



Université d'Oran 2
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Magister
En Sciences de la Terre
Option : hydrogéologie

Effets des barrages d'inféro-flux d'oueds de la région de
Tamanrasset sur l'hydrodynamique des nappes alluviales

Présenté et soutenu publiquement le 14 février 2018 par :
M. HANNI Idriss

Devant le jury composé de :

Mme. ZAIDI-MEBROUK Naima	Professeur	Université d'Oran 2	Présidente
M. HASSANI Moulay Idriss	Professeur	Université d'Oran 2	Rapporteur
M. HAYANE Sidi Mohamed	M.C.A	Université d'Oran 2	Examineur
M. SAFA Aissa	M.C.A	Université d'Oran 2	Examineur

Année 2018

« Effets des barrages d'inféro-flux d'oueds de la région de Tamanrasset sur l'hydrodynamique des nappes alluviales »

Résumé :

Le socle précambrien du massif du Hoggar, est caractérisé par sa faible perméabilité. Les seuls niveaux perméables correspondent aux dépôts quaternaires essentiellement localisés dans les vallées d'oueds, au-dessus de 1000 à 1200 m d'altitude. Ce sont surtout des dépôts alluviaux dont l'épaisseur ne dépasse pas 30 m. Ils reposent sur un socle fissuré passant progressivement à la roche saine. Ces dépôts recèlent des nappes d'inféro-flux alimentées essentiellement par infiltration à partir des crues des oueds. Les nappes d'inféro-flux liées aux oueds de taille réduite sont rarement pérennes et tarissent généralement quelques mois après la période de recharge. Quelques oueds prenant leur source dans le massif de l'Atakor possèdent des ressources en eau en général pérenne, notamment : l'Oued Tamanrasset, l'Oued In Amguel, l'Oued Outoul et l'Oued Tit formant l'Oued Abalessa.

Pour améliorer le fonctionnement de ces nappes alluviales, de nombreux barrages souterrains ont été construits ces dernières décennies dans certains oueds de la région de Tamanrasset. Ces barrages ont induit un impact certain sur la piézométrie des nappes en amont et en aval des ouvrages construits. Dans le but d'évaluer les effets de ces barrages d'inféro-flux sur l'hydrodynamique des nappes alluviales, nous avons ciblé dans le cadre de cette étude, quatre barrages d'inféro-flux établis dans les alluvions de trois principaux oueds de la région : Oued Tamanrasset, Oued Outoul et Oued In Amguel.

Deux volets sont traités dans cette étude. L'un se rapportant à l'étude hydrodynamique des aquifères, en amont et en aval, de chaque barrage. L'étude est basée essentiellement sur les relevés piézométriques réalisés en cours de la présente étude. L'autre volet se rapporte à l'étude hydrochimique au niveau de chaque site d'étude. L'interprétation se base sur l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux de chaque aquifère alluvial, plus particulièrement, en amont et en aval de chaque barrage.

Mots clés : Massif du Hoggar, barrage d'Inféro-flux, nappes alluviales, hydrodynamique, hydrochimie, Tamanrasset.

« Effects of the underground dams of inferior-flow of wadis of the area of Tamanrasset on the hydrodynamics of the alluvial water table »

Abstract:

The Precambrian base of the solid mass of Hoggar, is characterized by its low permeability. The only permeable levels correspond to the quaternary deposits primarily localized in the valleys of wadis, above 1000 to 1200 m of altitude. These are especially overwash phases of which the thickness does not exceed 30 m. They rest on a fissured base passing gradually to solid rock. These deposits conceal water table of inferior-flow fed primarily by infiltration starting from the risings of the wadis. The water table of inferior-flow related to the wadis of reduced size are seldom perennial and generally dry up a few months after the period of refill. Some wadis taking their source in the solid mass of Atakor have water resources in general perennial, in particular: the Tamanrasset Wadi, the In Amguel Wadi, the Outoul Wadi and the Tit Wadi forming the Abalessa Wadi.

To improve operation of these alluvial water table, of many underground dams these last decades in certain wadis of the area of Tamanrasset were built. These underground dams induced an unquestionable impact on piezometry of the water table upstream and downstream from the built works.

With an aim of evaluating the effects of these underground dams of inferior-flow on the hydrodynamics of the alluvial water table, we targeted within the framework of this study, four underground dams of inferior-flow established in the alluvium of three principal wadis of the area: Tamanrasset wadi, Outoul Wadi and In Amguel Wadi.

Two shutters are treated in this study. One referring to the hydrodynamic study aquifers, upstream and downstream, of each underground dam. The study is based primarily on the piezometric statements carried out under the present study. The other shutter refers to the hydrochismic study on the level of each site of study. Interpretation is based on the evolution of the physicochemical characteristics of water of each aquifer alluvial, more particularly, upstream and downstream from each underground dam.

Key words: Solid mass of Hoggar, underground dam of inferior-flow, alluvial water table, hydrodynamics, hydrochimy, Tamanrasset.

« تأثيرات السدود الباطنية لبعض وديان منطقة تمنراست على هيدروديناميكية طبقات مياه الترسبات النهرية »

الملخص:

تتميز قاعدة ما قبل الكمبري للحجر الصخري لمنطقة الهقار بانخفاض نفاذيتها. تتوافق مستويات النفاذية الوحيدة مع ترسبات العصر الجيولوجي الرابع، حيث تتمركز هذه الأخيرة بشكل أساسي في منحدرات الوديان، على ارتفاع 1000 و 1200 م. وهي في الاصل عبارة عن ترسبات الفتات الصخري ذات طبيعة نهرية حيث لا يتجاوز سمكها 30 م. تتوضع على صخر متصدع جزئياً يمر تدريجياً إلى صخرة صلب. تحتوي هذه الرواسب على جيوب مائية تغذى أساساً من مياه فيضانات الوديان التي تنفذ إليها في فترة تساقط الامطار على أعالي جبال الأتاكور. تتمتع غالباً بعض الوديان التي تنبع من أعالي جبال الأتاكور بتخزينها للمياه لفترة طويلة، نذكر منها: واد تمنراست، واد ان أمقل، واد أتول، واد تبت وواد أبلسة...

لتحسين دور الطبقات الحاملة للمياه الجوفية في تخزين كميات معتبرة من مياه الفيضانات، تم في العشرية الأخيرة بناء عدة سدود باطنية في بعض وديان منطقة تمنراست مما ينتج عنه بالتأكيد تأثيرات على حركة المياه الجوفية سواء المتواجدة قبل السد أو بعده . ولمعرفة تأثيرات هذه السدود الباطنية على حركة المياه الجوفية للوديان المتواجدة بها، قمنا بدراسة أربعة منها متواجدة في الترسبات النهرية لثلاثة وديان رئيسية وهي: واد تمنراست، واد أتول وواد ان أمقل. اعتمدنا في هذه الدراسة على منهجين: المنهج الأول عبارة عن دراسة ديناميكية لحركة المياه المتواجدة قبل السد وبعده، حيث بنيت هذه الدراسة على قياس مستويات مياه الطبقات الجوفية، أما المنهج الثاني فيعتمد على دراسة كيمياء المياه والتي تمكننا من معرفة الخصائص الفيزيوكيميائية لمياه كل واد .

الكلمات المفتاحية: الحجر الصخري للهقار، سد باطني، طبقة ترسبات نهرية، هيدروديناميك، هيدروكيمياء، تمنراست.

Remerciements

Avant tout merci à Dieu "**ALLAH**", le tout puissant, le miséricordieux, qui m'a donné le courage et la capacité de réaliser ce modeste travail.

La réalisation de ce manuscrit a été rendue possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner ma profonde gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser ma profonde gratitude à mon encadreur. En acceptant de diriger mon travail, Monsieur **HASSANI Moulay Idriss** s'est exposé à des très nombreuses sollicitations et questions. Je tiens à le remercier pour son soutien scientifique et pour la confiance dont il a fait preuve à mon égard en me laissant la liberté nécessaire à l'accomplissement de mes travaux, tout en y gardant un œil critique et avisé. Avec le Professeur **HASSANI Moulay Idriss**, j'ai pris grâce à son exigence de l'excellence et au goût de vouloir faire de la recherche mon compagnon de vie.

Je remercie les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail :

- mes vifs remerciements vont à **Mme ZAÏDI-MEBROUK Naima**, Professeur à l'université d'Oran 2 pour l'intérêt qu'elle a porté à ce travail en acceptant de présider le jury,
- je suis très reconnaissant envers Messieurs **HAYANE Sidi Mohamed**. et **SAFA Aissa**, Maitres de conférences à l'université d'Oran 2, pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir accepté la tâche d'examineur et de juger ce travail. Je leur adresse mes sincères remerciements pour leur participation au jury.

Je remercie vivement Mr **EL KHEIR Mohamed**, directeur des Ressources en Eau (DRE) de la wilaya de Tamanrasset sur son soutien et toute l'aide logistique qu'il m'a fourni pendant la réalisation de ce travail.

Je remercie chaleureusement Melle **AMROUS Karima**, ingénieur à la direction des Ressources en Eau de la wilaya de Tamanrasset pour l'aide qu'elle m'a apporté relativement aux documents nécessaires à la réalisation de cette étude au cours de sa préparation. Tous les travaux de terrain n'auraient pu être réalisés sans son aide précieuse et son encouragement. Son aide dans la réalisation de ce travail restera indélébile dans ma mémoire. Je remercie également son collègue Melle **Noura** qui a participé à nos sorties de terrain, sans oublier les membres de la direction qui m'ont m'aidés en cela.

Je remercie Mr **EL ANSARI Taha**, directeur de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) d'Adrar sur son accueil favorable à faire les analyses physico-chimiques des eaux au sein du laboratoire d'hydrochimie de son agence. Je remercie également Mr **NASRI Bahous**, le responsable de ce dernier, pour toutes les facilités qu'il m'a apporté au cours de la réalisation des analyses, sans oublier de remercier les autres membres du laboratoire sur les explications qu'ils m'ont donné sur les méthodes d'analyses physico-chimiques.

Je remercie aussi Mr **ADJERAD**, responsable du laboratoire hydrochimique de l'Algérienne des Eaux (ADE) - Unité de Tamanrasset, pour son aide dans l'étalonnage des appareils mesurant les paramètres hydrochimiques in situ, tels que le conductimètre et le pH-mètre.

Je remercie Mr **ZEUDMI-SAHRAOUI Lahouari**, chef de division de la climatologie au niveau de l'Office National de Météorologique (ONM) Régional Sud - Tamanrasset, pour son assistance relative à la disposition des données météorologiques de la région de Tamanrasset.

Je remercie mes **enseignants de la faculté des sciences de la Terre et de l'Univers** de l'Université Oran 2, surtout ceux de l'ex-parcours de DEUA et d'ingéniorat d'Etat en "hydrogéologie" qui m'ont initié et formé à cette spécialité.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères reconnaissances aux différents acteurs ayant pris part directement ou indirectement à l'élaboration de ce travail. Mes pensées vont particulièrement au doctorant **HADJ FATEH Abdelaziz**. **Mr MISSIRENE Omar, mon tant Elbarka, M. Lamin** et à tous mes anciens collègues qui n'ont cessé de m'encourager.

Je remercie aussi infiniment l'ensemble des fellahs installés le long des berges des oueds de la région d'étude pour les facilités à accéder à leurs jardins pour prendre les mesures nécessaires sur puits. Grâce à eux, de plus, j'ai beaucoup appris sur la région. Je remercie plus particulièrement la famille de mon ami **SAINI Lahcen** qui m'a accueilli lors de ma deuxième campagne de terrain à In Amguel.

Enfin, je remercie ma grande famille, mes frères et sœurs ainsi que mes parents pour leur soutien non seulement au cours de la préparation de ce modeste travail mais aussi tout au long de ma vie d'étudiant qui s'achève de la plus belle des manières en grande partie grâce à eux, et sans lesquels je ne serais pas là aujourd'hui. Merci à tous les amis, qui sont toujours là et qu'on ne prend jamais le temps de remercier.

TABLE DES MATIERES

Résumé

Remerciements

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Caractéristiques physiques générales de la région d'étude	
I.1. Situation géographique :.....	4
I.2. Etudes hydrologiques et physiographiques des bassins versant de la région d'étude :.....	6
I.2.1. Contexte hydrologique général des bassins des oueds de la région :.....	6
I.2.1.1. Descriptif des grands bassins versant de l'Oued Tamanrasset et de l'Oued Tekouïat :	6
Grand bassin de l'Oued Tamanrasset :.....	6
Grand bassin versant de l'Oued Tekouïat :	8
I.2.2. Etude morphométrique des bassins versants des secteurs autour des sites étudiés	9
I.2.2.1. Définitions sommaires sur les caractéristiques physiques et géomorphologiques des bassins versants :.....	10
I.2.2.2. Le bassin versant de l'Oued Tamanrasset (site BIF1) :	14
Caractéristiques de forme :.....	14
Réseau hydrographique :	15
Caractéristiques des reliefs :.....	16
I.2.2.3. Le bassin versant de l'Oued Outoul (sites BIF 2 et BIF3) :.....	18
Caractéristiques de forme :.....	18
Réseau hydrographique :	18
Caractéristiques des reliefs :.....	20
I.2.2.4. Le bassin versant de l'Oued In Amguel (site BIF 4) :	22
Caractéristiques de forme :.....	22
Réseau hydrographique :	22
Caractéristiques des reliefs :.....	24
I.3. Etude climatique :.....	26
I.3.1. Température :.....	27
I.3.2. Humidité :	27
I.3.3. Vent :	28
I.3.4. Insolation :	29
I.3.5. Précipitation :.....	29
I.3.5.1. Précipitation moyenne annuelle :.....	29
I.3.5.2. Précipitations moyennes mensuelles :	31

Généralité sur le régime des précipitations dans la région du Hoggar.....	32
I.3.6. Synthèse climatique :.....	33
I.3.6.1. Indice d'aridité :.....	33
I.3.6.2. Le quotient pluviothermique d'Emberger :.....	34
I.3.6.3. Indice pluviothermique annuel de Moral IM :.....	35
I.3.6.4. L'indice Ombrothermique de Gaussen :.....	35
I.4. Contexte géologique :.....	37
I.4.1. Grands traits géologiques du Hoggar :.....	37
I.4.1.1. Le Hoggar oriental :.....	38
I.4.1.2. Le Hoggar central :.....	40
I.4.1.3. La chaîne pharusienne (le Hoggar occidental) :.....	40
I.4.2. Événements tectono-métamorphiques du bouclier touareg.....	40
I.5. Contexte hydrogéologique de la région d'étude.....	42
I.5.1. Caractéristiques générales des aquifères en milieu de socle cristallin :.....	42
I.5.2. Typologie des points d'eau au Hoggar :.....	43
I.5.3. Contexte hydrogéologique général du Hoggar :.....	43
I.5.3.1. Les aquifères du socle Précambrien :.....	44
I.5.3.2. L'aquifère des basaltes d'âge Tertiaire :.....	45
I.5.3.3. Les nappes d'inféro-flux :.....	45

Chapitre II : Caractéristiques géologiques, géophysiques et hydrogéologiques des sites d'étude

II.1. Généralités sur les barrages souterrains captant les nappes d'inféro-flux :.....	47
Procédés de réalisation de l'écran étanche d'un barrage souterrain :.....	48
I.1.1. Historique de réalisation des ouvrages de modification des conditions d'infiltration des eaux superficielles des oueds du Hoggar :.....	49
I.1.2. Données et méthodes d'étude des barrages d'inféro-flux de la région du Hoggar :.....	51
II.2. Contexte hydrogéologiques et caractéristiques des digues des quatre sites étudiés : BIF1, BIF2, BIF3 & BIF4 :.....	52
II.2.1. Secteur de du barrage de l'Oued Tamanrasset - BIF 1 :.....	52
II.2.1.1. Situation géographique :.....	52
II.2.1.2. Descriptif technique du barrage BIF1 :.....	52
II.2.1.3. Caractéristiques géologiques :.....	52
II.2.1.4. Prospection géophysique :.....	53
II.2.1.5. Contexte hydrogéologique :.....	58
II.2.1.5.1 Géométrie de l'aquifère :.....	58
II.2.1.5.2. Caractéristiques hydrodynamiques :.....	60
II.2.2. Secteur du barrage de l'Oued Outoul - BIF2 :.....	60
II.2.2.1. Situation géographique :.....	60

II.2.2.2. Descriptif technique du barrage BIF2 :	61
II.2.2.3. Caractéristiques géologiques :	61
II.2.2.4. Prospection géophysique :	61
II.2.2.5. Contexte hydrogéologique :	62
II.2.2.5.1. Géométrie de l'aquifère :	62
II.2.2.5.2. Caractéristiques hydrodynamiques :	64
II.2.3. Secteur du barrage de l'Oued Outoul/Oued Ihelfene - BIF3 :	64
II.2.3.1. Situation géographique :	64
II.2.3.2. Descriptif technique du barrage BIF3 :	65
II.2.3.3. Caractéristiques géologiques :	65
II.2.3.4. Prospection géophysique :	65
II.2.3.5. Contexte hydrogéologique :	69
II.2.3.5.1. Géométrie de l'aquifère :	69
II.2.3.5.2. Caractéristiques hydrodynamiques :	71
II.2.4. Secteur du barrage d'In Amguel - BIF4 :	71
II.2.4.1. Situation géographique :	71
II.2.4.2. Descriptif technique du barrage BIF4 :	72
II.2.4.3. Caractéristiques géologiques :	72
II.2.4.4. Prospection géophysique :	73
II.2.4.5. Contexte hydrogéologique :	75
II.2.4.5.1. Géométrie de l'aquifère :	75
II.2.4.5.2. Caractéristiques hydrodynamiques :	77
Conclusion :	78

Chapitre III : Etude piézométrique des nappes alluviales autour des sites d'étude

III.1. Données piézométriques exploitées :	80
III.1.1. Données antérieures :	80
III.1.2. Données acquises au cours de cette étude :	80
III.2. Description des points d'eau :	81
III.3. Piézométrie des différentes nappes d'inféro-flux de la zone d'étude :	82
III.3.1. Piézométrie de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset (secteur de BIF1) :	82
III.3.1.1. Inventaire des points d'eau :	82
III.3.1.2. Piézométrie de la nappe du 02 décembre 2015 :	83
III.3.2. Piézométrie de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul - BIF2 :	86
III.3.2.1. Inventaire des points d'eau :	86
III.3.2.2. Piézométrie de décembre 2015 :	87
III.3.3. Piézométrie de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul-Ihelfene : site BIF3 :	88
III.3.3.1. Inventaire des points d'eau :	88

