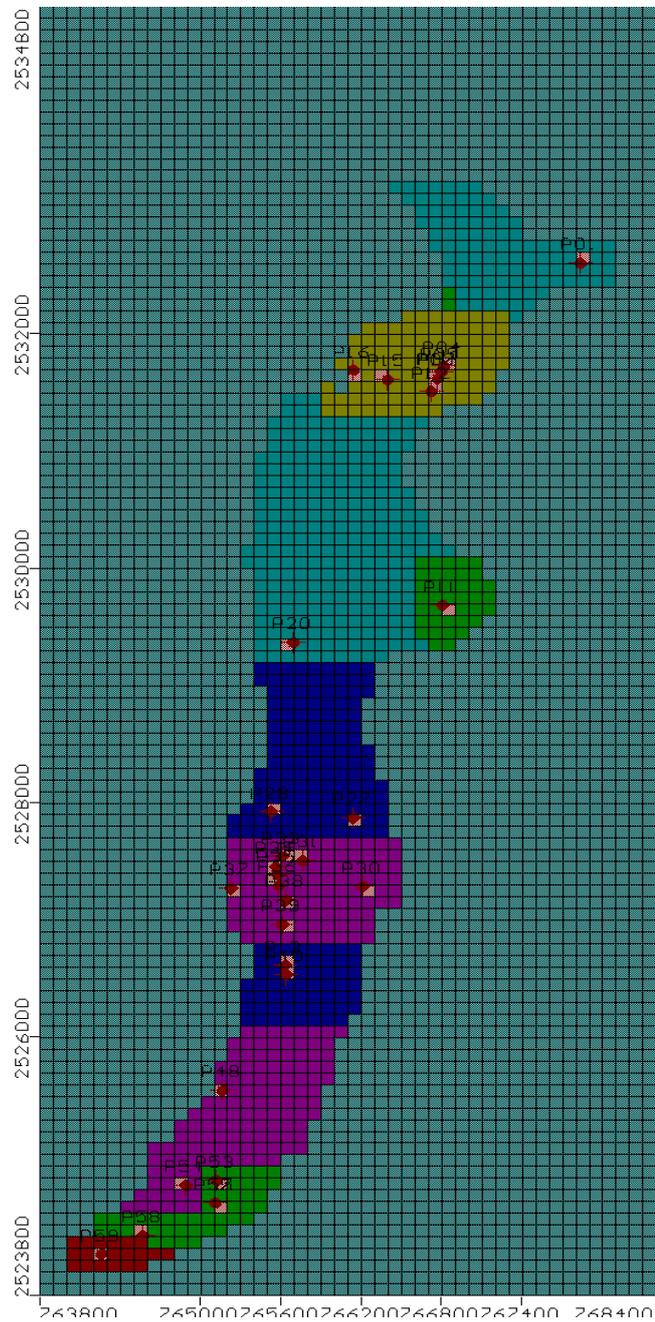


Figure 19: Carte de distribution des perméabilités après calage en régime permanent

IV.7 Restitution de la piézométrie :

Après le calage, l'exécution du modèle (Run) reproduit, après plusieurs itérations (10 itérations). Le système d'équations tend vers la convergence ceci est démontré par le graphe suivant de l'évolution du résidu et du changement dans les valeurs de la hauteur piézométrique en fonction du nombre d'itération. Cette stabilité se traduit par la reproduction d'une situation piézométrique la plus proche possible de celle observée. Le degré d'exactitude de cette reproduction est estimé par une droite de corrélation entre les valeurs mesurées et celles calculées par le logiciel. La figure révèle une erreur moyenne RMS de l'ordre de 6.192%.

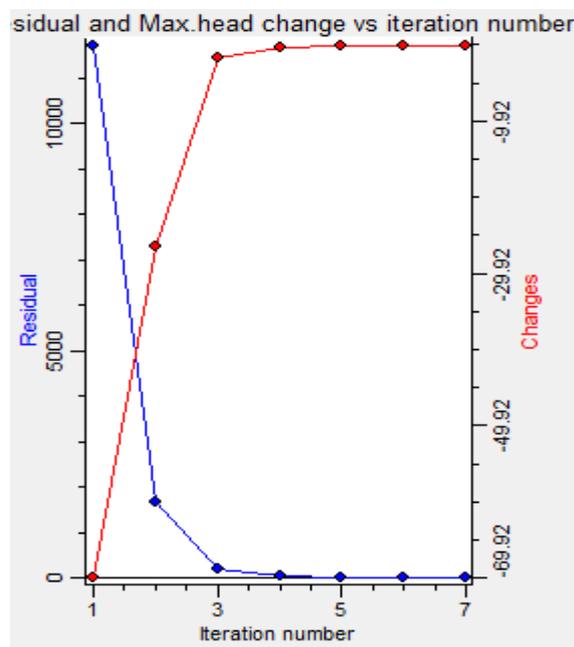


Figure 20: évolution du résidu et des changements de la piézométrie en fonction du nombre d'itérations

La carte de la piézométrie restituée par le modèle après calage en régime permanent a donné des niveaux piézométriques identiques à ceux observés en Mai 2019. L'écart moyen est de l'ordre de demi-mètre. La figure suivante donne cet état calculé par Modflow.

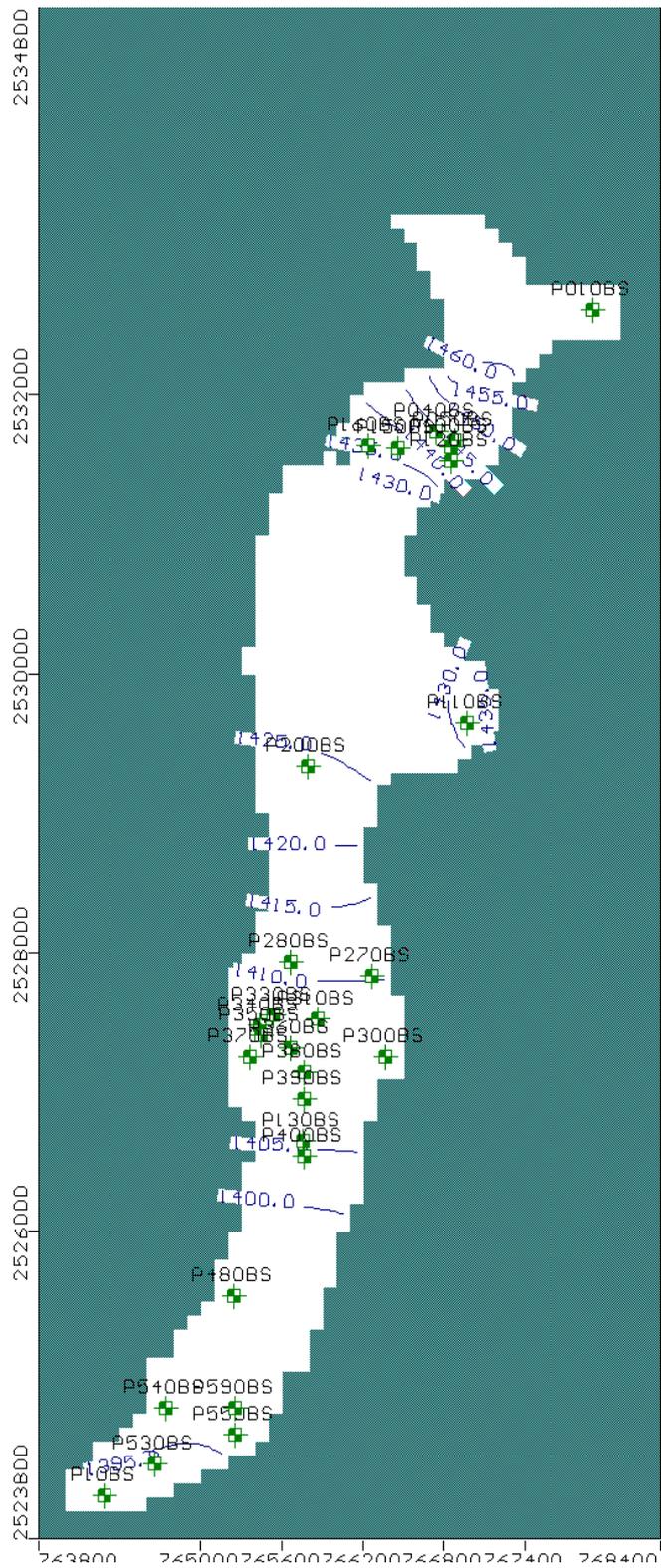


Figure 21: carte piézométrique calculée après calage

IV.8 Etude du bilan après calage :

La phase du calage en régime permanent a permis d'établir le bilan suivant :