III.3.3.2. Piézométrie de novembre 2004 (avant la construction du barrage) :	88
III.3.3.3. Piézométrie de 09 décembre 2015 :	91
III.3.3.4. Discussion :	93
III.3.4. Piézométrie de la nappe d'inféro-flux de l'Oued In Amguel - BIF4 :	94
III.3.4.1. Inventaire des points d'eau :	94
III.3.4.2. Piézométrie de février 1982 : avant la construction du barrage :	94
III.3.4.3. Piézométrie d'avril 2015 (Draïbet, 2015) :	95
III.3.4.4. Piézométrie de 26 novembre 2015 :	97
III.3.4.5. Discussion :	98
Conclusion :	100

Chapitre IV : Etude hydrochimique des nappes alluviales autour des sites d'étude

IV.1. Modalités de réalisation des campagnes hydrochimiques :	102
IV.2. Caractérisation hydrochimique des eaux de l'ensemble des nappes étudiées :	103
IV.2.1. Caractérisation des points d'eau échantillonnés :	103
IV.2.2. Fiabilité des données acquises :	103
IV.2.3. Etude des paramètres physico-chimiques :	105
IV.2.3.1. Température :	105
IV.2.3.2. La conductivité électrique :	106
IV.2.3.3. pH :	106
IV.2.4. Eléments chimiques :	106
IV.2.4.1. Les teneurs en bicarbonates :	107
IV.2.4.2. Les teneurs en chlorures :	107
IV.2.4.3. Les teneurs en sulfates :	107
IV.2.4.4. Les teneurs en nitrates :	108
IV.2.4.5. Les teneurs en calcium :	108
IV.2.4.6. Les teneurs en magnésium :	108
IV.2.4.7. Les teneurs en sodium :	108
IV.2.4.8. Les teneurs en potassium :	108
IV.3. Caractérisation hydrochimique par secteur étudié :	108
IV.3.1. Nappe d'inféro-flux du secteur de l'Oued Tamanrasset autour de BIF1.	108
IV.3.1.1. Paramètres physico-chimiques :	108
IV.3.1.2. Ions majeurs :	110
IV.3.1.3. Faciès hydrochimique :	112
IV.3.1.4. Eléments indicateurs de la pollution organique :	112
IV.3.2. Nappe d'inféro-flux du secteur de l'Oued Outoul autour du site BIF2 :	114
IV.3.2.1. Paramètres physicochimiques :	114
IV.3.2.2. Ions majeurs :	115

IV.3.2.3. Faciès hydrochimique :	117
IV.3.2.4. Eléments indicateurs de la pollution organique :	117
IV.3.3. Nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul autour du site du BIF3 :	119
IV.3.3.1. Paramètres physicochimiques :	119
IV.3.3.2. Ions majeurs :	119
IV.3.3.3. Faciès hydrochimique :	120
IV.3.3.4. Eléments indicateurs de la pollution organique :	121
IV.3.4. Nappe d'inféro-flux de la nappe de l'Oued In Amguel autour du site du BIF4 :	122
IV.3.4.1. Paramètres physicochimiques :	122
IV.3.4.2. Ions majeurs :	123
IV.3.4.3. Faciès hydrochimique :	124
IV.3.4.4. Eléments indicateurs de la pollution organique :	125
IV.4. Représentation graphique des faciès chimiques des eaux de l'ensemble des nappes étudiées. ..	126
IV.4.1. Diagramme de Schoeller-Berkaloff :	126
IV.4.2. Diagramme de Piper :	127
IV.5. Etude de l'indice de saturation des eaux de l'ensemble des nappes étudiées.	128
IV.6. Analyse en composantes principales des paramètres physico-chimiques :	129
7. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) :	132
Conclusion :	134
Conclusion générale.....	136
Références bibliographiques	
Annexe	

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Caractéristiques physiques générales de la région d'étude

Figure 1. Situation géographique générale de la région d'étude.....	4
Figure 2. Situation générale des sites des barrages d'inféro-flux étudiés (IGN, 1946).....	5
Figure 3. Représentation du chevelu hydrologique du grand bassin versant de l'Oued Tamanrasset (J. Dubief, 1953).	7
Figure 4. Représentation du chevelu hydrologique du grand bassin versant de l'Oued Tekouïat (J. Dubief, 1953)	9
Figure 5. MNT du bassin versant de l'Oued Tamanrasset en amont de Tamanrasset.	14
Figure 6. Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Tamanrasset en amont de Tamanrasset.	15
Figure 7. Graphe représentant nombre et longueur des ordres du chevelu du bassin versant de l'Oued Tamanrasset.	16
Figure 8. Répartition des surfaces en fonction des altitudes du bassin versant de l'Oued Tamanrasset	17
Figure 9. Carte des pentes au niveau bassin versant de l'Oued Tamanrasset	18
Figure 10. MNT du bassin versant de l'Oued Outoul.	19
Figure 11. Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Outoul.	19
Figure 12. Graphe représentant nombre et longueur des ordres du chevelu du bassin versant de l'Oued Outoul.	20
Figure 13. Répartition des surfaces en fonction des altitudes du bassin versant de l'Oued Outoul.....	21
Figure 14. Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Outoul.....	22
Figure 15. MNT du bassin versant de l'Oued In Amguel.	23
Figure 16. Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued In Amguel.	23
Figure 17. Graphe représentant le nombre et longueur des ordres en fonction de son ordre.....	24
Figure 18. Répartition des surfaces en fonction des altitudes du bassin versant de l'Oued In Amguel.	25
Figure 19. Carte des pentes du bassin versant de l'Oued In Amguel.....	26
Figure 20. : Fluctuation des températures moyennes mensuelle des stations de Tamanrasset et de l'Assekrem.	27
Figure 21. Valeurs de l'humidité relative mensuelle relevée à la station de Tamanrasset (1980-2015).	28
Figure 22. Moyenne mensuelle des vitesses du vent en (m/s).	28
Figure 23. Durée mensuelle de l'insolation totale.....	29
Figure 24. Précipitations moyennes annuelles.	30
Figure 25. Précipitations moyennes mensuelles.	32
Figure 25. Détermination du régime climatique de deux stations à partir du quotient pluviothermique d'Emberger.	35
Figure 27. Diagramme ombrothermique de Gaussen des appliqués aux stations de Tamanrasset et de l'Assekrem.	36
Figure 28. Carte des principaux domaines structuraux du Bouclier Touareg (d'après Caby et al., 1981, modifié par Boullier et al., 1991).	38

Figure 29. Carte des 23 blocs [terrane] du bouclier Touareg (d'après Black et al., 1994)..	39
Figure 30. Schéma conceptuel de formation d'altération de roche de socle (Wyns, 1999).	42
Figure 31. Carte hydrogéologique du Hoggar (ANRH, 1990).	44

Chapitre II : Caractéristiques géologiques, géophysiques et hydrogéologiques des sites d'étude

Figure 32. Coupe schématique d'un barrage d'inféro-flux (Irura 2006, in J. Barkhordari, 2015).	47
Figure 33 : vues générales du premier barrage d'inféro-flux d'Algérie : le barrage de Tadjemout sur l'Oued Mzi (W. de Laghouat).	49
Figure 34. Situation géographique du secteur du barrage de l'Oued Tamanrasset (BIF1).	52
Figure 35. Carte géologique de la région de Tamanrasset (extrait de la carte géologique du massif du Hoggar, ORGM 2004).	53
Figure 36. Localisation de différentes prospections géophysiques dans sur le site BIF 1.	55
Figure 37. Coupe géoélectrique correspondante au site A (ENHYD, 1990).	56
Figure 38. Coupe géoélectrique correspondante au site B (ENHYD, 1990).	57
Figure 39. Coupe géoélectrique correspondante au site C (DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE, 2001).	57
Figure 40. Coupes des forages de l'aquifère alluvial de l'Oued Tamanrasset (SM3, F10, F12 et F13).	59
Figure 41. Situation géographique des secteurs BIF2 et BIF3 (Oued Outoul).	60
Figure 42. Coupe géoélectrique correspondante au site BIF2 sur Oued Outoul (ENHYD, 1991).	62
Figure 44. Profil en long de la cuvette de l'Oued Outoul _autour BIF2 (ENHYD,1991).	63
Figure 45. Profil en long indiquant la variation d'épaisseur des alluvions quaternaires en amont du la digue BIF2_ Oued Outoul (d'après ENHYD, 1991).	63
Figure 46. Affleurement du substratum granitique dans le lit de l'Oued Outoul (site BIF2).	63
Figure 47. Profil hydrogéologique de l'inféro-flux de l'Oued Outoul au niveau du site BIF2.	64
Figure 48. Localisation de différentes prospections géophysiques (D'après ENHYD, 2005).	66
Figure 49. Coupes géoélectrique A, B et C (ENHYD, 2005).	66
Figure 50. Coupe transversale des sondages électriques G1, H1, I2, L1 et M2 (ENHYD, 2005).	67
Figure 51. Coupes géoélectriques H, T et R (ENHYD, 2005).	68
Figure 52. Profil sismique 01 orientation SW_NE.	69
Figure 53. Profil sismique 02 orientation SW_NE.	69
Figure 54. Carte en courbes isopaches des alluvions du Quaternaire (inféro-flux) de l'Oued Outoul au niveau du secteur de BIF3.	70
Figure 55. Coupe hydrogéologique de l'aquifère alluvial de la partie aval de l'Oued Outoul _site BIF3 (ENHYD,2005).	70
Figure 57. Situation géographique du secteur 3 (Oued In Amguel).	72
Figure 58. Carte géologique de la région d'In Amguel (Extrait de la carte géologique du massif du Hoggar, ORGM 2004)	73
Figure 59. Coupe géoélectrique n° 2 correspondante à l'axe du barrage BIF4 (ENHYD, 1989).	74

Figure 60. Profil hydrogéologique des niveaux de l'inféro-flux d'Oued In Amguel (ENHYD, 1991 in Draibat, 2015).	75
Figure 61. Carte du substratum de l'aquifère alluvial autour du site BIF4.	76
Figure 62. Carte en courbes isopaches au niveaux d'inféro-flux de l'Oued In Amguel en amont de BIF4.	77

Chapitre III : Etude piézométrique des nappes alluviales autour des sites d'étude

Figure 63. Puits a : équipé par deux pompes, b : équipé par une seule pompe.	81
Figure 64. Exemples de puits fermés par bouchon.	81
Figure 65. Inventaire des points d'eau de la nappe inféro-flux de l'Oued Tamanrasset.	82
Figure 66. Carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique de la nappe inféro-flux de l'Oued Tamanrasset (02 décembre 2015).	83
Figure 67. Carte des courbes isopièzes de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset (02 décembre 2015).	84
Figure 68. Inventaire des points d'eau de la nappe de l'Oued Outoul autour du site de BIF2.	86
Figure 69. Carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique de la nappe de l'Oued Outoul autour du site BIF2 (21 -22 décembre 2015).	87
Figure 70. Carte des courbes isopièzes de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul (BIF2) (21-22 décembre 2015).	88
Figure 70.a. Carte des courbes isopièzes de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul en amont du barrage d'inféro-flux BIF2 (21-22 décembre 2015).	89
Figure 71. Inventaire des points d'eau de la nappe autour du site BIF3.	90
Figure 72. Carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique de la nappe inféro-flux de l'Oued Outoul / site BIF3 ; novembre 2004 (données ENHYD).	90
Figure 73. Carte des courbes isopièzes de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul / site BIF3; novembre 2004 (données ENHYD).	91
Figure 74. Carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique de la nappe d'inféro-flux du secteur BIF3 (09 décembre 2015).	92
Figure 75. Carte des courbes isopièzes de la nappe du secteur BIF3 (09 décembre 2015).	92
Figure 76. Variation de la surface piézométrique de la nappe d'inféro-flux autour du site du BIF3, avant et après la mise en place du barrage (piézométries de novembre 2004 et de 09 décembre 2015).	93
Figure 77. Inventaire des points d'eau de l'inféro-flux de l'Oued In Amguel - site BIF4.	94
Figure 78. Carte des courbes isopièzes de la nappe d'inféro-flux de l'Oued In Amguel (DRE Tamanrasset, février 1982).	95
Figure 79. Carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique de la nappe d'inféro-flux de l'Oued In Amguel (Draibat, avril 2015)	96
Figure 80. Carte des courbes isopièzes de la nappe d'inféro-flux de l'Oued In Amguel (Draibat, avril 2015)	96

Chapitre IV : Etude hydrochimique des nappes alluviales autour des sites d'étude

Figure 81. Carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique de la nappe d'inféro-flux de l'Oued In Amguel (26 novembre 2015).....	97
Figure 82. Carte des courbes isopièzes de la nappe d'inféro-flux de l'Oued In Amguel (26 novembre, 2015).	98
Figure 83. Variation de la surface piézométrique de la nappe d'inféro-flux de l'oued In Amguel, avant et après la mise en place du barrage (piézométries de février 1982 et d'avril 2015).	99
Figure 85. Corrélation de la carte en courbes isopièzes - piézométrie de novembre 2015- avec celle en courbes isobathes de l'aquifère alluvial de l'Oued In Amguel.	99
Figure 87. Corrélation entre les valeurs de la conductivité mesurée in situ et la somme des ions analysés en laboratoire.	105
Figure 88. Histogramme de la conductivité électrique (CE) des eaux.	106
Figure 89. Histogramme des teneurs en bicarbonates.	107
Figure 90. Répartition spatiale de la conductivité des eaux de la nappe de l'Oued Tamanrasset.....	109
Figure 91. Répartition spatiale des teneurs en éléments majeurs des eaux de la nappe de l'Oued Tamanrasset autour du site BIF1 (14-15 mai 2016).....	111
Figure 92. Carte de la répartition des teneurs des éléments indicateurs de la pollution organique des eaux de la nappe de l'Oued Tamanrasset autour du site du BIF1 (14-15 mai 2016).	113
Figure 93. Répartition spatiale de la conductivité des eaux de la nappe de l'Oued Outoul.....	115
Figure 94. Répartition spatiale des teneurs en éléments majeurs des eaux de la nappe de l'Oued Outoul autour du site du BIF2 (12-13 mai 2016).....	116
Figure 95. Carte de la répartition des teneurs des éléments indicateurs de la pollution organique des eaux de la nappe de l'Oued Outoul autour du site du BIF2 (12-13 mai, 2016).	118
Figure 96. Répartition spatiale de la conductivité des eaux de la nappe de l'Oued Outoul autour du site du BIF3 (12 mai 2016).....	119
Figure 97. Répartition spatiale des teneurs en éléments majeurs des eaux la nappe de l'Oued Outoul autour du site du BIF3 (12 mai, 2016).	120
Figure 98. Carte de la répartition des teneurs des éléments indicateurs de la pollution organique des eaux la nappe de l'Oued Outoul autour du site du BIF3 (12 mai, 2016).	122
Figure 99. Répartition spatiale de la conductivité des eaux la nappe de l'Oued In Amguel autour du site du BIF4 (04 juin 2016).	123
Figure 100. Répartition spatiale des teneurs des éléments majeurs des eaux la nappe de l'Oued In Amguel autour du site du BIF4 (04 juin 2016).	124
Figure 101. Carte de la répartition des teneurs en éléments indicateurs de la pollution organique des eaux la nappe de l'Oued In Amguel autour du site du BIF4 (04 juin 2016).	125
Figure 102. Représentation sur diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux échantillonnées aux niveau des quatre secteurs étudiés.....	126
Figure 103. Représentation des eaux échantillonnées sur le diagramme de Piper.....	127
Figure 104. Indice de saturation (IS) des échantillons d'eau à la calcite et à la dolomite.	128
Figure 105. Projection des variables sur les plans factoriels F1 x F2 & F2 x F3.....	130
Figure 106. Projection des individus sur les plans factoriels F1 x F2.....	131

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Caractéristiques physiques générales de la région d'étude

Tableau. I.1 : Classification des reliefs à partir de l'indice de pente global selon O.R.S.T.O.M.	13
Tableau. I.2 : Classification des reliefs à partir de la dénivelée spécifique selon O.R.S.T.O.M.	14
Tableau. I.3 : Nombre et longueur des ordres de talwegs du bassin versant de l'Oued Tamanrasset....	15
Tableau. I.4 : Répartition des surfaces du bassin de l'Oued Tamanrasset en fonction des altitudes.	17
Tableau. I.5 : Nombre et longueur des ordres du bassin versant de l'Oued Outoul.....	20
Tableau. I.6 : Répartition des surfaces du bassin de l'Oued Outoul en fonction des altitudes.	21
Tableau. I.7 : Nombre et longueur des ordres des talwegs du bassin versant de l'Oued In Amguel.	24
Tableau. I.8 : Répartition des surfaces du bassin de l'Oued In Amguel en fonction des altitudes.	25
Tableau. I.9 : Caractéristiques géographiques et périodes d'observation <i>des stations climatologiques</i>	26
Tableau. I.10 : Températures moyennes mensuelles des stations de Tamanrasset et de l'Assekrem ...	27
Tableau. 11 : Humidité relative moyenne (en%).	27
Tableau. I.12 : Vitesses Moyennes mensuelles des vents (en m/s).....	28
Tableau. I.13 : Durée d'insolation moyenne mensuelle.	29
Tableau. I.14 : Précipitations moyennes annuelles (1980/2015) (données O.N.M).	30
Tableau. I.15 : Précipitations moyennes mensuelles.....	31
Tableau. I.16 : Exemples de quelques fortes intensités de la pluie à Tamanrasset (J. Dubief, 1953)....	33
Tableau. I.17 : Valeurs de l'indice d'aridité annuel de E. De Martonne.....	33
Tableau. I.18 : Valeurs de l'indice d'aridité mensuel (I_m) de E. De Martonne.....	34
Tableau. I.19 : Valeurs du quotient pluviothermique d'Emberger.	34

Chapitre II : Caractéristiques géologiques, géophysiques et hydrogéologiques des sites d'étude

Tableau. II.1 : Résultats de la prospection sismique effectuée sur le site C (DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE).....	58
Tableau. II.2 : Perméabilités relevés au niveau de l'aquifère alluvial autour de BIF1 (Oued Tamanrasset) (ENHYD, 1990).	60
Tableau II.3 : Perméabilités relevés au niveau de l'aquifère alluvial autour de BIF2 (Oued Outoul) (d'après ENHYD, 1991).	64
Tableau II.4 : Résultats de la prospection sismique effectuée sur le secteur BIF3 (ENHYD,2005).	68
Tableau II.5 : Perméabilités relevés au niveau de l'aquifère alluvial autour de BIF3 (Oued Outoul) (d'après ENHYD, 1990).	71
Tableau. II.5 : Résultats de la prospection sismique effectuée sur le site BIF4.	75
Tableau. II.6 : Perméabilités de l'aquifère alluvial de l'Oued In Amguel (ENHYD, 1989).....	77

Chapitre IV : Etude hydrochimique des nappes alluviales autour des sites d'étude

Tableau IV.1 : répartition des échantillons prélevés selon les secteurs d'étude.	102
Tableau. IV.2 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux des différentes nappes alluviales (mg/l), (e en %).	104
Tableau. IV.3 : Valeurs statistiques des paramètres physicochimiques analysés.	105
Tableau. IV.4 : Résultats statistiques des ions des eaux échantillonnées (mg/l).....	107
Tableau. IV.5 : Faciès hydrochimique et formules caractéristiques des eaux (site BIF1).	112
Tableau. IV.6 : Faciès hydrochimique et formules caractéristiques des eaux de la nappe de l'Oued Outoul autour du site BIF2.....	117
Tableau. IV.7 : Faciès hydrochimique et formules caractéristiques des eaux autour du site BIF3.....	121
Tableau. IV.8 : Faciès hydrochimique et formules caractéristiques des eaux autour du site BIF4.....	124
Tableau. IV.9 : Matrice de corrélation de 10 paramètres pour les eaux analysées.	129
Tableau. IV.10 : Répartition des échantillons selon leurs classes (méthode CAH).....	132

Introduction générale

Introduction générale :

Dans certaines régions du monde et surtout dans les régions arides, l'eau souterraine peut constituer l'unique source d'approvisionnement tant en eau potable destinées à l'alimentation humaine que pour les besoins agricoles.