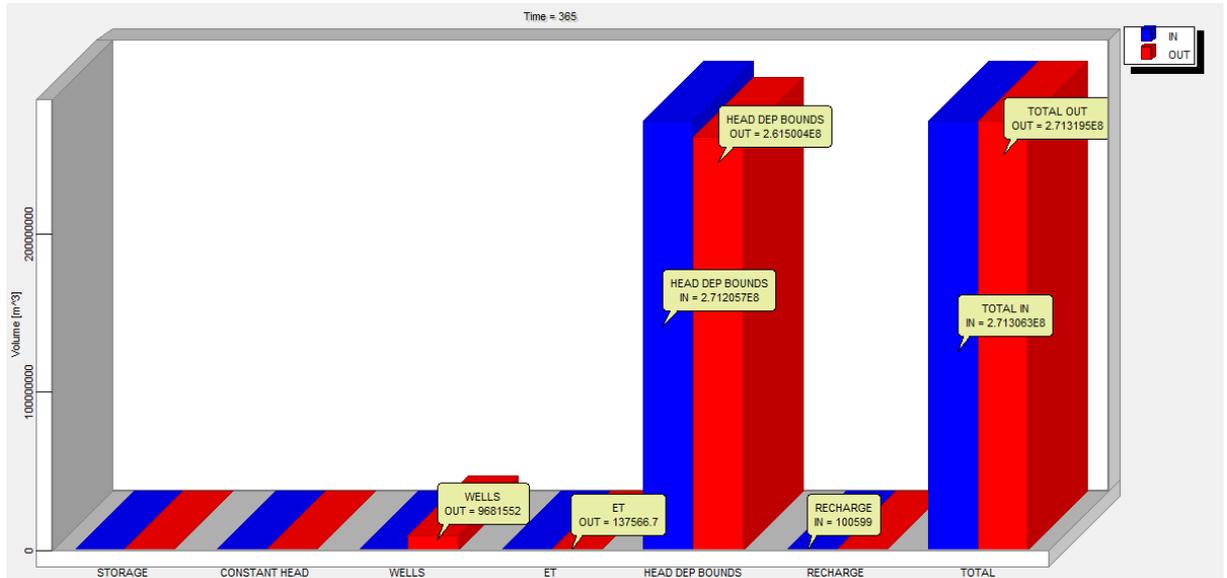


Figure 22: résultats du bilan après calage en régime permanent

Les résultats du bilan hydrologique du système aquifère après calage en régime permanent a permis de déduire la part de chaque élément dans le cycle hydrologique de la nappe alluviale de oued Tamanrasset. On peut dire que la contribution de la dominante dans la recharge de la nappe. Les sorties sont représentées essentiellement par les pompages par les puits d'irrigation. La nappe d'inféro-flux est continue en aval, ce qui explique les volumes sortant par la limite sud-ouest (headdepbounds).

IV.9 Conclusion :

La modélisation numérique de la nappe alluviale de oued de la région de Tamanrasset, a fournies données indispensables à une gestion rationnelle de cette ressource primordiale au développement durable dans les zones arides.

Le modèle conceptuel a considéré la nappe alluviale comme une aquifère monocouche afin de simplifier la représentation et de faciliter les calculs.

Le modèle mathématique nous a permis de simuler l'état initial en régime permanent dont les résultats de simulation sont satisfaisants.

Le bilan de la nappe calculé après le calage du modèle montre un équilibre entre les flux entrants et ceux sortant avec un écart de la simulation acceptable.

L'exploitation du modèle par le scénario de sécheresse a révélé que le niveau piézométrique de la nappe est sensible à la diminution de la recharge et à l'exploitation. Ainsi que l'impact des changements climatiques et de l'exploitation intensive est plus remarquable dans la zone d'étude. Cela est dû d'une part à la structure du substratum de la nappe qui plonge en profondeur dans cette partie et d'autre part au nombre important des puits qui amplifient l'exploitation de l'aquifère.

CHAPITRE IIV :
ETUDE HYDRO CHIMIQUE

V.1 Introduction :

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines sont nombreuses, et la composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, et de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie, etc.). La température, la résistivité et les sels dissous se comportent fréquemment comme des marqueurs naturels permettant d'étudier les caractéristiques hydrogéologiques de la couche aquifère et les facteurs d'écoulement souterrain. L'étude de leur variation dans l'espace et dans le temps permet de compléter les informations déjà obtenues sur la nature lithologique du terrain traversé. Il faut noter que les normes de qualité des paramètres physico-chimiques des eaux sont souvent déterminées en fonction des utilisations (eaux potables, industrielles, d'irrigation) ; ces normes peuvent limiter les possibilités d'emploi et l'importance des ressources exploitables. En raison des multiples utilisations des eaux de la nappe infero flux cette étude a été menée afin de contrôler l'état actuel de la qualité chimique des eaux, leur évolution dans le temps, dans l'espace et en fonction de la variation des paramètres physico-chimiques.

L'étude hydro chimiques sera basée sur l'interprétation des mesures des paramètres physicochimiques et des analyses de quelques échantillons prélevés au mois dans les forages et les puits de la cuvette de l'aderien (oued Tamanrasset amont).

L'étude hydro chimiques sera basée sur l'interprétation des mesures des paramètres physicochimiques et des analyses de 24 échantillons prélevée dans les forages et les puits de la cuvette de l'oued (oued Tamanrasset) tableau 13 Elle a pour but de vérifier la potabilité d'eaux dans la nappe étudiée.

Tableau 12 : résultats des analyses hydro chimique en (mg/l).

N°écha	RS (mg/l)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	(Ca ⁺²	Na ⁺	Mg ⁺²	k	E (µs/cm)	C
P2	226	2.77	0.72	0.35	2.02	0.67	1.13	0.05	3.87	300
P3	476	7.66	1.07	0.92	3.16	0.94	2.04	0.04	6.18	226
P4	382	3.49	1.31	1.2	3.01	0.78	1.85	0.03	5.67	380
P6	268	3.7	0.76	0.38	2.38	0.53	1.59	0.03	4.53	440
P8	236	3.09	0.8	0.41	1.96	0.76	1.24	0.03	3.99	580
P10	260	3.21	0.88	0.51	1.88	0.63	1.78	0.03	4.32	390
P12	312	3.52	0.92	0.93	2.66	0.7	1.74	0.02	5.12	445
P15	450	4.64	1	1.03	3.48	0.94	1.78	0.04	6.24	520
F12	990	17.43	1.2	0.61	8.32	7	4.3	0.4	20.02	-
F13	516	8.87	1.06	0.67	4.11	4.5	2.4	0.24	11.25	-
P13	-	3.2	2.5	1.14	3.16	1.87	2.06	0.02	7.11	450
P20	-	6.3	5.5	1.07	7.61	2.41	3.35	0.02	13.39	485
P21	-	3.9	0.5	1.4	2.75	0.99	2.38	0.02	6.14	130
P22	-	4.6	0.5	2.16	3.11	1.15	2.56	0.02	6.84	640
P23	-	3.1	0.5	1.02	2.38	0.92	1.28	0.02	4.6	340
P24	-	4.8	2.5	1.38	4.21	1.85	3.3	0.02	9.38	525

V.2 Caractéristiques physico-chimique :

V.2.1 Température :

Dans les eaux de la nappe inféro –flux de la cuvette de l’oued, les températures mesurées varient entre 26.6C° et 27.6C°. La température est presque stable, cela est du au fait que les prélèvements ont été effectués à des profondeurs de niveau d’eau relativement élevées.

V.2.2 Conductivité :

La conductivité permet de mesurer la propriété de l’eau à conduire le courant électrique qui dépend de la concentration en sels dissous. Elle permet donc, d’évaluer le degré de minéralisation d’une eau.

Nous constatons que les valeurs de la conductivité à 26.6C° et 27.6C° des 16échantillons varient entre 300 et 880 umho/ cm.

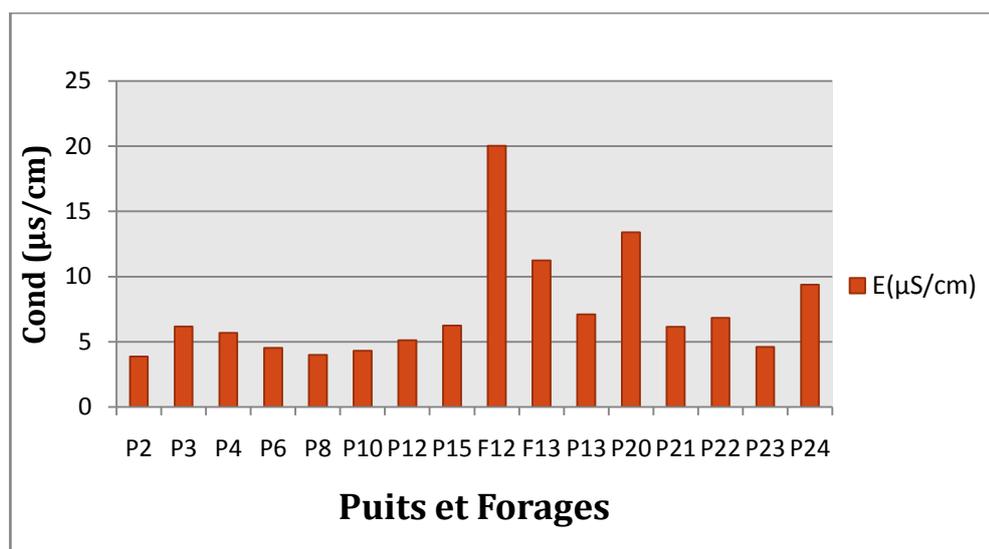


Figure 23 : Histogrammes des conductivités (avril 2019)

L'observation de l'histogramme de conductivité montre que (figure23.) la valeur de la conductivité varie entre 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 640 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

V.2.3 Le résidu sec :

Le résidu sec correspond à la totalité des teneurs en matière organiques et des sels dissous dans l'eau. Obtenu par évaporation à 110°C. il donne une idée sur la minéralisation globale de l'eau.

Les valeurs des résidus secs de l'eau de la nappe d'inféro-flux présentent des valeurs qui varient entre 226mg/l et 990mg/l. on remarque que les valeurs augmentent dans le sens de l'écoulement de la nappe.

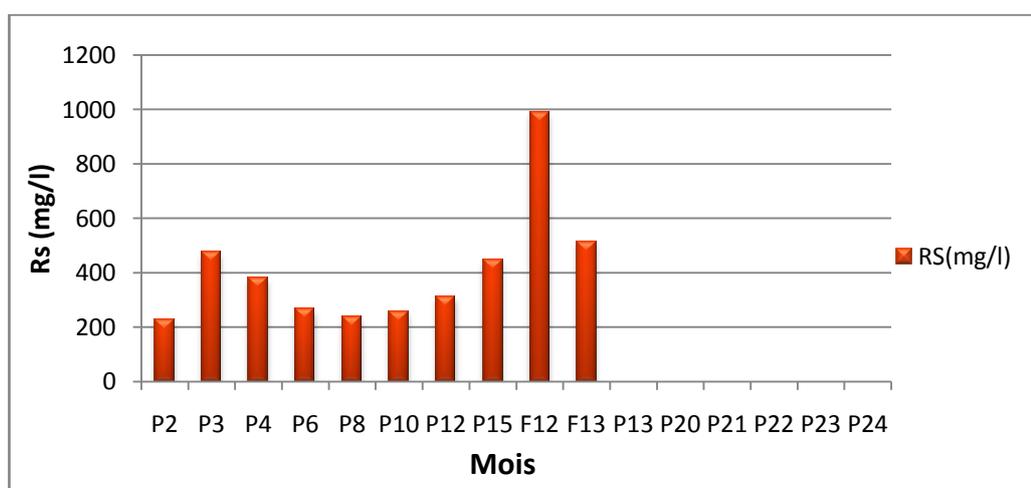


Figure 24 : Histogrammes du résidu sec (avril 2019)