Dans la région de Tamanrasset, l'eau souterraine constitue une ressource rare. En effet, La majeure partie de cette région est occupé essentiellement par les terrains du socle cristallin et cristallophyllien, milieu par essence complexe et peu aquifère. Les réserves en eau liées au socle ancien sont faibles et essentiellement présentes dans les zones fracturées. L'alimentation en eau potable ne peut en aucun cas être assurée uniquement à partir de ces ressources et il est nécessaire d'avoir recours à deux autres types de réserves : soient les réserves qui sont constituées par les retenues de surface établies sur le réseau hydrographique, soient les réserves contenues dans les formations meubles superficielles (sub-surface).

Bien que la région de Tamanrasset fasse partie du domaine aride à hyperaride, les épisodes de précipitation peuvent générer des crues d'oueds, d'importance non négligeable. Ces eaux superficielles alimenteront tout le long de leur parcours le fonds alluvial des vallées concernées. Au sein de ces formations alluviales, généralement d'extension latérale limitée et de faible épaisseur, se constitueront des nappes phréatiques appelées d'"inféro-flux".

Au cours des dernières décennies, la surexploitation des eaux souterraines, liée à l'accroissement progressif des besoins en eau a accentué la tendance à la baisse des niveaux des nappes alluviales. Il s'avère donc nécessaire de mettre en œuvre, parallèlement à l'exploitation de ces nappes, des études exhaustives pour la reconnaissance des ressources en eau en vue d'une gestion durable. A cet effet, depuis le début des années 1970, de nombreux travaux concernant essentiellement la modification des conditions d'infiltration de l'eau transitant par les oueds pendant les périodes des crues ont été proposés.

En vue d'augmenter les réserves en eau et diminuer les débits de perte à l'amont, et dans des conditions géologiques favorables, plusieurs barrages souterrains ont été projetés dans les lits de certains oueds de la région de Tamanrasset. L'exploitation optimale de ces hydro-systèmes passe au préalable par une meilleure connaissance de leurs caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques.

La présente étude intervient dans cet objectif d'étudier les effets de quatre barrages souterrains (inféro-flux) sur la modification de l'hydrodynamique des nappes alluviales correspondantes ainsi que de leurs caractéristiques hydrochimiques. Cette thématique a été suggérée à l'étude par la Direction des Ressources en Eau de la wilaya de Tamanrasset. Nous avons, à cet effet, basé notre étude sur deux approches :

- une approche hydrodynamique basée sur des données géotechniques et piézométriques antérieures, confortées par des campagnes piézométriques réalisées au cours de la présente étude,
- une approche hydrochimique étudiant les caractéristiques qualitatives de l'eau autour des sites, en amont et en aval , des barrages étudiés. Cette étude se basant sur les données recueillies au cours de différentes campagnes de prélèvement d'eau réalisées au cours de la réalisation de ce travail.

Le plan de rédaction de ce travail est subdivisé en quatre grands chapitres :

Introduction générale

- le premier chapitre est relatif à la connaissance générale des caractéristiques et contextes géographiques, hydrographiques, climatologiques, géologiques et hydrogéologiques de la région d'étude,
- le deuxième chapitre détaille les spécifications techniques de chaque barrage d'inféro-flux ainsi que les caractéristiques géologiques, géophysiques et hydrogéologiques autour dudit barrage,
- le troisième chapitre aborde les caractéristiques hydrodynamiques de chaque nappe d'inféro-flux en amont et en aval des barrages,
- le quatrième chapitre présente les caractéristiques hydrochimiques au niveau de chaque site d'étude, caractéristiques basées sur les résultats des campagnes de mesure effectuées dans le cadre de cette étude.

Une synthèse générale est présentée en fin de ce travail.

Chapitre I :

Caractéristiques physiques générales de la région d'étude

I.1. Situation géographique :

Les quatre secteurs objet de notre étude, sont situés sur un rayon d'une vingtaine de kilomètres au Nord et au Nord-ouest de la ville de Tamanrasset. Cette dernière agglomération est située à environ 2000 km au Sud de la capitale d'Alger. Elle constitue le chef-lieu d'une wilaya s'étendant en grande partie sur le socle cristallin du massif du Hoggar (Ahaggar) qui s'étale sur une superficie de près de 500 000 km².

La zone d'étude globale est située dans la partie médiane de ce socle, limitée à l'Ouest par l'accident 4°50' et à l'Est par l'accident 8°30' (Fig. 1).

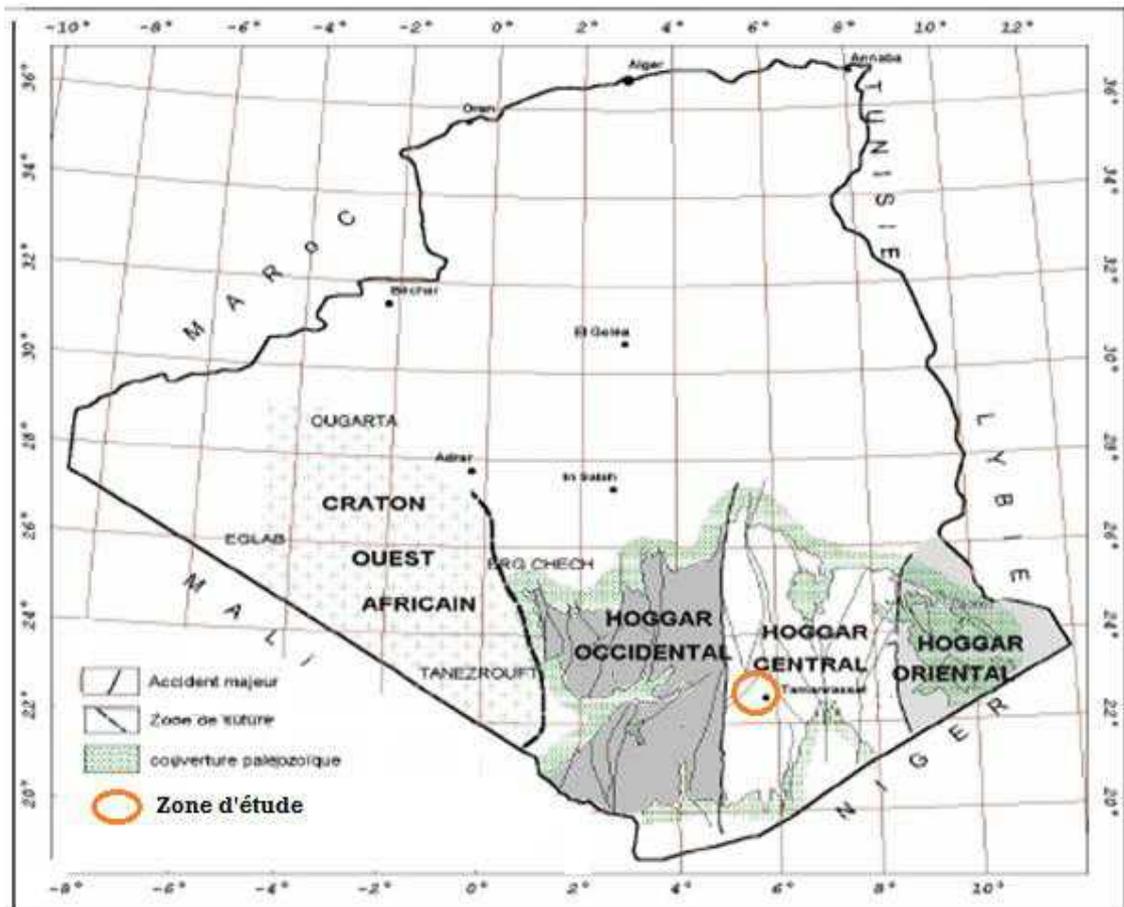


Figure 1. Situation géographique générale de la région d'étude

Les quatre sites étudiés occupent les portions des trois oueds de la région, drainant le flanc Sud-ouest du massif de l'Atakor en direction du Tanezrouft : l'Oued Tamanrasset, l'Oued Outoul et l'Oued In Amguel (Fig. 2, 3 & 4).

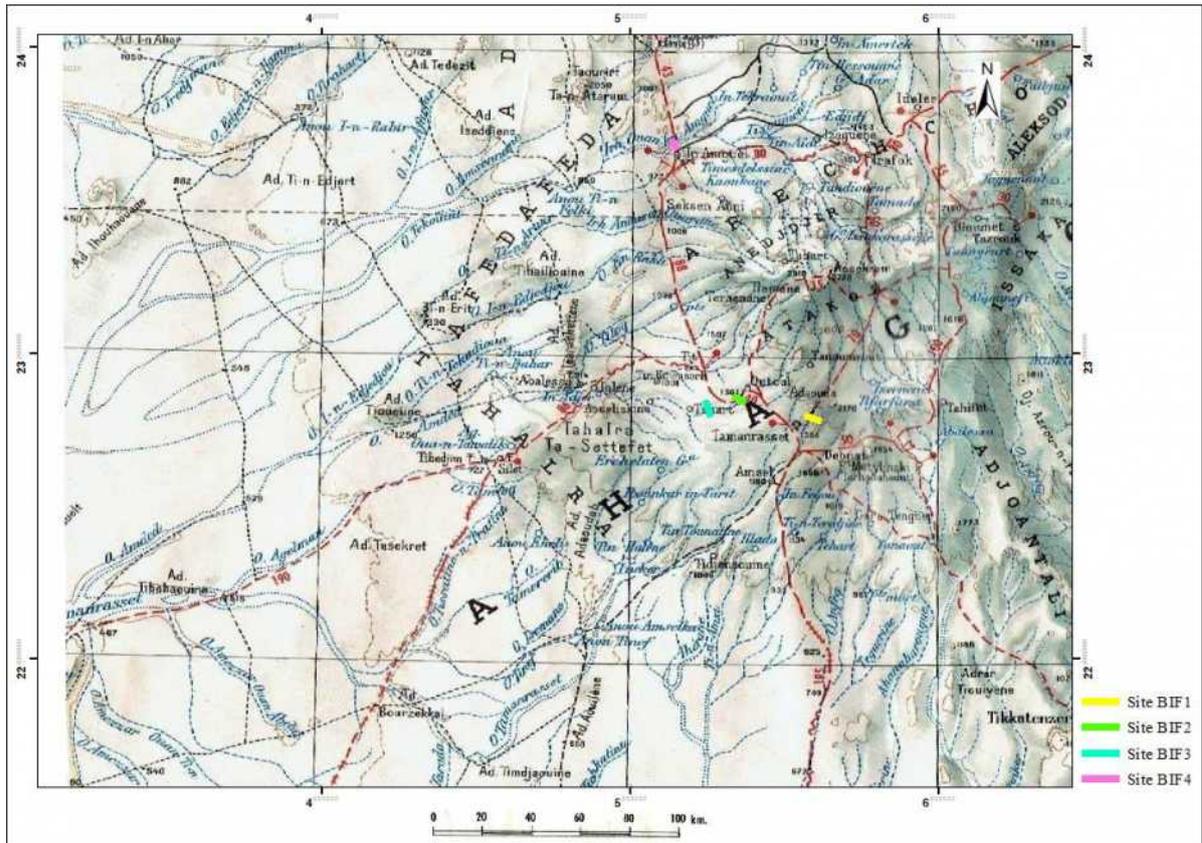


Figure 2. Situation générale des sites des barrages d'inféro-flux étudiés (IGN, 1946).

La position géographique de ces sites sera précisée en suite de texte au cours de l'étude détaillée relative à chaque site : chap. I & chap II.

I.2. Etudes hydrologiques et physiographiques des bassins versant de la région d'étude :

Introduction :

L'hydrologie fluviale dans les déserts, en dehors des rivières équipées et des grands fleuves, reste encore assez mal connue. Certes, des observations qualitatives et parfois des mesures très précises ou expérimentales (Braquaval, 1957 ; Schick, 1970 ; Savat, 1982) ont été effectuées, mais toujours isolément. A travers les études de quelques auteurs (J. Dubief, 1953; Joly, 1968 et autres), les traits essentiels de fonctionnement hydrologiques de ces hydrosystèmes peuvent se dégager. Dans la zone aride proprement dite, c'est l'irrégularité qui est la règle ; le ruissellement est toujours intermittent et quelque fois éphémère. Dans le domaine hyperaride, il est toujours éphémère et même aléatoire. Les seuls châteaux d'eau quelque peu importants sont les montagnes où les reliefs assez étendus peuvent provoquer des pluies de convection et des orages, là où les pentes sont fortes et où le tracé bien marqué des écoulements antérieurs facilitent la concentration des eaux. Le cours d'eau par excellence des milieux arides est l'oued, essentiellement épisodique. Dans l'oued, l'écoulement se confond avec la crue.

I.2.1. Contexte hydrologique général des bassins des oueds de la région :

La région de Tamanrasset apparaît dans un domaine aride à hyperaride (voir I.3) où les crues constituent l'essentiel des ressources en eau alimentant les inféro-flux. Ces crues sont lointaines, elles ont pour origine les précipitations tombées sur le massif de l'Atakor, plus ou moins longtemps avant l'arrivée du flot.

Concernant nos sites d'étude, trois d'entre eux sont situés dans le grand bassin versant de l'Oued Tamanrasset (Fig. 3). Le **Barrage Inféro-Flux** de l'Oued Tamanrasset, **BIF1**, est implanté en amont de la ville éponyme, sur le cours principal amont de cet oued.

Les barrages **BIF2** et **BIF3** se situent sur l'Oued Outoul, affluent de l'Oued Amded. Plus en aval, ce dernier rejoint, en rive droite, l'Oued Tamanrasset.

Quant au barrage implanté sur l'Oued In Amguel : **BIF4**, il est situé dans la partie amont du bassin versant de l'Oued Tekouïat (fig. 4). Ce dernier est mitoyen au N-NW du grand bassin de l'Oued Tamanrasset.

I.2.1.1. Descriptif des grands bassins versant de l'Oued Tamanrasset et de l'Oued Tekouïat :

Les bassins hydrologiques de l'Oued Tamanrasset et celui de l'Oued Tekouïat, drainent le versant Sud-Ouest de l'Ahaggar. Ils s'intègrent à l'immense bassin du Tanezrouft qui regroupe les versants des grands oueds qui se perdent vers l'Ouest dans les regs du Tanezrouft-n-Ahnet. Leurs caractéristiques hydrographiques ont été décrites par J. Dubief en 1953.

a. Grand bassin de l'Oued Tamanrasset :

Il s'étend sur 42 000 km², dont 20 000 km² rapportés au seul bassin de l'Oued Amded, affluent essentiel de ce grand bassin. L'artère maîtresse de l'Oued Tamanrasset prend son

origine sous le nom de Taremmout sur la face sud de la chaîne de l'Atakor, dans la région de l'Assekrem, vers 2 700 m d'altitude (Fig. 3).

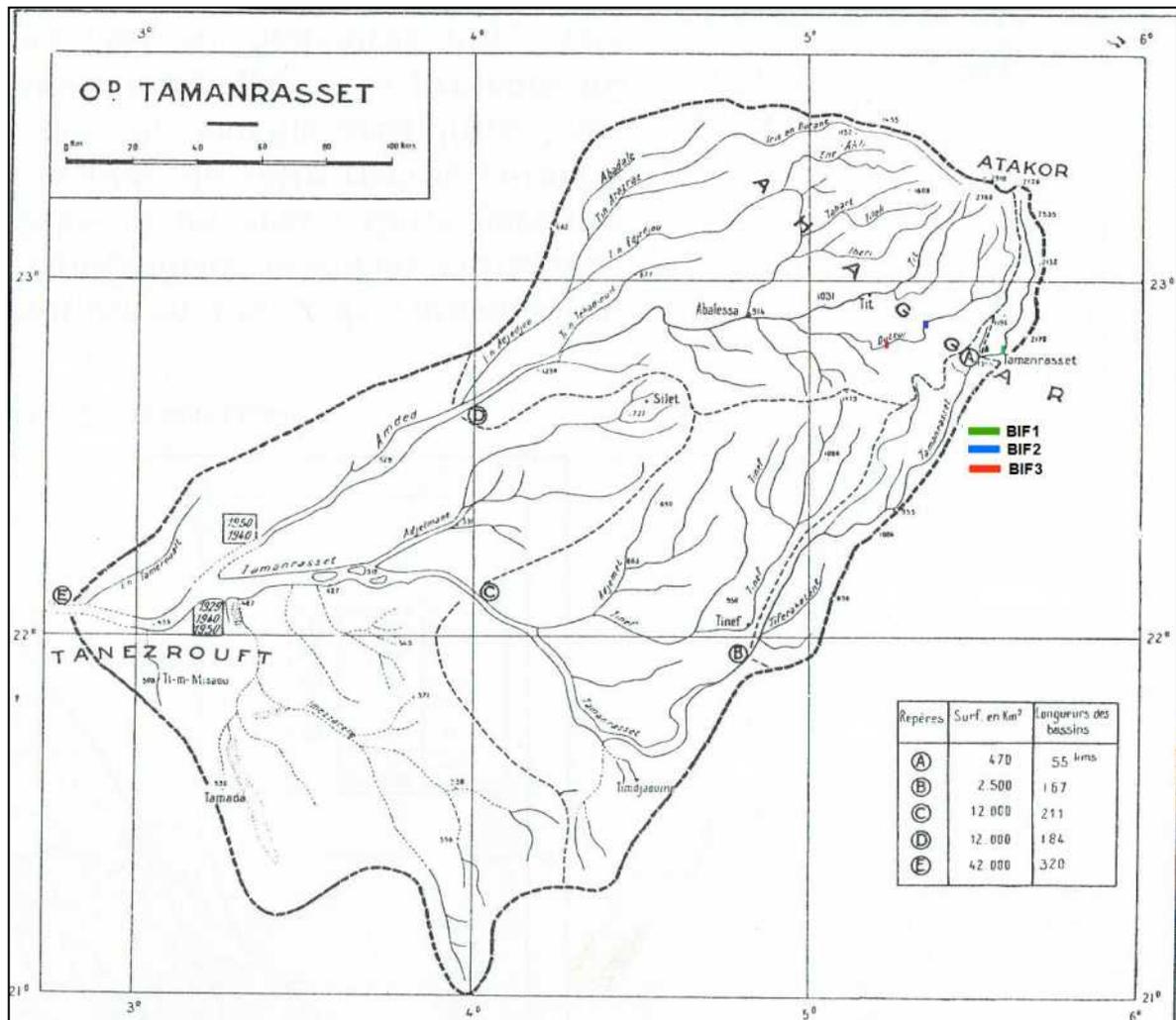


Figure 3. Représentation du chevelu hydrologique du grand bassin versant de l'Oued Tamanrasset (J. Dubief, 1953).

Le grand bassin de l'Oued Tamanrasset peut être morcelé en trois tronçons assez caractéristiques :

- Un premier tronçon montagneux de 200 km de long, comprenant les vallées supérieures et moyennes. Son aspect est dû à la structure géologique de cette région, caractérisé par : la direction subméridienne des plissements cristallins, l'importance des coulées volcaniques en haute montagne et la présence de l'important massif volcanique du Tamerzest tan Selbourak qui borde la vallée moyenne de l'oued. Ce dernier ne reçoit pratiquement pas d'affluents de sa rive gauche et fort peu de sa droite.
- Un second tronçon de plaine encore actif de 200 km environ de long, situé à l'extrémité orientale du Tanezrouft. La vallée s'élargie et n'est plus limitée que par des berges peu marquées et parfois occupée par de petits amas dunaires. Après une déviation assez brusque l'oued s'écoule centaine de km vers le NNW puis se dirige

vers l'Ouest. Dans cette section il reçoit sur sa droite trois grands affluents encore parfois actifs dont l'Oued Amded qui provient du massif central. Sur sa rive gauche les affluents sont très dégradés.

- Le troisième tronçon, entièrement dans le Tanezrouft, est un tronçon terminal de plaine entièrement fossile et assez mal connu. Un tracé proposé par J. Dubief (1953) donnerait à l'Oued Tamanrasset une longueur totale de près de 800 km, dont seulement 400 km sont susceptibles d'être actifs du point de vue hydrographique.

La liste des crues de l'Oued Tamanrasset à Tamanrasset (à 60 km de sa source), dressée par J. Dubief, pour la période 1900-1951 (détaillée en annexe), donne des informations importantes sur l'importance et le nombre des crues de cet oued.

La lecture de cette liste montre que le nombre de mois de crue à Tamanrasset est en moyenne légèrement supérieur à un par an. Certaines années, il peut être observé quatre, et dans d'autres, ils peuvent totalement manquer. Les périodes sans crues peuvent d'ailleurs dépasser un an et atteindre 37 mois. Par ailleurs, plusieurs crues peuvent se produire au cours d'un même mois, cela a été le cas du mois d'août 1932 et 1950 où un nombre de six crues a été compté pendant un même mois.

Souvent deux crues successives traversent l'Oued Tamanrasset. La première est généralement faible, suit immédiatement la chute de pluie locale. La seconde beaucoup plus importante, arrive quelques heures plus tard qui est évidemment en relation avec les précipitations tombant en haute montagne (J. Dubief, 1953). Les crues toujours à hauteur de Tamanrasset sont en général de durée assez courte, un ou deux jours, parfois quelques heures seulement. Ce n'est exceptionnellement qu'elles atteignent 3 et 4 jours. Au bout de ce temps, l'oued actif n'est plus réduit qu'à un mince ruisseau sans importance.

La variation annuelle des mois de crue de l'Oued Tamanrasset à Tamanrasset croit régulièrement d'un minimum de fin d'hiver à un maximum d'été pour s'annuler à nouveau en fin d'automne. Un court maximum relatif apparaît en janvier. Cette variation annuelle se rapproche beaucoup du type tropical (J. Dubief, 1953).

b. Grand bassin versant de l'Oued Tekouïat :

Le bassin de l'Oued Tekouïat s'étend sur 24 000 km² dont 10 000 km² seraient encore en activité (Fig. 4). Il prend sa source sur le versant nord du massif volcanique de l'Atakor-n-Ahaggar sous les noms de l'Oued In Tekadène, puis Issakarassène. Il descend rapidement, de 1500 m en 80 km, les pentes septentrionales de ce massif pour gagner la plaine d'In Amguel (In Amedjel en Tamachek). Là, il s'incurve vers l'WSW et, après 200 km de parcours et une dénivelée totale de 1900 m, il s'étale dans un véritable delta intérieur, de 160 km de long environ, qui marque probablement un de ses anciens niveaux de base.

L'Oued Tekouïat draine par nombreux affluents, la moitié occidentale de la face septentrionale de l'Ahaggar (oueds In Amguel et Tekch'oulli) ainsi que les pentes SW du Tefedest.

Du fait de l'absence d'observations continues sur les crues de l'Oued Tekouïat, les seuls renseignements montrent que ses écoulements exceptionnels observés à In Amguel, c'est-à-dire à une centaine de kilomètres de l'origine, ne se produisent pas toujours en même temps que ceux de l'Oued Tamanrasset. Leur fréquence annuelle moyenne doit être voisine de celle

de ce dernier avec peut-être une fréquence en août un peu plus faible. Les crues peuvent être importantes mais atteignent rarement le delta inférieur. Leurs parcours maxima avoisineraient les 200 km (J. Dubief, 1953).

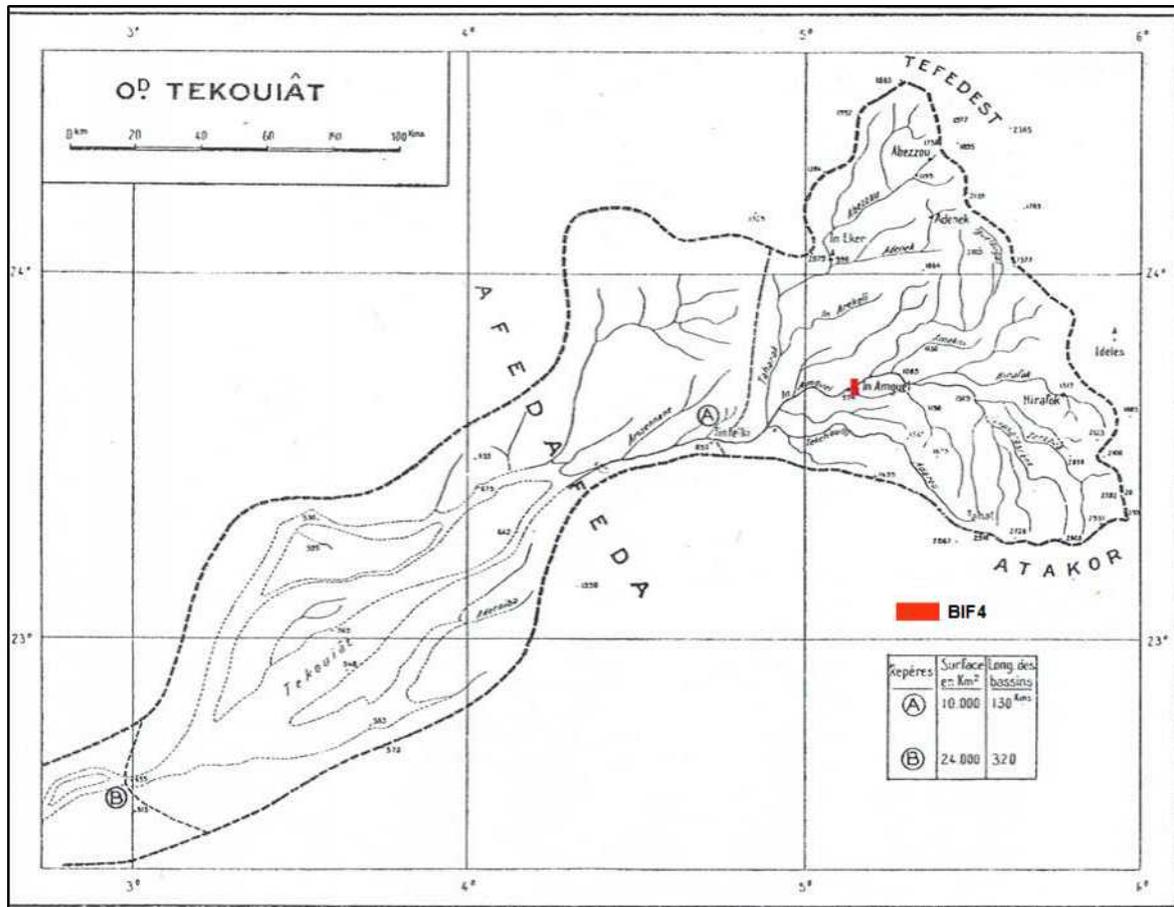


Figure 4. Représentation du chevelu hydrologique du grand bassin versant de l'Oued Tekouiat (J. Dubief, 1953)

I.2.2. Etude morphométrique des bassins versants des secteurs autour des sites étudiés

La réponse hydrologique d'un bassin versant dépend à la fois des conditions climatiques qui régissent les apports (par les précipitations) et des caractéristiques morphologiques qui influencent fortement le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage.

Les principales caractéristiques dont dépend la réponse hydrologique d'un bassin et qui font l'objet de l'analyse physiographique sont d'une part, les caractéristiques morphométriques (surface, forme, élévation, pente) et d'autre part, les caractéristiques liées à l'organisation du réseau hydrographique. Enfin, à ces facteurs s'ajoutent encore d'autres facteurs tels que la nature géologique des terrains centrés sur le bassin, le type de couvert végétal, la nature du sol, les surfaces d'eau libres, etc.

Ces facteurs s'estiment à partir de cartes topographiques, de photographies aériennes ou en recourant à des techniques digitales et à des modèles numériques de terrain (MNT) et d'altitude (MNA). Grâce au développement de l'informatique, cette dernière technique a permis l'apparition de la cartographie numérique et d'un nouveau moyen de représenter la Terre. L'information spatialisée du MNT aide à modéliser, analyser et représenter des phénomènes liés à la surface topographique ; c'est ainsi qu'il est utilisé depuis les années

cinquante dans le domaine des géosciences (Miller & Laflamme 1958). Bien des applications utilisent des procédures automatiques pour caractériser la surface topographique par extraction de paramètres géomorphologiques à partir de MNT.

Pour étudier les différentes caractéristiques physiographiques des bassins versants de notre région d'étude, on va s'appuyer sur l'apport des applications de Système d'Information Géographique (SIG) dans le domaine de l'hydrologie. En se basant sur l'utilisation de données spatiales, issues en particulier des images satellitaires de type SRTM, le traitement de ces dernières a été faite par le logiciel Arcgis 10.2.2.

I.2.2.1. Définitions sommaires sur les caractéristiques physiques et géomorphologiques des bassins versants :

1. Surface :

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et l'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface.

2. Périmètre :

Le périmètre du bassin versant est la longueur de la ligne de partage des eaux.

3. Forme :

La forme d'un bassin versant est un élément essentiel à étudier car elle conditionne directement le temps de réponse des eaux.

Dans l'étude des caractéristiques de forme plusieurs indices morphologiques pourront être utilisés, et qui permettent de caractériser les écoulements et de comparer les bassins versants entre eux. Deux indices peuvent être cités :

▪ Indice de compacité de Gravelius :

Il est défini comme le rapport du périmètre d'un cercle occupant la même superficie, soit :

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

Où K_G l'indice de capacité de Gravelius ;

A la surface du bassin versant ; et P leur périmètre.

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

▪ Indice d'allongement :

Il est donné par le quotient du carré de la longueur maximale mesurable sur le bassin L_{max}^2 par unité de surface A .

$$I_{al} = \frac{L_{max}^2}{A}$$

4. Longueur du bassin versant :

Définie par la distance curviligne depuis l'exutoire mesurée le long du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à un point caractéristique représentant la projection du centre de gravité du bassin sur un plan (Snyder, 1938).

5. Longueur du cours d'eau principal :

Représentant la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a confluence.

6. Le rectangle équivalent :

C'est un modèle de représentation des bassins mis au point par Roche pour pouvoir comparer les bassins entre eux en ce qui concerne l'influence de leur caractéristique sur l'écoulement.

Par une simple transformation géométrique du bassin réel, le contour du bassin devient un rectangle de même superficie, les courbes de niveau des droites parallèles au petit côté du rectangle. Par conséquent on conserve la même répartition hypsométrique.

Soit L et l, la longueur et la largeur du rectangle ; et P et A le périmètre et la surface du bassin. On a :

$$L = \frac{k_c \cdot \sqrt{A}}{1,128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \quad \text{et} \quad l = \frac{k_c \cdot \sqrt{A}}{1,128} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right]$$

7. Réseau hydrographique :

C'est l'une des caractéristiques les plus importantes du bassin versant. Il se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement.

Le drainage du bassin est habituellement caractérisé par la **densité de drainage (Dd)**, définie comme le rapport entre la longueur cumulée des cours d'eau drainant le bassin et sa surface, ainsi que la **fréquence de drainage (F)**, définie comme le rapport entre le nombre de drains du bassin et sa surface.

Elles sont données par les relations : $D_d = \frac{\sum L_i}{A}$ et $F = \frac{\sum N_i}{A}$

Où D_d : la densité de drainage [km/km²]

L_i : la longueur des cours d'eau [km]

A : la surface du bassin versant [km²]

F : la fréquence de drainage [km⁻²]

N_i : le nombre de cours d'eau.

8. Rapports caractéristiques :

Horton et Strahler ont proposé des rapports caractéristiques concernant la relation entre les cours d'eau et leur nombre et longueur moyenne.

Soit N_n le nombre de cours d'eau d'ordre n d'un bassin versant, l_n la longueur moyenne des cours d'eau d'ordre n, et a_n la surface moyenne tributaire des cours d'eau d'ordre n.

Horton a proposé trois lois statistiques :

- Le rapport des nombres, appelé aussi rapport de confluence : $R_c = \frac{N_n}{N_{n+1}}$
- Le rapport des longueurs : $R_l = \frac{l_{n+1}}{l_n}$
- Le rapport des aires : $R_a = \frac{a_{n+1}}{a_n}$

La détermination de R_c et R_l se fait par voie graphique en portant N_n , l_n et i sur un graphique semi logarithmique. La pente de la droite moyenne permet de déterminer la raison de la progression géométrique.

9. Relief :

L'influence du relief sur les caractéristiques hydrologiques d'un bassin est très importante à étudier car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient d'une part avec l'altitude (précipitations, températures) et d'autre part, avec la morphologie du bassin.

En outre, l'hydrologie s'intéresse particulièrement aux problèmes de pente et d'orientation, puisqu'elle cherche à déterminer le réseau hydrographique, donc le chemin de l'eau, qui correspond localement à la ligne de plus grande pente (Julie Charleux-Demargne ; 2001).

Le relief se détermine au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants :

a. Courbe hypsométrique :

Elle fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée. Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude.

b. Altitudes caractéristiques :

▪ Altitudes extrêmes :

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux altitudes données déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et intervient dans le calcul de la pente.

▪ Altitude moyenne :

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

$$H_{moy} = \frac{\sum a_i \cdot h_i}{A}$$

Où H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m] ;

a_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ;

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : superficie totale du bassin versant [km²].

c. Pente moyenne du bassin versant :

C'est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle donne une bonne indication sur le temps concentration T_c et influence directement le débit de pointe lors d'uneaverse. Il se calcule par le quotient de la dénivelée totale par la longueur du rectangle équivalent, soit ;

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

Avec ;

I_m : indice de pente moyenne [m/km ou ‰]

H_{max} : altitude maximale du bassin versant [m]

H_{min} : altitude minimale du bassin versant [m]

L : longueur du rectangle équivalent [km]

Cette méthode de calcul donne de bons résultats dans le cas d'un relief modéré et pour des courbes de niveau simples et uniformément espacées.

d. Indice de pente I_p :

Cet indice se calcule à partir du rectangle équivalent. Il est égal à la somme des racines carrées des pentes moyennes de chacun des éléments pondérés par la surface intéressée, soit :

$$I_p = \sqrt{L} \cdot \sum \sqrt{a_i \cdot (h_i - h_{i-1})}$$

Où L représente la longueur du rectangle équivalent, a_i la fraction de la surface totale comprise entre les courbes de niveau successives d'altitude h_i et h_{i-1} .

e. Indice de pente global I_g :

Il est défini par Roche en prenant en considération la courbe hypsométrique, il est donné par la relation : $I_g = D / L$

D : exprime la dénivelée est égale ($H_{5\%} - H_{95\%}$)

L : est la longueur du rectangle équivalent

$H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ représentent respectivement les fractiles 5% et 95% de la courbe hypsométrique du bassin versant.