V.3 Classification des eaux et représentation graphique :

V.3.1 Classification des eaux selon stabler :

Les concentrations sont exprimées en mg/l et ramenées à des quantités en réaction en meq/l. la formule caractéristique consiste en premier lieu à calculer le pourcentage de chaque ion en meq/l. Par rapport à la concentration totale (C) par la formule suivante :

$$R \% = (r / e) 100$$

On classe séparément les anions et les cations par ordre décroissant de gauche à droite.

Les formules caractéristiques sont consignées dans le (tableau N° :14). Cette classification de stabler montre qu'il s'agit dans tous les forages et puits d'une eau bicarbonaté calcique.

Tableau 13: classification des eaux selon stabler.

N° échantillons	La formule caractéristique	Le faciès chimique
P2, P3, P4, P6, P8, P10, P20, P24	$r \text{HCO}_3 \geq r \text{SO}_4 \geq r \text{Cl}$ $r \text{Ca} \geq r \text{Mg} \geq r (\text{Na} + \text{K})$	Bicarbonatées calciques et magnésiennes
F12, F13, P15, P12, P13, P22, P23	$r \text{HCO}_3 \geq r \text{Cl} \geq r \text{SO}_4$ $r \text{Ca} \geq r (\text{Na} + \text{K}) \geq r \text{Mg}$	Bicarbonatées calciques

V.3.2 Représentation des eaux selon le diagramme de Piper :

Cette classification permet la représentation des échantillons en fonction des pourcentages des quantités en réaction des cations et des anions dans chaque triangle du diagramme. Nous obtenons un point triple pour les cations et un autre pour les anions de chaque échantillon. Le prolongement des points dans le losange détermine un point unique caractéristique du faciès chimique de l'eau, qui permet une approche globale de la composition chimique des eaux.

Les points projetés dans les triangles montrent une tendance vers le pôle bicarbonate pour les anions et calcique ou magnésique pour les cations. Dans le losange, tous les points sont placés dans l'aire du faciès bicarbonaté calcique ou magnésique.