Cet indice, très facile à calculer, est des plus utilisés. Il sert de base à une des classifications O.R.S.T.O.M. pour des bassins versants dont la surface est dès l'ordre de 25 km² :

Tableau. I.1 : Classification des reliefs à partir de l'indice de pente global selon O.R.S.T.O.M.

R1	Relief très faible	$I_g < 0.002$
R2	Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
R3	Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
R4	Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
R5	Relief assez forte	$0.02 < I_g < 0.05$
R6	Relief forte	$0.05 < I_g < 0.1$
R7	Relief très forte	$0.1 < I_g$

f. Dénivelée spécifique :

La dénivelée spécifique dérive de la pente globale I_g en la corrigeant de l'effet de surface admis étant inversement proportionnel à \sqrt{A} : $D_s = I_g \sqrt{A} = \frac{D}{L} \sqrt{Ll} = D \sqrt{\frac{l}{L}}$

La dénivelée spécifique ne dépend que de l'hypsométrie ($D = H_{5\%} - H_{95\%}$) et de la forme du bassin (l/L).

Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M., indépendante des surfaces des bassins :

Tableau. I.2 : Classification des reliefs à partir de la dénivelée spécifique selon O.R.S.T.O.M.

R1	Relief très faible	$D_s < 10$ m
R2	Relief faible	$10\text{m} < D_s < 25$ m
R3	Relief assez faible	$25\text{ m} < D_s < 100$ m
R4	Relief modéré	$50\text{ m} < D_s < 100$ m
R5	Relief assez forte	$100\text{ m} < D_s < 250$ m
R6	Relief forte	$250\text{ m} < D_s < 500$ m
R7	Relief très forte	$500\text{ m} < D_s$

I.2.2.2. Le bassin versant de l'Oued Tamanrasset (site BIF1) :

1. Caractéristiques de forme :

Comme signalé plus haut, c'est essentiellement dans le massif volcanique de l'Atakor, au niveau des reliefs de l'Assekrem, que prennent naissance les crues importantes du bassin versant de l'Oued Tamanrasset. La portion amont de bassin prise en compte dans notre étude s'étend du 22° 46' au 23° 16' de latitude Nord et du 5° 33' au 5° 43' de longitude Est. La limite sud est située à près de 2 km à l'aval de la digue BIF1. La zone concernée occupe une superficie de 422 km² pour un périmètre de 141 km. Elle se présente sous une forme allongée avec un coefficient de Gravelius de 1.92 (Fig .5). Le cours d'eau principal de l'oued traverse la ville de Tamanrasset suivant une direction générale Nord-est – Sud-ouest.

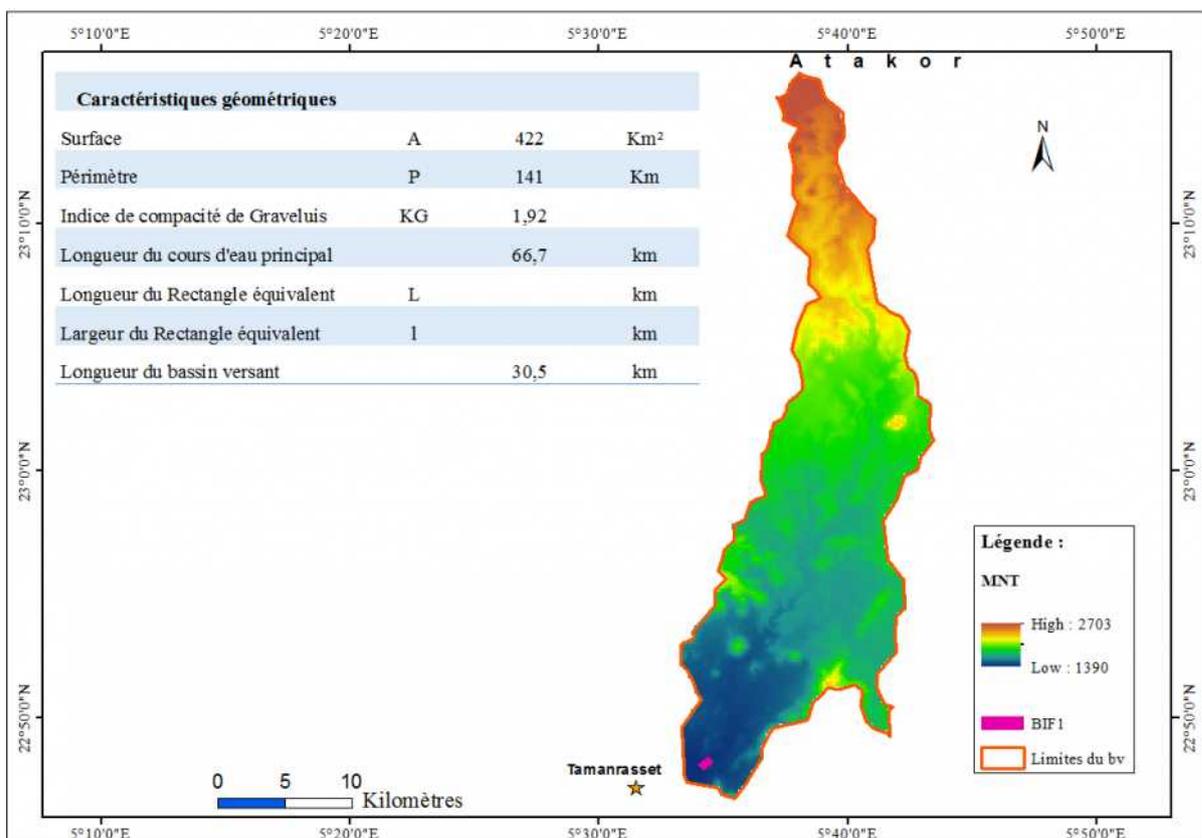


Figure 5. MNT du bassin versant de l'Oued Tamanrasset en amont de Tamanrasset.

2. Réseau hydrographique :

En termes d'ordre de talwegs, la classification du réseau hydrographique de bassin versant de l'Oued Tamanrasset, selon la classification de Strahler a été établie sur une échelle approximative de 1/90 000, à défaut de pouvoir disposer d'un fond cartographique à échelle de 1/50 000. Un nombre de 4 ordres a été défini (Fig. 6). Le cours d'eau principal s'étend sur 66.7 km. La longueur du bassin versant, telle que définie par Snyder (1938), est égale à 30.5 km. Le réseau hydrographique se caractérise par une faible densité de drainage, soit 0.34. La valeur de fréquence des cours d'eau est de 0.07.

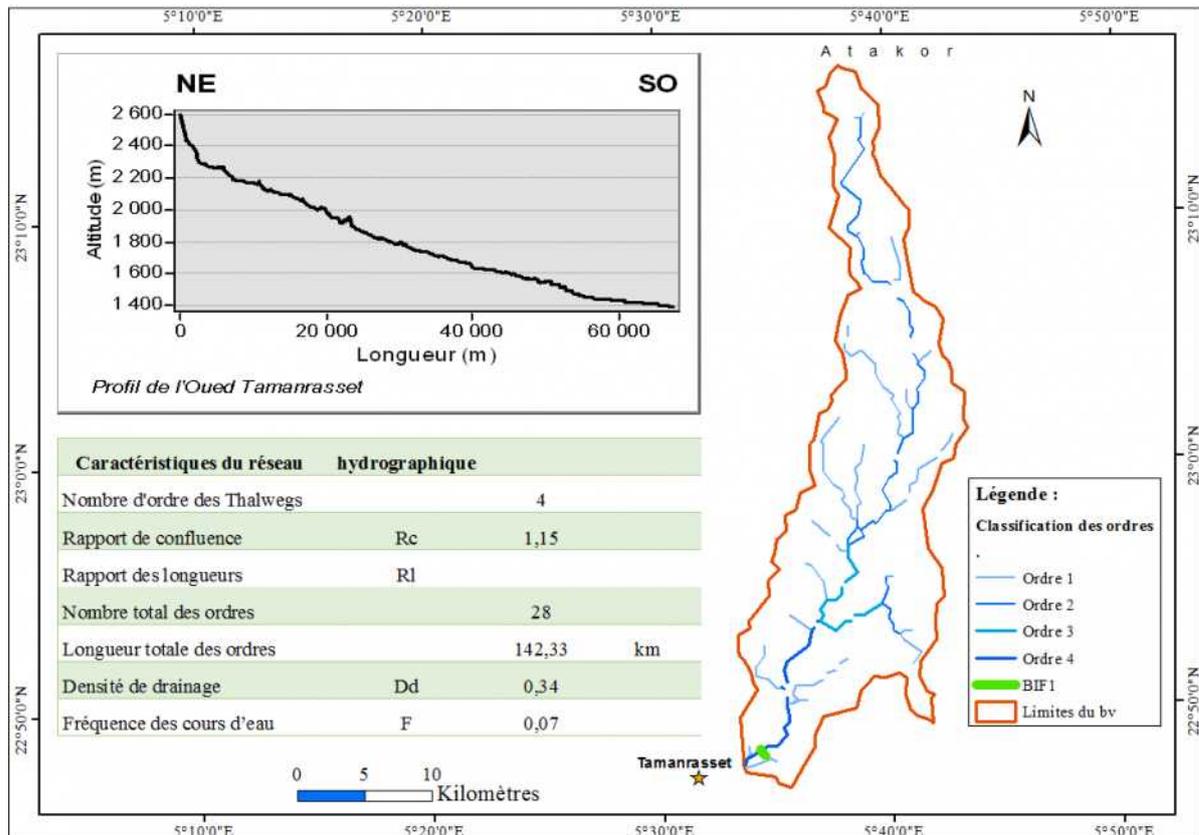


Figure 6. Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Tamanrasset en amont de Tamanrasset.

Les valeurs des rapports de confluence et des rapports de longueur sont présentées au tableau I.3 :

Tableau. I.3 : Nombre et longueur des ordres de talwegs du bassin versant de l'Oued Tamanrasset.

Ordre	Nombre	L	L _{moy}	R _c	R _l
1	21	71	3.4		1.5
2	4	46	11.5	5.25	3.8
3	2	12	6.1	2	1.0
4	1	13	12.7	2	
Totale	28	142.3	Moyenne	3.08	2.1

On rapporte log N, Log L en fonction de l'ordre n et on calcule la pente de chaque droite pour obtenir successivement R_c et R_l. (Fig. 7 a et b)

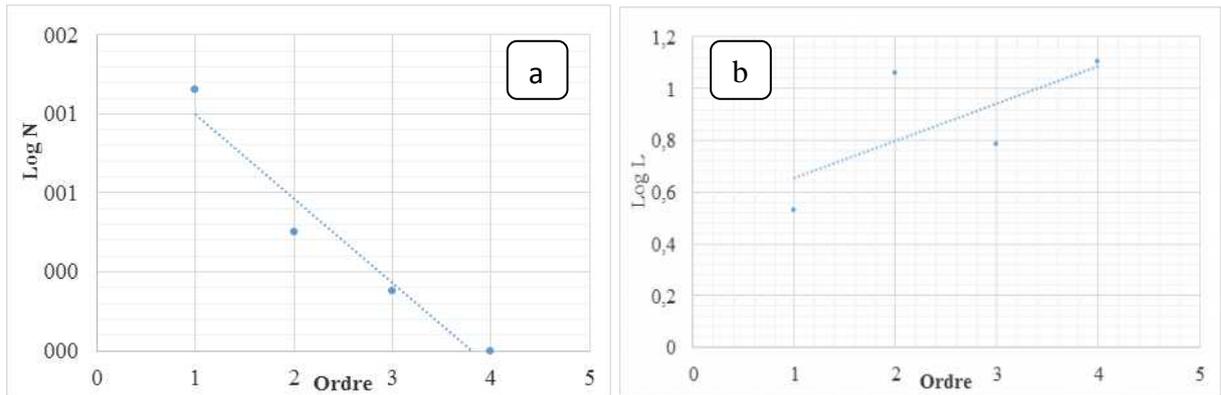


Figure 7. Graphe représentant nombre et longueur des ordres du chevelu du bassin versant de l'Oued Tamanrasset.

L'équation de la droite de log N en fonction de n sera : $\log N_n = a n + b$.

La pente sera calculée par la relation : $a = \frac{\log N_n - \log N_{n-1}}{n - (n-1)}$

Pour faire les calculs, nous prenons :

Log N = 1.2 et Log N = 0.4 ;

Pour ces mêmes valeurs, nous avons : n = 1 et n = 2.89 alors $a = \frac{1.2-0.4}{2.89-1}$; a = 0.423

Si nous passons à la valeur numérique, nous avons Rc moyen = 3,08

A représentant le rapport de confluence, nous avons Rc moyen = 1,15

3. Caractéristiques des reliefs :

Plusieurs cartes ont été établies pour caractériser les reliefs du bassin versant concerné, elles nous permettent de ressortir les résultats suivants :

Les niveaux les plus élevés se retrouvent en amont sur les reliefs de l'Assekrem avec des altitudes comprises entre 2500 et 2700 m occupant une superficie très limitée soit 2.7 km² dont le point culminant est à 2703 m (Fig. 8).

Les niveaux les plus faibles (1390 – 1500 m) se situent à l'aval du bassin, autour du site BIF 1, couvrant une surface de 61 km².

Les intervalles des altitudes (1700-1900 m) et (1500-1700 m) représentent les surfaces dominantes. Elles occupent respectivement 138 km² et 124 km².

L'établissement de la courbe hypsométrique du bassin (Fig. 8, Tableau I.4) permet de déterminer les indices de pentes suivants :

Indice de pente : 1.11

Indice de pente moyenne : 0.021

Indice de pente globale : 0.014

Dénivelée spécifique : 291 m

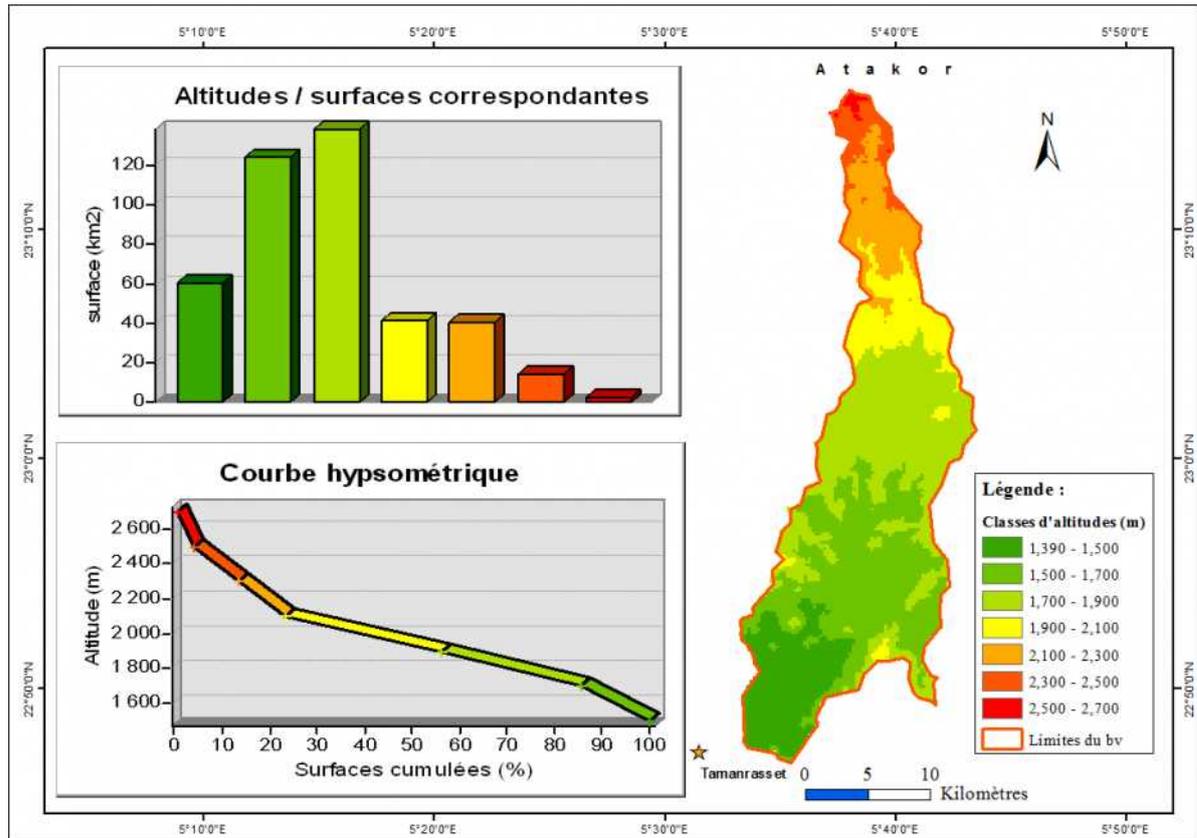


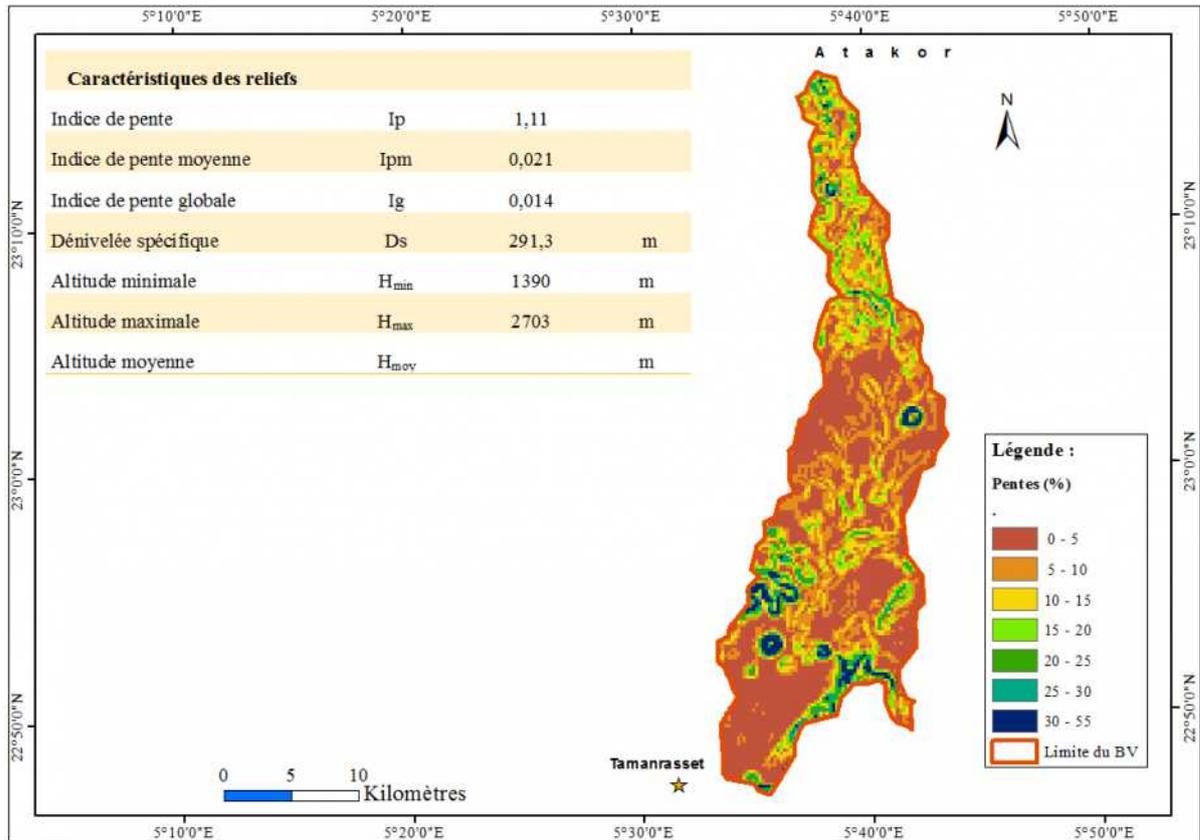
Figure 8. Répartition des surfaces en fonction des altitudes du bassin versant de l'Oued Tamanrasset

Tableau. I.4 : Répartition des surfaces du bassin de l'Oued Tamanrasset en fonction des altitudes.

Altitude (m)	Surface km ²	Surface (%)	Surfaces cumulés (%)
1500	60.58	14.36	100
1700	124.04	29.40	85.64
1900	138.28	32.78	56.24
2100	41.47	9.83	23.46
2300	40.68	9.64	13.63
2500	14.14	3.35	3.98
2700	2.67	0.63	0.63
Totale	421.85		

Selon la classification de O.R.S.T.O.M relative aux valeurs de l'indice de pente global, les reliefs du bassin versant de l'Oued Tamanrasset sont modérés et forts d'après la valeur de la dénivelée spécifique.

La carte de la répartition des pentes (Fig. 9) montre que le bassin versant de l'Oued Tamanrasset se caractérise par de fortes pentes (supérieures à 10%) dans sa partie en amont, mais également dans la partie aval, à l'emplacement des dykes ou necks (Pic de l'Hadriane, etc.). Les faibles pentes (0-5%) apparaissent essentiellement dans cette partie aval.



1.2.2.3. Le bassin versant de l'Oued Outoul (sites BIF 2 et BIF3) :

1. Caractéristiques de forme :

L'Oued Outoul est un affluent en rive gauche de l'Oued Abalessa qui rejoint plus en aval l'Oued Amded (Fig. 3). Il prend également sa source au niveau des reliefs de l'Assekrem, à l'extrémité orientale du bassin de l'Oued Amded. (Fig. 3).

La zone du bassin versant prise en compte, intégrant les sites de BIF2 et BIF3, est située entre les parallèles 22° 42' et 23° 15' de latitude Nord, et les méridiens 5° 14' et 5° 39' de longitude Est, soit entre la zone de l'Assekrem et la confluence de l'Oued Outoul avec l'Oued Ihelfene (Fig. 10). Ceci couvre une superficie de 847 km² pour un périmètre de 195 km. Il présente une forme allongée pour un coefficient de Gravelius de 1,88 (Fig 10). Le cours d'eau principal prend une direction Nord-est - Sud-ouest.

2. Réseau hydrographique :

Un réseau hydrographique de quatre ordres caractérise le bassin versant de l'Oued Outoul. Le cours d'eau principal est long de 81 km. La longueur du bassin versant, telle que définie par Snyder (1938) est égale à 30.5 km. Le réseau hydrographique se caractérise par une faible densité de drainage, soit 0.34. La valeur de fréquence des cours d'eau est de 0.07 (Fig. 11).

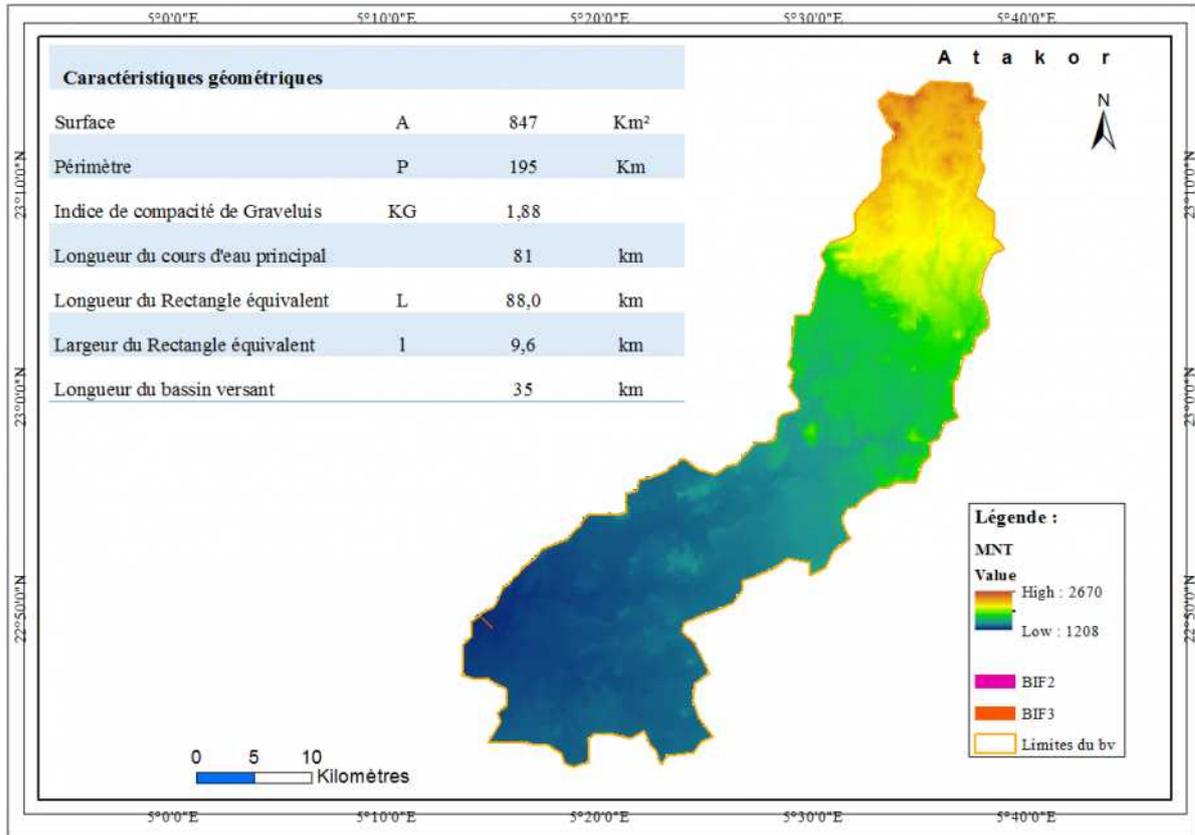


Figure 10. MNT du bassin versant de l'Oued Outoul.

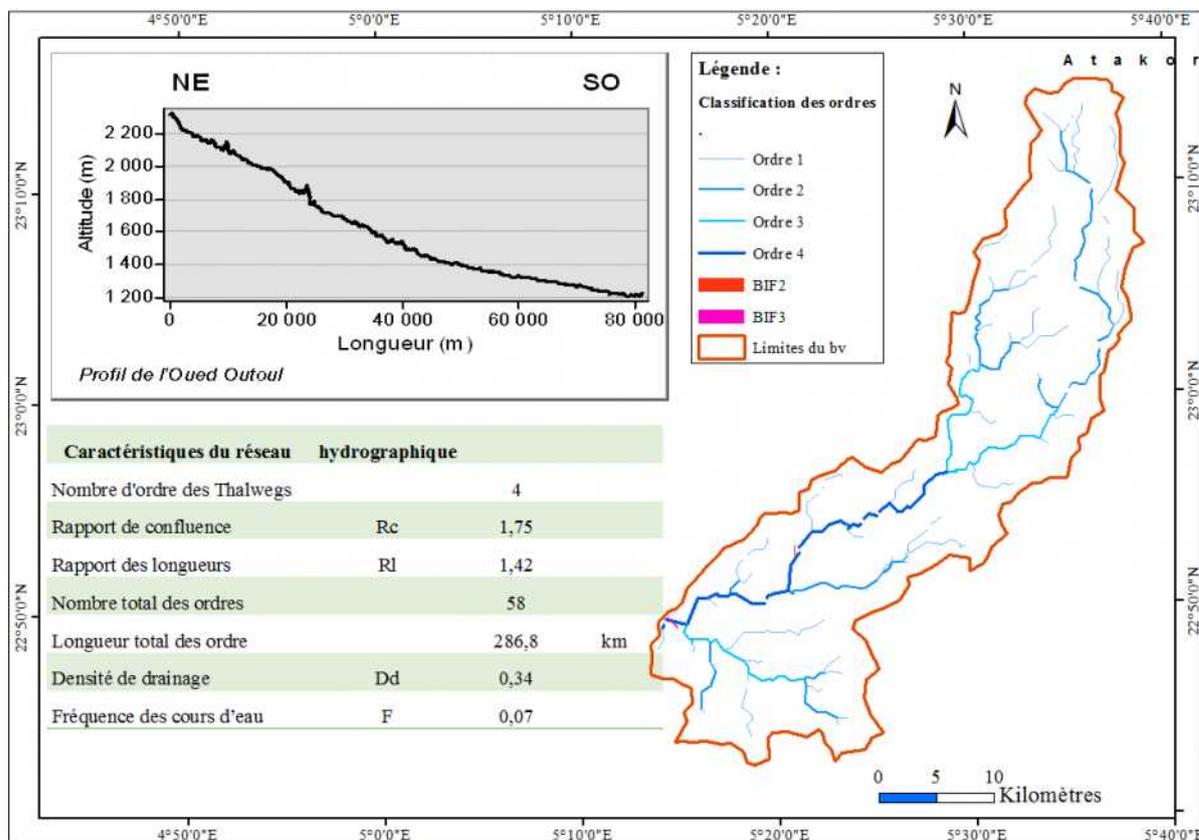


Figure 11. Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Outoul.

Les valeurs des rapports de confluence et des rapports de longueur sont données au tableau I.5 :

Tableau. I.5 : Nombre et longueur des ordres du bassin versant de l'Oued Outoul.

Ordre	Nombre	L	Lmoy	R _c	R _l
1	45	138	3.1		1.9
2	9	73	8.2	5	1.8
3	3	41	13.8	3	1.2
4	1	34	33.7	3	
Totale	58	286.8	Moyenne	3.7	1.6

D'après la figure 12, on constate que les valeurs du rapport de confluence et celle de la longueur seraient respectivement 1,75 et 1,42.

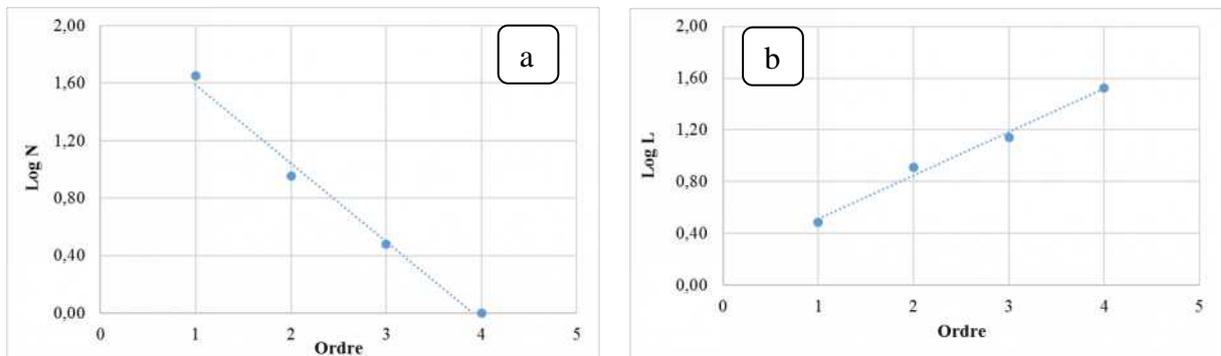


Figure 12. Graphe représentant nombre et longueur des ordres du chevelu du bassin versant de l'Oued Outoul.

3. Caractéristiques des reliefs :

La carte des classes d'altitude (Fig. 13) indique que les altitudes dans ce bassin d'étude varient de 1209 m, au juste à l'aval de la digue BIF3 jusqu'au point culminant à 2670 m. L'altitude moyenne est égale 1854 m.

Les classes d'altitude se répartissent d'une façon distincte :

Les altitudes comprises entre 1209 et 1400 m représentent une surface dominante s'étendant sur 359 km². Elles se situent à l'aval du bassin où se localisent les digues BIF2 et BIF3.

Les reliefs d'altitude supérieure à 1600 m occupent la partie amont du bassin avec plus de 50% de la surface totale du bassin.

L'étude hypsométrique permet d'indiquer les principaux indices de pente :

- Indice de pente : 1.37
- Indice de pente moyenne : 0.016
- Indice de pente globale : 0.012
- Dénivelée spécifique de 350.21 m.

D'après ces résultats, on constate que le bassin versant de l'Oued Outoul se caractérise par des reliefs forts.

Tableau. I.6 : Répartition des surfaces du bassin de l'Oued Outoul en fonction des altitudes.

Altitude (m)	Surface km ²	Surface (%)	Surfaces cumulés (%)
1400	359.24	42.41	100
1600	127.91	15.10	57.59
1800	154.94	18.29	42.49
2000	52.84	6.24	24.19
2200	87.11	10.28	17.96
2400	56.05	6.62	7.67
2600	8.92	1.05	1.05
Totale	847		

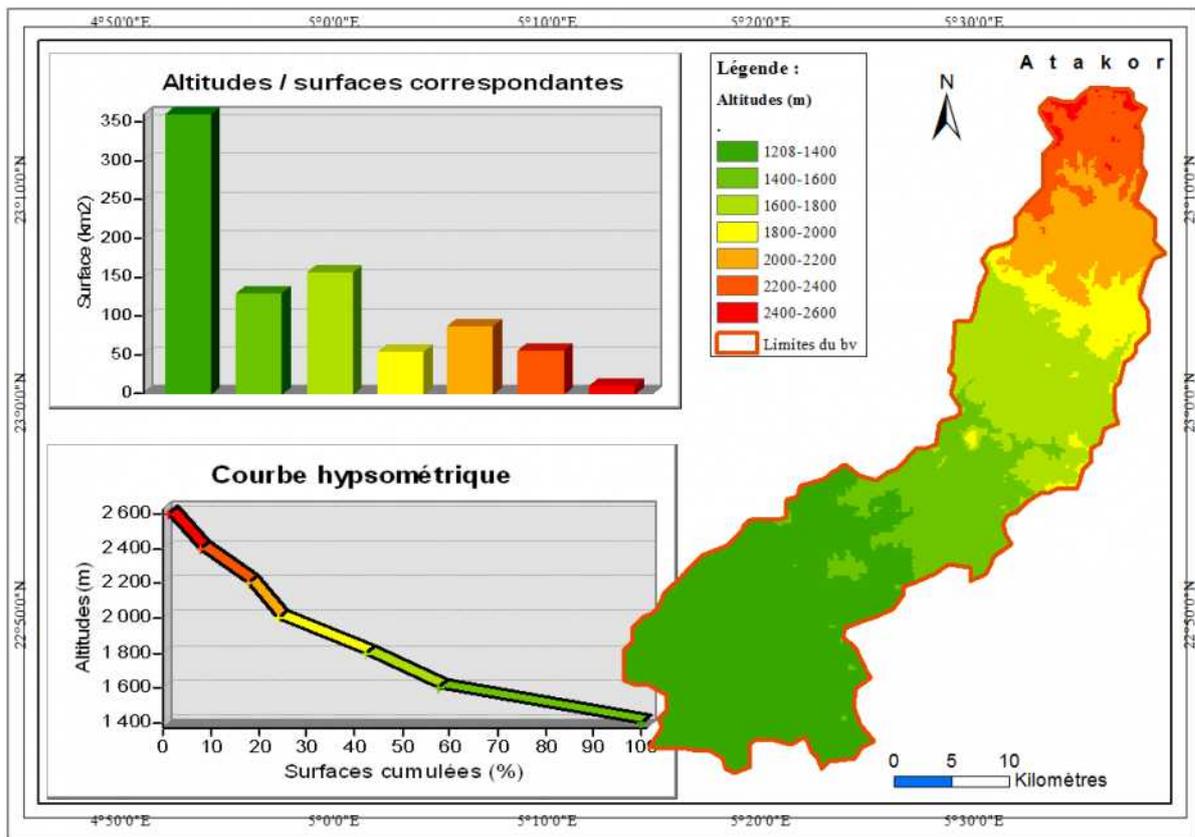


Figure 13. Répartition des surfaces en fonction des altitudes du bassin versant de l'Oued Outoul.

Les reliefs du bassin sont généralement de faibles pentes (souvent moins de 5%). Les fortes pentes se retrouvent à l'amont et au milieu du bassin (Fig. 14).