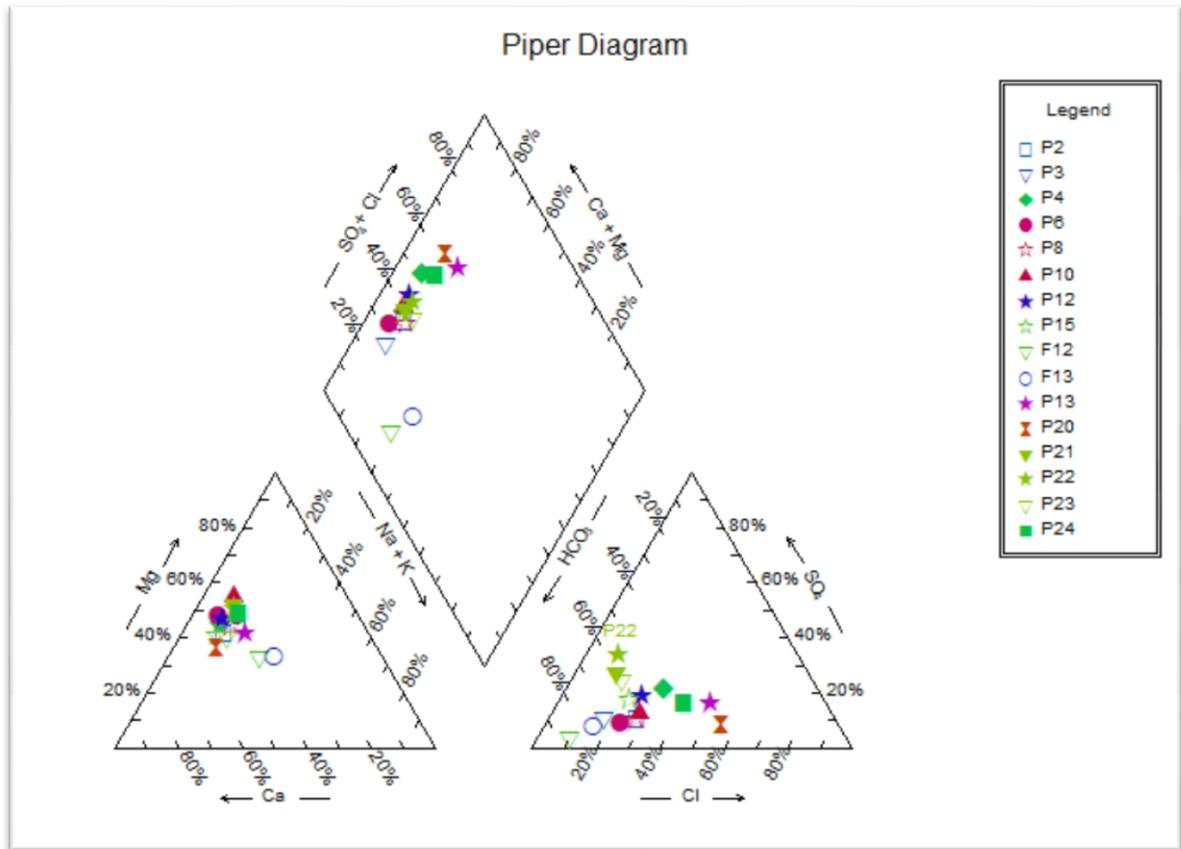


Figure 25: Représentation des eaux selon le diagramme de Piper (avril 2019)

Les points projetés dans les triangles montrent une tendance vers le pôle bicarbonate pour les anions et calcique ou magnésique pour les cations. Dans le losange, tous les points sont places dans l'aire du faciès bicarbonaté calcique ou magnésique.

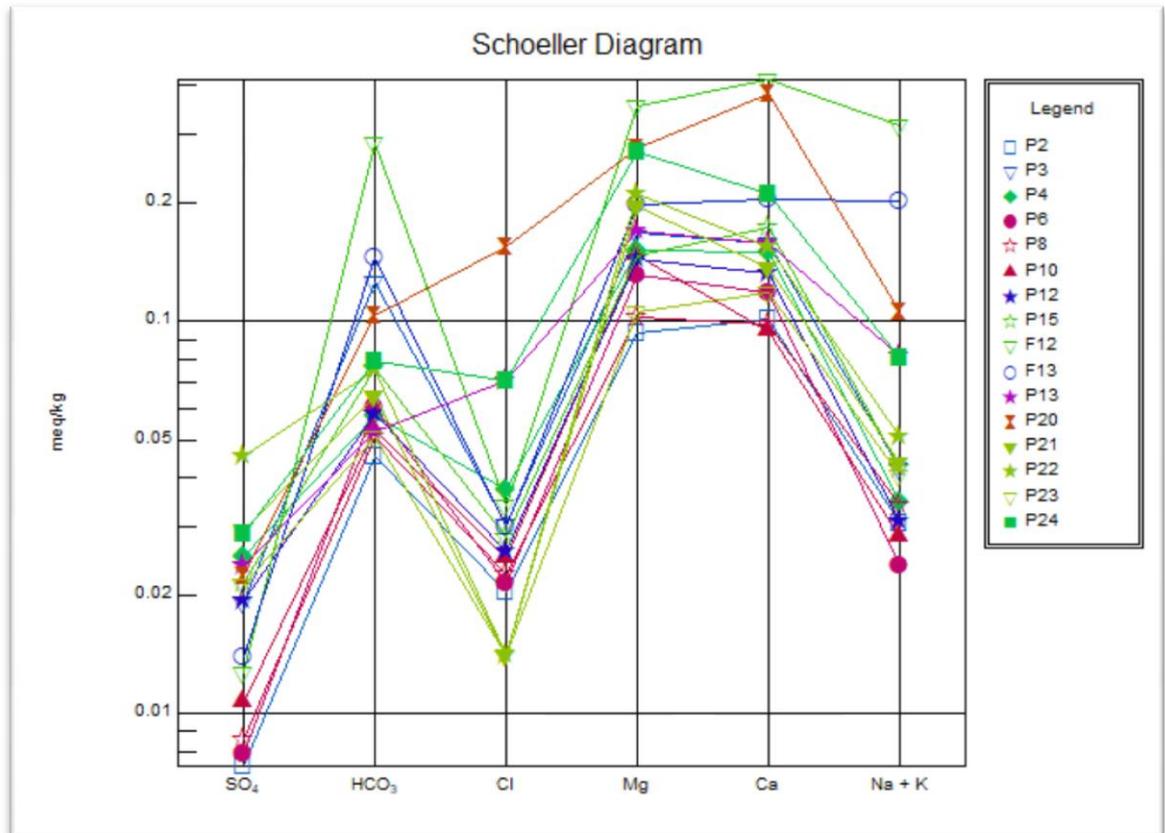


Figure 26: Représentation des eaux selon le diagramme de schoeller (avril 2019)

Selon ce diagramme on remarque la dominance bicarbonaté et calcique des ce qui peut être traduit par l'appartenance des eaux de l'oued tamanrasset à la famille bicarbonaté calcique.

Remarque :

Les analyses des éléments chimiques mettent en évidence des eaux beaucoup moins minéralisées au nord. Et plus minéralisées vers le site du barrage de la zone d'étude. Cette augmentation de la minéralisation dans le sens de l'écoulement est due au faible écoulement de l'eau (faible pente) et stagnante au niveau du barrage.

V.4 Paramètres chimique :

Le calcium (Ca^{+2}):

Sa présence résulte principalement de l'infiltration des eaux météoriques à travers des formations carbonatées. La dissolution qui s'en suit est favorisée par le gaz carbonique provenant de l'atmosphère et du sol. Les teneurs de Ca^{2+} de la nappe libre sont comprises entre 1,88 méq/l comme valeur minimale, elles vont atteindre la valeur maximale 8,32 méq/l.