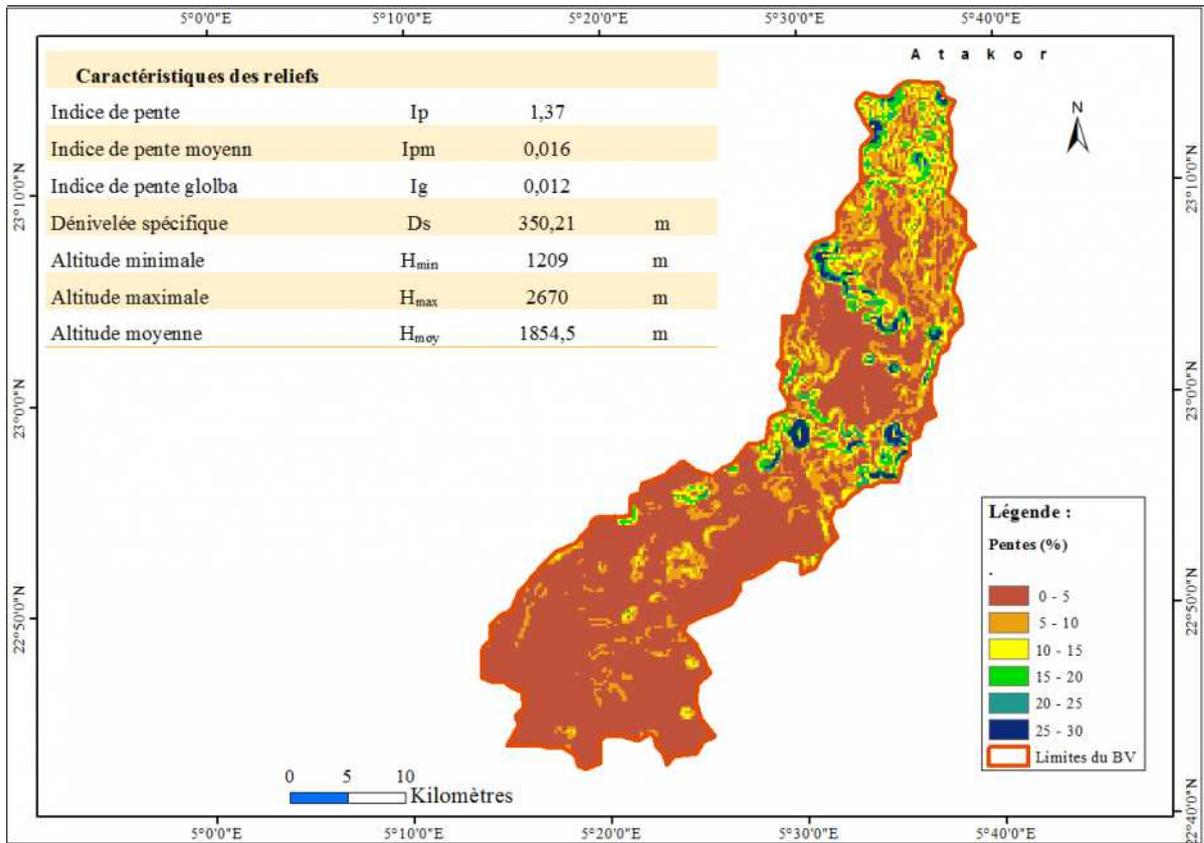


Figure 14. Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Outoul.

1.2.2.4. Le bassin versant de l'Oued In Amguel (site BIF 4) :

1. Caractéristiques de forme :

Le bassin versant de l'Oued In Amguel est l'un des sous-bassins du grand ensemble hydrologique de l'Oued Tekouïat (24 000 km²). Il prend naissance dans les hauteurs Nord-ouest de l'Atakor, (Fig. 4). Il est situé entre les parallèles 23° 15' et 24° 15' de latitude Nord, et les méridiens 4° 55' et 5° 55' de longitude Est (Fig. 15). Il couvre une superficie d'environ 4614 km², et un périmètre de 417 km. L'examen de ses caractéristiques morphométriques révèle une forme allongée pour un coefficient de Graveluis de 1,71.

2. Réseau hydrographique :

Le bassin versant de l'Oued In Amguel se caractérise par un réseau hydrographique assez dense. Le cours d'eau principal s'étend sur une longueur de 144 km. La longueur du bassin versant, telle que définie par Snyder (1938), est égale à 53.5 km. L'alimentation de l'oued provient de plusieurs affluents dont les principaux sont les oueds Issekarassene, Hirafok, Zerzora, Amekri et l'Oued Tinleft (Fig. 16). Le réseau hydrographique de ce bassin se caractérise par une densité de drainage, soit 0.35. La valeur de fréquence des cours d'eau est de 0.05.

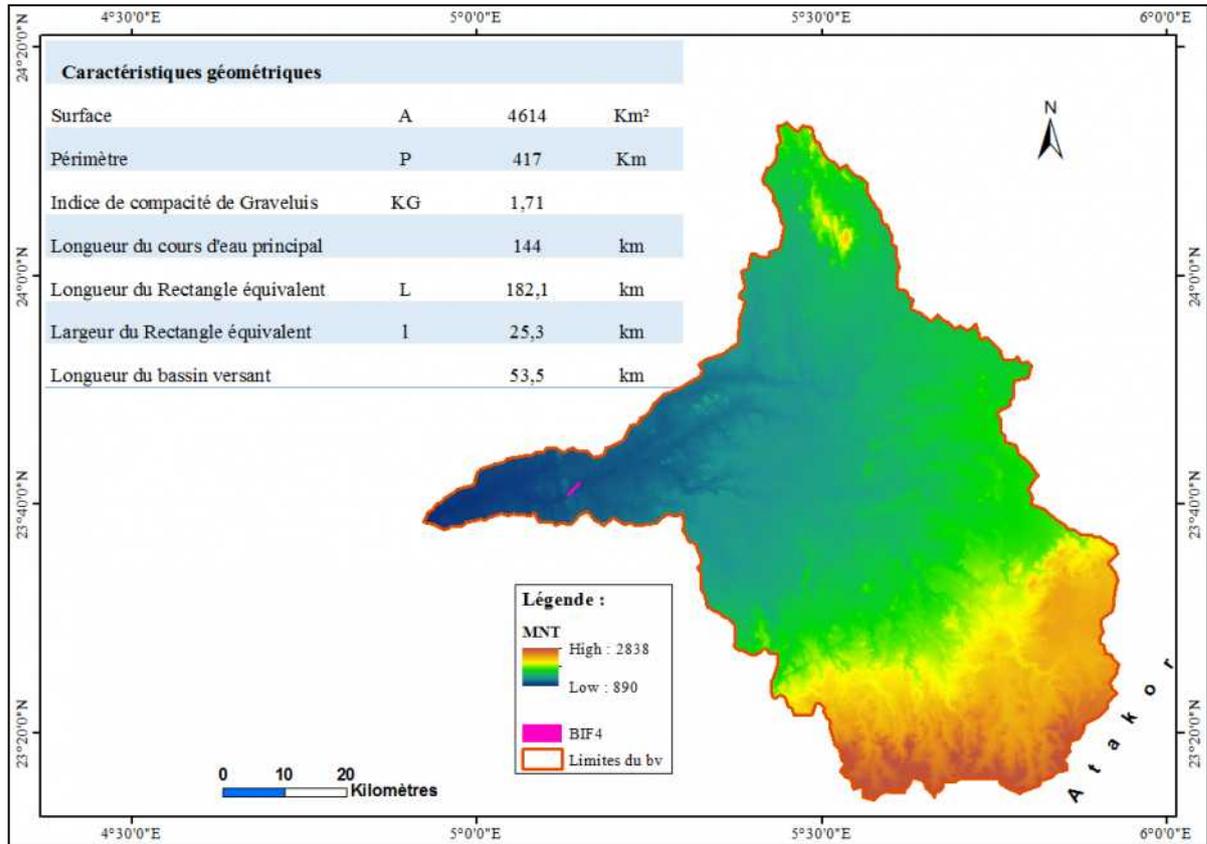


Figure 15. MNT du bassin versant de l'Oued In Amguel.

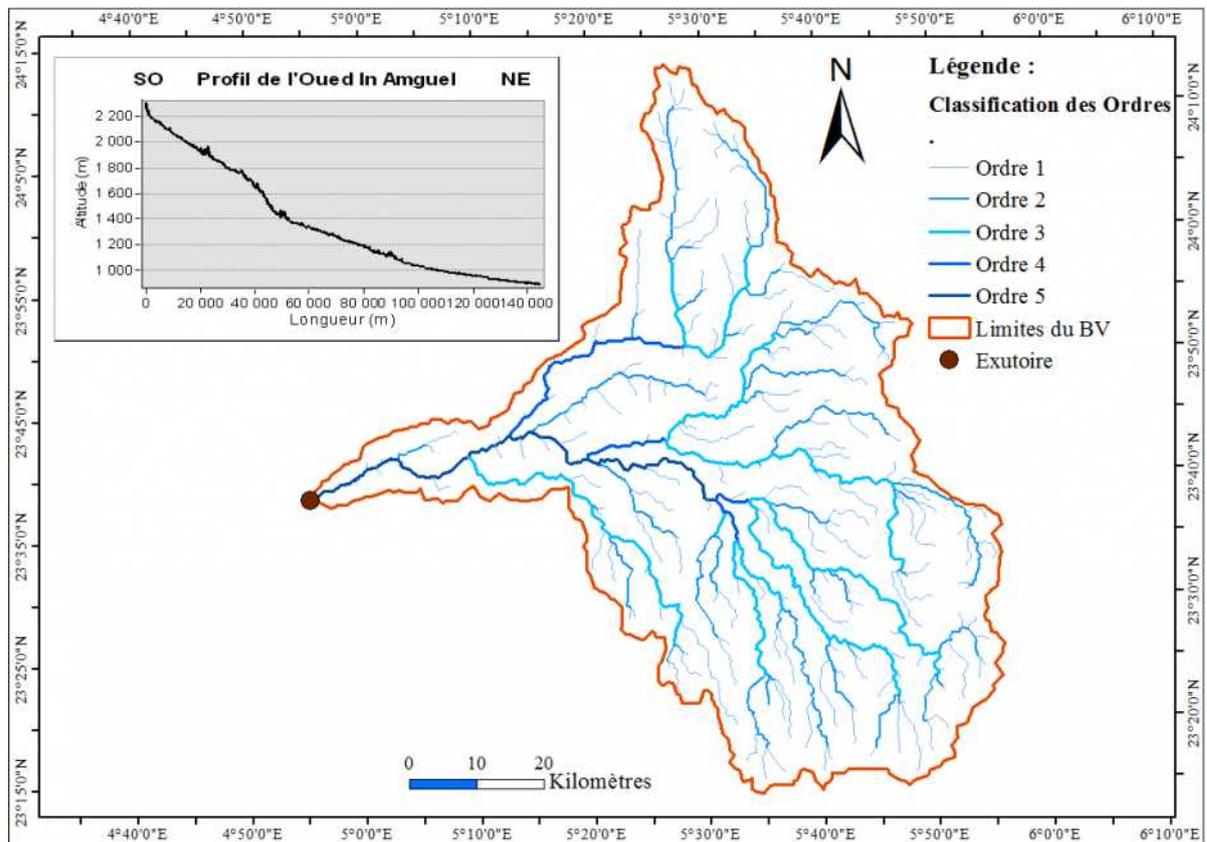


Figure 16. Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued In Amguel.

Les valeurs du rapport de confluence, rapport de longueur avec sont présentées dans le tableau I.7 :

Tableau. I.7 : Nombre et longueur des ordres des talwegs du bassin versant de l'Oued In Amguel.

Ordre	Nombre	L	Lmoy	R _c	R _l
1	181	731.7	4		2.5
2	41	413.7	10.1	4.4	3.2
3	10	322.6	32.3	4.1	0.5
4	4	65.1	16.3	2.5	4.8
5	1	77.4	77.4	4	
Totale	237	142.3	Moyenne	3.8	2.7

D'après la figure 17, on constate que les valeurs du rapport de confluence et de longueur sont de respectivement 1,87 et 1,31.

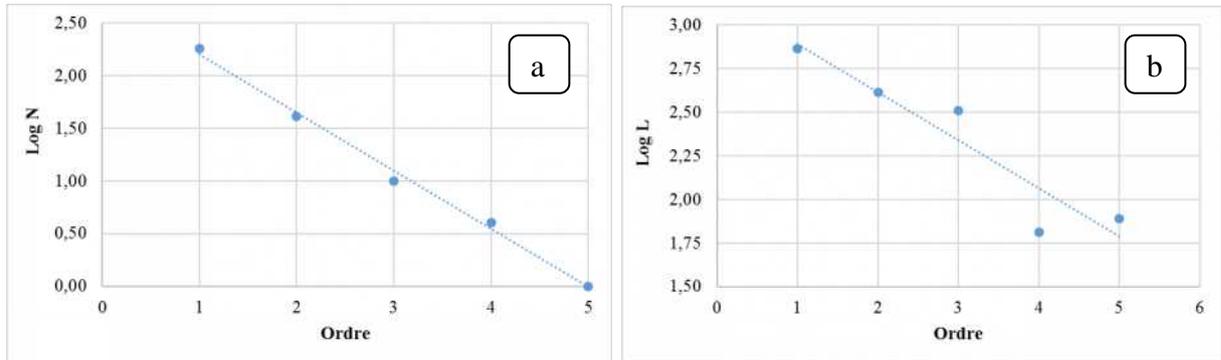


Figure 17. Graphe représentant le nombre et longueur des ordres en fonction de son ordre.

3. Caractéristiques des reliefs :

La figure 18 indique des altitudes du bassin versant de l'Oued In Amguel comprises entre 890 et 2830 m et dont l'altitude moyenne serait de 1761 m.

Les plus fortes altitudes (supérieures à 2000 m) se retrouvent au Sud-ouest du bassin (dans le massif de l'Atakor) et couvrent une surface de 998 km². Ces altitudes représentent 21.6 % de la surface totale (Tableau I.8).

Les surfaces dominantes sont celles de "1400-1600 m" et "1200-1400 m". La première classe se retrouve à l'Est du bassin, s'étale jusqu'au Sud. Cette tranche d'altitude correspond à 20 % de la surface totale. La deuxième classe occupe le milieu du bassin avec 31 % de la superficie. Enfin, Les altitudes inférieures à 1200 m se retrouvent dans la partie aval du bassin.

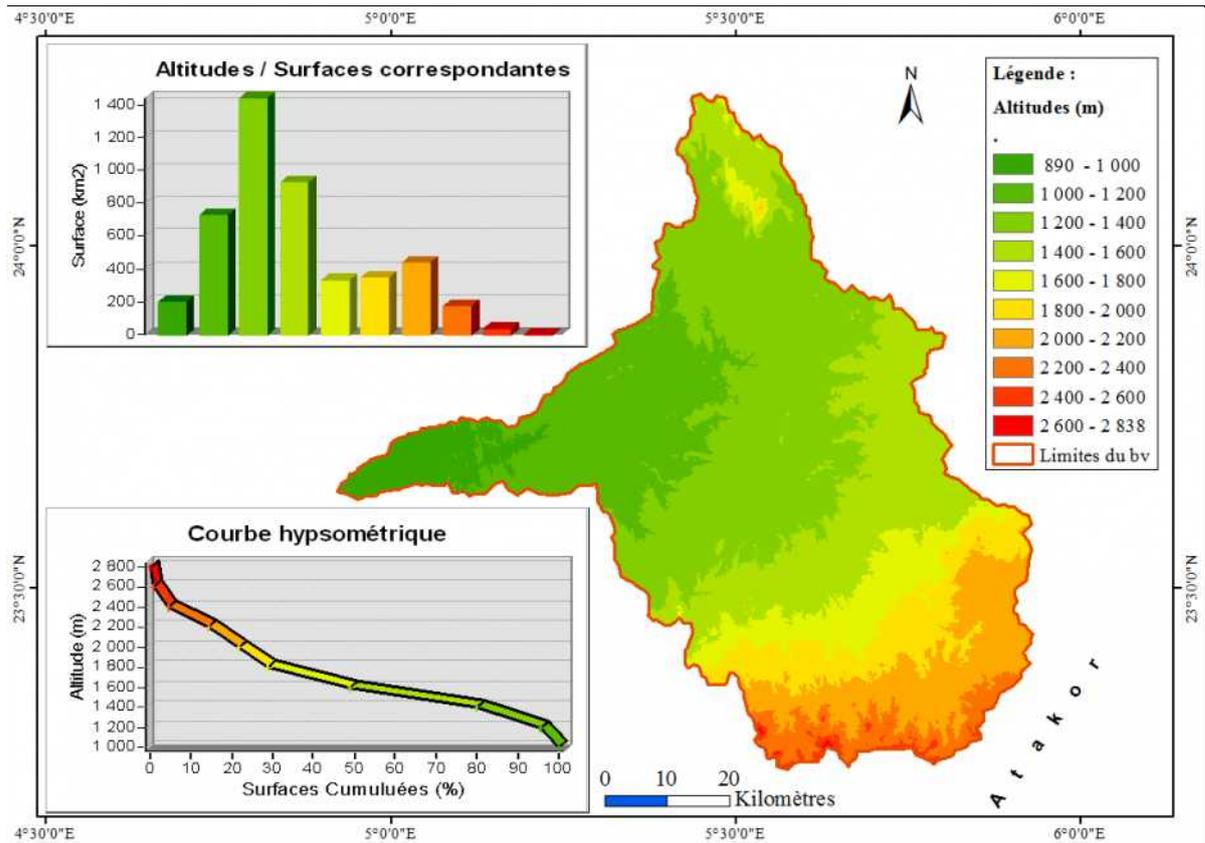


Figure 18. Répartition des surfaces en fonction des altitudes du bassin versant de l'Oued In Amguel.

Tableau. I.8 : Répartition des surfaces du bassin de l'Oued In Amguel en fonction des altitudes.

Altitude (m)	Surface km ²	Surface (%)	Surfaces cumulés (%)
1000	195.89	4.25	100
1200	726.07	15.73	95.75
1400	1437.71	31.16	80.02
1600	923.64	20.02	48.86
1800	332.87	7.21	28.85
2000	347.10	7.52	21.63
2200	440.38	9.54	14.11
2400	175.08	3.79	4.57
2600	32.49	0.70	0.77
2800	3.16	0.07	0.07
Totale	4614		

L'étude hypsométrique du bassin versant de l'Oued In Amguel nous permet de calculer les différents indices de pente :

- Indice de pente : 2.23
- Indice de pente moyenne : 0.011
- Indice de pente globale : 0.066
- Dénivelée spécifique : 448 m

D'après ces résultats, on déduit que ce bassin versant se caractérise par de forts reliefs.

Le bassin se caractérise par la majoration des reliefs de faibles pentes (inférieurs à 5%). Les fortes pentes (supérieures à 10%) se retrouvent dans sa partie Sud-ouest et encore en Est. Les reliefs caractérisés par des pentes comprises entre 5% et 10% sont assez dominants et se répartissent sur toute la surface du bassin (Fig. 19).