Le Magnésium (Mg^{+2}) :

Second élément intervenant dans la dureté totale des eaux, Ces ions proviennent de la dissolution des roches magnésiennes du gypse et des minéraux ferromagnésiens et surtout de la mise en solution des dolomies et des calcaires dolomitiques.

On constate que les valeurs des concentrations en Mg^{2+} sont proches au niveau des différents forages. La teneur maximale est de 1,13 méq/l, et la concentration minimale est de 4,3 méq/l.

Le sodium et le potassium (Na, K) :

Le sodium et le potassium sont toujours présents dans les eaux naturelles en proportion variable. Le sodium peut provenir du lessivage des formations géologiques riches en NaCl ; le potassium est beaucoup moins abondant que le sodium, rarement présent dans l'eau. La teneur maximale de Na^{+} est 7 méq/l, et la concentration minimale est de 0,5 méq/l, et la teneur maximale de K^{+} est 0,4 méq/l, et la concentration minimale est de 0,02 méq/l.

Les chlorures Cl^{-} :

Ils sont toujours présent dans les eaux naturelles en proportions très variables, leur présence dans l'eau résulte de : La dissolution des sels naturels par le lessivage de terrains gypseux, marneux ou argileux. L'évapotranspiration intense dans les régions où le niveau piézométrique est proche de la surface du sol. La teneur maximale de Cl^{-} est 5,5 méq/l, et la concentration minimale est de 0,5 méq/l.

Les sulfates (SO_4^{-}) :

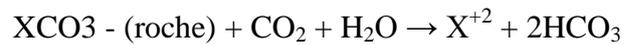
Les sulfates sont toujours présents dans l'eau naturelle, leur présence dans l'eau provient de :

Des formations gypseuses.

- Légère solubilité de $CaCO_3$ avec des passées gypseuses.
- Des eaux usées industrielles
- La teneur maximale de SO_4^{--} est 2,16 méq/l, et la concentration minimale est de 0,35 méq/l.

Les bicarbonates HCO_3^- :

Elles proviennent de la dissolution des roches carbonatées en fonction de la tension en CO_2 , de la température, le pH de l'eau et la nature lithologique des terrains traversés. Les bicarbonates sont le résultat de l'équilibre physicochimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique, selon l'équation générale suivante :



- Les concentrations en HCO_3^- sont faibles, elles sont comprises entre 3,1 méq/l et 17,43 méq/l.

V.5 Qualité chimique de l'eau :**Agressive et incrustation des eaux :**

Le caractère agressif ou incrustant d'une eau est déterminé par comparaison de pH mesuré au pH d'équilibre déduit à partir du diagramme logarithmique de schoeller.

- ❖ Si le pH mesuré est supérieur au pH d'équilibre, l'eau est incrustante
- ❖ Si le pH mesuré est inférieur au pH d'équilibre, l'eau est agressive.
- ❖ Si pH mesuré est égale au pH d'équilibre, l'eau est neutre.

Le pH des eaux de la nappe d'étude étant à peu près égale au pH d'équilibre, celles-ci sont neutre.

Si $i.e.b \geq 0$, les eaux échangent les ions Na, K contre les ions Ca, Mg, du terrain encaissant.

L'indice d'échange de base calculé dans le cas présent varie de -1.34 à 0.26 (tableau).

Il en résulte que 68% des échantillons d'eaux analysés ont une indice d'échange de base supérieur à zéro, indiquant ainsi un échange des ions Na, K contre les ions Mg et Ca de terrain encaissant.

D'après Rodier, La concentration maximal acceptable est la limite à partir de laquelle la qualité d'une eau est diminuée, et provoque chez le consommateur une certaine réticence.

La concentration maximale admissible est la quantité maximale des substances à tolérer, les teneurs supérieures pouvant être dangereuse pour la santé.

V.6 Conclusion:

Les eaux de la nappe inféro-flux sont peu minéralisées, les valeurs de la conductivité sont faibles. Cette faible minéralisation des eaux est liée à la nature lithologique de l'aquifère, qui est essentiellement quartzitique. Les eaux de la nappe sont douces, ce qui en fait des eaux chimiquement potables et propres à l'irrigation. Les différentes classifications chimiques adoptées permettent de distinguer que le faciès bicarbonaté calcique est prédominant.

Conclusion générale :

La région de Tamanrasset fait partie du Hoggar. Elle est située dans le grand massif cristallin, qui est subdivisé en trois zones concentriques en fonction de l'altitude et est affecté par un réseau faille : des failles subméridiennes, qui se comportent comme des barrières naturelles, et des failles obliques aux premières et qui se présentent sous forme de gouttières.

Après l'étude à l'oued Tamanrasset, nous sommes arrivés aux résultats suivants :

Le bassin versant de la zone d'étude de l'oued Tamanrasset est allongé avec un indice de compacité de Gravelius $K = 2.53$. Situé dans une zone aride qui est caractérisée par des faibles pluviométries, et une précipitation moyenne annuelle de 42.5 mm. Et une température moyenne annuelle de 22.59°C à Tamanrasset pour la période (2000 – 2018).

La géologie de l'oued montrant que le complexe alluvionnaire s'est développé sur un faciès métamorphique de type gneissique rubané. A grains grossières et mésocrate et qui forme le substratum. Des granites d'âge suggarien juxtaposent les formations métamorphiques de même âge dont fait partie le substratum. Les épaisseurs d'alluvions sont variées entre 10 à 30 mètres.

Avec une alimentation qui se fait par le réseau hydrographique qui achemine les eaux de précipitation en convergeant vers l'aquifère alluvionnaire. Et l'infiltration directe (pluie efficace).

Les transmissivités moyennes de l'aquifère alluvial varient entre $1.2 \cdot 10^{-2}$ et $1.7 \cdot 10^{-3}$. La perméabilité varie entre $1.2 \cdot 10^{-2}$ et $4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

L'estimation du débit de la nappe donnée par l'application de la formule de Darcy est 5 l/s.

Le bilan de la nappe calculé après le calage du modèle montre un équilibre entre les flux entrants et ceux sortants avec un écart de la simulation acceptable.

L'exploitation du modèle par le scénario de sécheresse a révélé que le niveau piézométrique de la nappe est sensible à la diminution de la recharge et à l'exploitation

Référence bibliographie

Imen Tibeche (2003), « Etude hydrogéologique de la cuvette de l'aderien de l'oued Tamanrasset ». Diplôme d'ingénieur l'état en géologie appliqué. Université des sciences et de la Technologie Hourri Boumediene. 83P

Hamdi Fatma Zohra (2013) « Etude d'aménagement d'oued Tamanrasset » Diplôme de master (HYDROGEOLOGIE), Université Kasdi Merbah Département des sciences de de la Terre et de L'univers. 60P

A. LAVASSOR(1971). « Etude des ressources en eau de l'oued Tamanrasset direction de l'hydraulique de la wilaya. Bureau hydrogéologique ». 68P

E.N.HYD : « entreprise Nationale des études hydrauliques de wilaya de Tamanrasset ; Il étude de faisabilité d'un barrage souterrain sur l'oued Tamanrasset ». 37P

M BESBES et F DJEDA (1991), « étudié modèle de simulation hydrogéologiques de la nappe de Tamanrasset (Adriane) ». Agence nationale des ressources hydrauliques. 26P

S BOULAH LABEL (2012), « Etude de l'écoulement souterrain dans les gneiss schisteux fissurés du précambrien de la région de Tamanrasset ». 193P

L. TARENGA, S. HADJ-SAID, A. ZEDDOURI, A. BEN EL KHEIR, J-D.TAUPIN, La nappe alluviale une ressource vulnérable en zone aride. 14P

ملخص

تعتبر منطقة تمنراست قطبا مهما في الجنوب الجزائري. تعتمد هذه المنطقة في تمويلها بالمياه على طبقة سطحية مرتبطة بواد تمنراست. تعتبر هذه الطبقة حيوية بالنسبة لمدينة تمنراست لذلك يتوجب علينا دراستها بطريقة معمقة لحمايتها من التلوث البيئي.

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة هذه الطبقة وإنشاء نموذج لمحاكاة جريان المياه الجوفية يمكننا من معرفة خصائصها وتحديد كميات المياه المتوفرة ولمتاحة للاستهلاك. النموذج الذي أعدناه أكد ان المصدر الأساسي لهذه الطبقة هو مياه الوادي. وان تعبئتها عن طريق الامطار يعتبر ضئيل جدا مقارنة مع مياه الوادي.

الكلمات المفتاحية: تمنراست, طبقة سطحية, مياه جوفية, نموذج محاكاة, inféro-flux

Résumé

La région de Tamanrasset est considérée comme un pôle important au sud algérien cette région l'approvisionnement en eau de la cette région et basé sur la nappe d'inféro-flux reliée à l'oued de Tamanrasset. Cette nappe est vitale pour la ville de Tamanrasset pour cette raisons nous devons l'étudier d'une façon approfondie pour la protégé contre la pollution.

L'objectif de ce mémoire est étudier cette nappe et établir un modèle pour simuler l'écoulement des eaux souterrains qui permet de déterminer ces caractéristique et quantifier les ressources en eau disponibles. Le modèle établir à permet conclure que la recharge de cette nappe se fait essentiellement par les apports de l'oued et que la recharge par les précipitations est négligeable.

Mots clés: Tamanrasset, inféro-flux, Les eaux souterraines, Modèle.

Abstract

The region of tamanrasset is considered as an important pole in southern Algeria this region water supply of this region and based on the infusion of the infusion-flow connected to the wadi of tamanrasset. This tablecloth is vital for the city of tamanrasset for this reason we must study it thoroughly for the protected against pollution. The objective of this theis is to study this aquifer and to establish a model to simulate the groundwater resources. The model establishes to allow conclure that the recharge of this table is done maily by the contribution of the wadi and that the recharge by the precipitations is negligible.

Key words: tamanrasset, inféro-flux, waters, modèle.