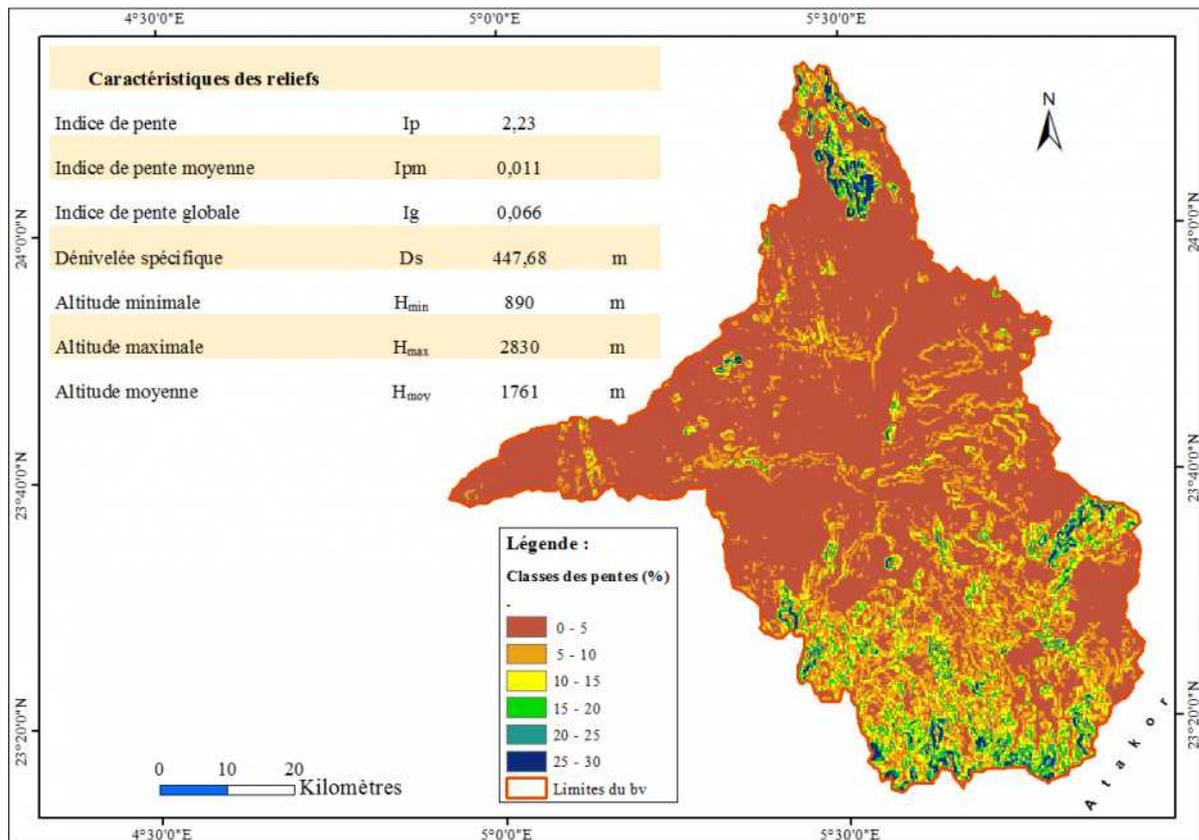


Figure 19. Carte des pentes du bassin versant de l'Oued In Amguel.

I.3. Etude climatique :

Pour identifier le régime climatique de la région de Tamanrasset, nous nous sommes basées sur les données climatiques, de deux stations météorologiques O.N.M de la région, situées dans le bassin versant de l'Oued Tamanrasset : la station de Tamanrasset et la station de l'Assekrem

Les coordonnées de ces stations et leurs périodes d'observation sont mentionnées dans le tableau I.9.

Tableau. I.9 : Caractéristiques géographiques et périodes d'observation des stations climatologiques.

Nom de la station	Altitude(m)	Latitude	Longitude	Période d'observation
Tamanrasset	1372	22° 49' N	05° 27' E	1980 - 2015
Assekrem	2710	23° 16' N	05° 38' E	1953 - 2015

(Source : DMRS/O.N.M Tamanrasset)

I.3.1. Température :

La température de l'air est un paramètre ayant une grande influence sur le bilan hydrologique. Elle conditionne l'évaporation et l'évapotranspiration.

Les températures moyennes mensuelles observées au niveau des deux stations concernées sont portées dans le tableau ci-dessous.

Tableau. I.10 : Températures moyennes mensuelles des stations de Tamanrasset et de l'Assekrem (°C).

Station		Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jun.	Jul.	Août
Mois													
Température	Tamanrasset	27.4	23.6	18	13.8	12.4	15.6	19.5	23.7	27.5	29.7	29.6	29.3
	Assekrem	16.4	12.6	8.8	7.4	7.3	9	11.3	15	16.5	16.6	16.5	16.9

La station de l'Assekrem, située à 2710 m d'altitude alors que la station de Tamanrasset n'est qu'à 1372 m, présente une température moyenne annuelle assez faible, égale 12.9°C, comparativement à celle Tamanrasset égale à 22.5°C, soit un différentiel de 9.6°C.

Les deux graphes représentatifs des températures moyennes (Fig. 20) montrent que tous les maximums sont observés en saison estivale (juin à août) alors que les minimums apparaissent au mois de janvier avec une valeur de 12.4°C pour la station de Tamanrasset et 7.3°C pour la station de l'Assekrem.

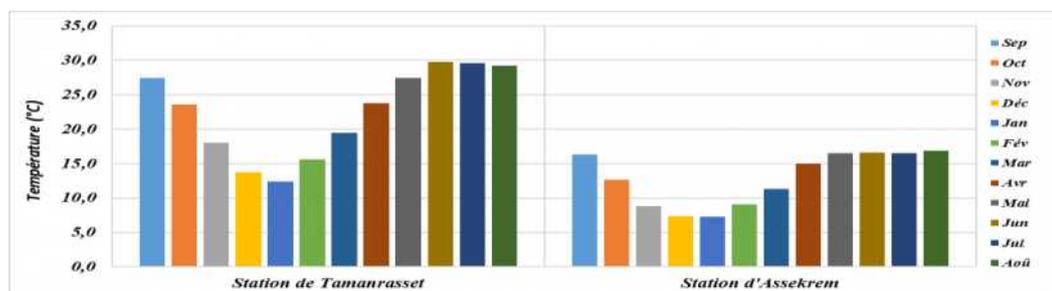


Figure 20. : Fluctuation des températures moyennes mensuelle des stations de Tamanrasset et de l'Assekrem.

I.3.2. Humidité :

L'humidité de l'air s'exprime par le degré hygrométrique ou humidité relative et la tension de vapeur d'eau qui y est contenue.

Les valeurs des moyennes mensuelles de l'humidité observée à la station de Tamanrasset au cours de la période 1980/2015, figurent dans le tableau ci-dessous.

Tableau. 11 : Humidité relative moyenne (en%).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août
Humidité (%)	22.4	24.0	25.3	26.1	23.9	20.9	19.1	15.9	16.4	17.7	18.4	22.8

D'après le tableau 11 et la figure 21, on observe qu'au cours de l'année, l'humidité atmosphérique passe par un maximum au mois de décembre et un minimum en avril.

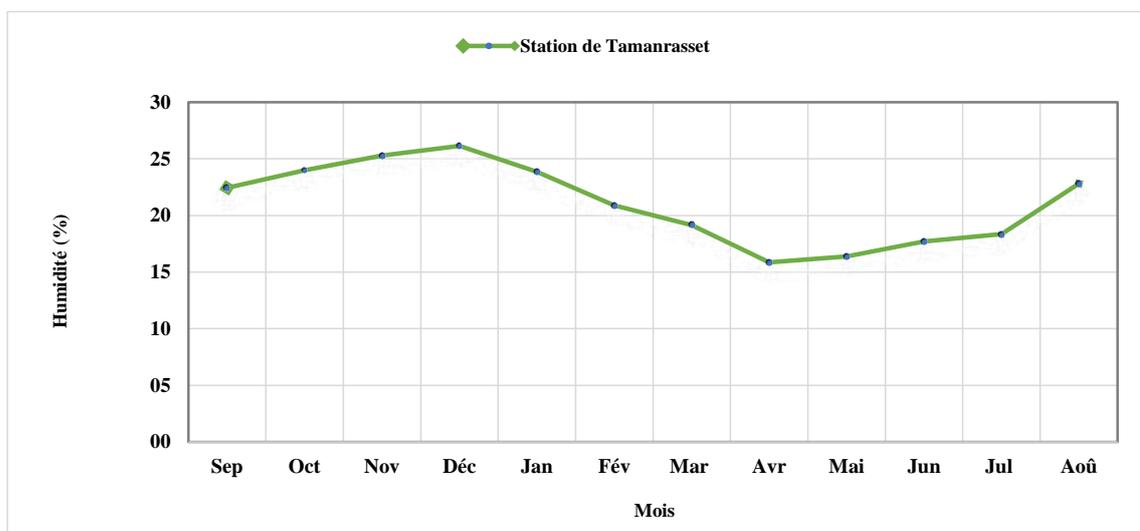


Figure 21. Valeurs de l'humidité relative mensuelle relevée à la station de Tamanrasset (1980-2015).

I.3.3. Vent :

Les valeurs des moyennes mensuelles de la vitesse du vent enregistrées à la station de Tamanrasset sur une hauteur de 10 m sont présentées dans le tableau I.12.

Tableau. I.12 : Vitesses Moyennes mensuelles des vents (en m/s).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû
Vitesse (m/s)	3.8	3.3	2.7	2.6	3.0	3.5	4.0	4.1	4.2	4.2	4.3	4.0

Les vents dont la vitesse est supérieure à 4 m/s sont relativement fréquents durant les mois de mars à juillet avec une valeur maximale égale 4.3 m/s enregistrée en ce dernier mois. Elles ont des vitesses inférieures égales à 2.7 et 2.6 m/s enregistrées respectivement au mois de novembre et décembre (Fig. 22.).

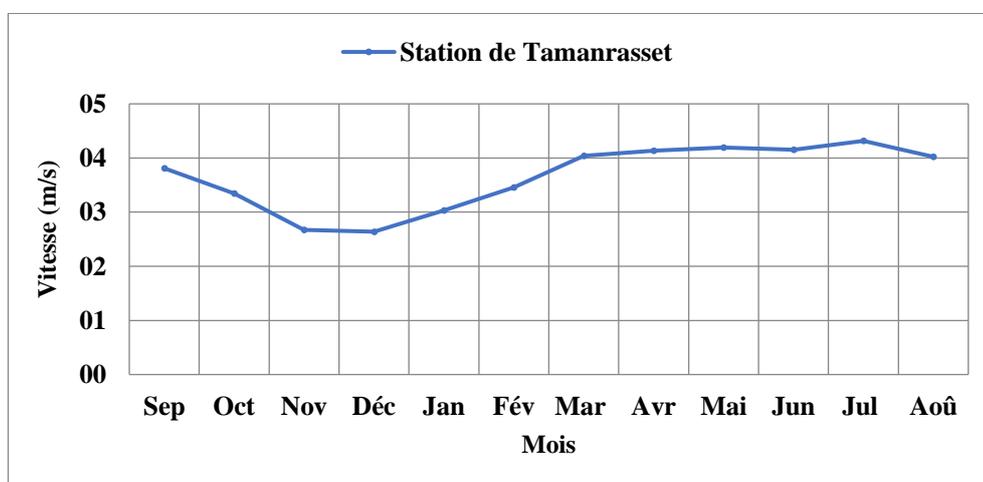


Figure 22. Moyenne mensuelle des vitesses du vent en (m/s).

I.3.4. Insolation :

L'insolation moyenne mensuelle observée à la station de Tamanrasset durant la période 1980/2015, se répartissent de la manière suivante (Tableau I.13) :

Tableau. I 13 : Durée d'insolation moyenne mensuelle.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû
Insolation (h/mois)	232	279	282	281	282	272	289	293	291	249	288	269

Les données enregistrées indiquent que l'amplitude de variation de la durée d'insolation présente un minimum de 232 h au mois de septembre et un maximum de 293 h au mois d'avril. Il est à signaler que le mois de juin présente une faible durée d'insolation probablement due à une forte nébulosité (période des pluies).

Le total annuel d'insolation est de 3308 heures (Fig. 23).

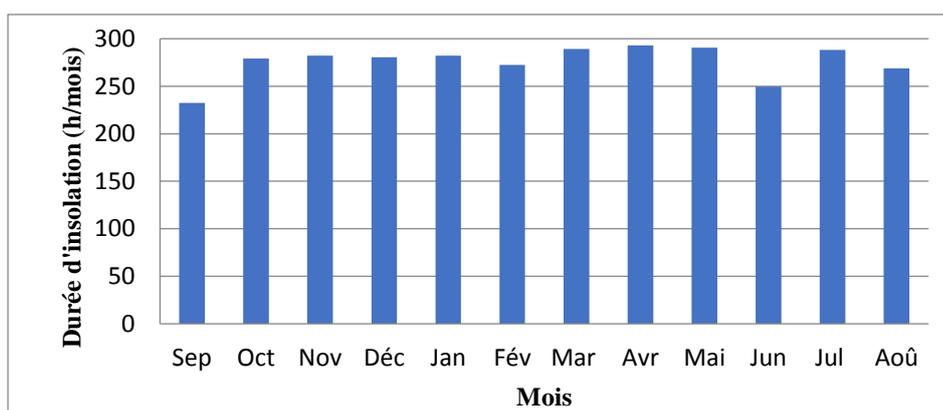


Figure 23. Durée mensuelle de l'insolation totale.

I.3.5. Précipitation :

La région du Hoggar est connue pour se caractériser par des précipitations annuelles tombant essentiellement pendant les mois de juillet et août, et restant notables en septembre. Dans ce cadre climatique, l'irrégularité de la pluie, à l'échelle spatiale et temporelle, est un caractère prépondérant. La variabilité spatio-temporelle des précipitations est accentuée dans cette zone saharienne, où la pluviométrie, en moyenne interannuelle, est faible et où certaines années ne connaissent pas de pluie.

I.3.5.1. Précipitation moyenne annuelle :

L'application des lois statistiques (test de Pettit, méthode bayésienne de Lee et Héghinian, test de Hubert, etc.) sur les séries des précipitations de deux stations, Tamanrasset et Assekrem, sur une période de 61 ans s'étendant de 1953/2014 aurait révélé l'existence de deux périodes distinctes. La première, relativement excédentaire s'étendant jusqu'à la fin de la décennie 1980, suivie, d'une période déficitaire (Elhoussaoui, 2015).

Nous présentons dans le tableau 1.4 les valeurs des précipitations moyennes annuelles enregistrées au niveau des deux stations pour la période 1980/2015

Tableau. I.14 : *Précipitations moyennes annuelles (1980/2015) (données O.N.M).*

Année	Station de Tamanrasset	Station de l'Assekrem	Année	Station de Tamanrasset	Station de l'Assekrem
1980-1981	53,6	72,7	1998-1999	23,6	108,3
1981-1982	28,3	75,7	1999-2000	37,7	87,5
1982-1983	58,3	129,4	2000-2001	17,3	116,7
1983-1984	2,5	156,2	2001-2002	39,7	62,5
1984-1985	52,7	34,9	2002-2003	124,9	179,2
1985-1986	10,2	45,8	2003-2004	28,7	162,5
1986-1987	42,3	66,7	2004-2005	127,4	58,3
1987-1988	73,7	95,8	2005-2006	121,1	370,8
1988-1989	38,2	183,3	2006-2007	62,4	204,2
1989-1990	38,9	62,5	2007-2008	30,1	60,4
1990-1991	75	58,3	2008-2009	22,3	39,1
1991-1992	46,8	120,8	2009-2010	71,8	156,4
1992-1993	18,7	50	2010-2011	59,1	119,8
1993-1994	48,8	254,2	2011-2012	56,1	107,6
1994-1995	84,3	208,3	2012-2013	24,4	26,6
1995-1996	63	187,5	2013-2014	77,4	122,5
1996-1997	58,4	182,5	2014-2015	91,3	236,9
1997-1998	36,3	129,2			

L'évolution de la chronique des précipitations annuelles sur les stations de Tamanrasset et de l'Assekrem (Fig. 24) met en évidence les variabilités, temporelle et spatiale, de la pluviométrie au niveau de la zone d'étude.

Elle permet de constater que la hauteur des précipitations est très variable d'une année à l'autre et qu'il existe des années très pluvieuses qui atteignent leur extremum à Tamanrasset en 2004/2005 (127 mm) et à l'Assekrem en 2005/2006 (370 mm). Le minimum enregistré a été de 2.5 mm à Tamanrasset en 1983/1984, et de 26.6 mm à la station de l'Assekrem en 2012/2013. Pour la période considérée (1980 /2015), le graphique de la figure 24 indique plutôt une tendance à la hausse des précipitations au cours de ladite période, pour les deux stations.

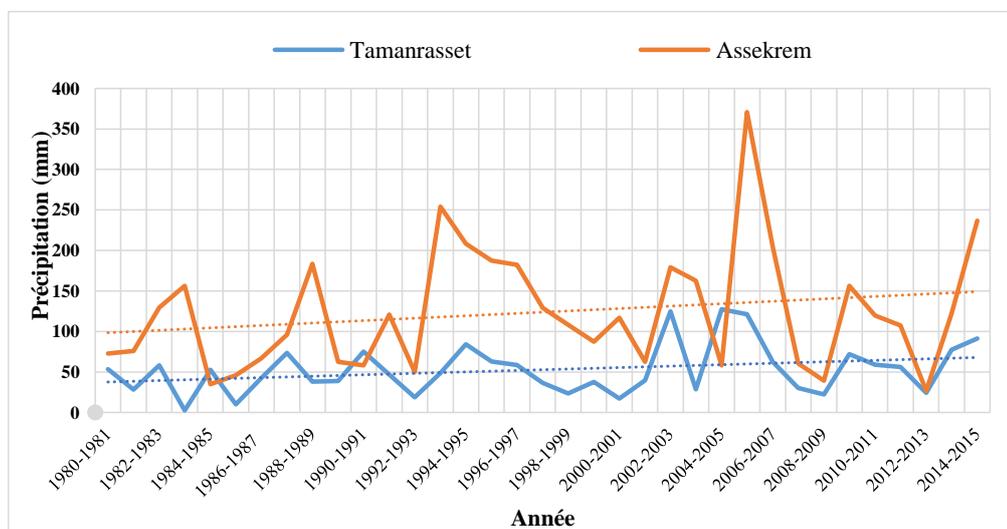


Figure 24. *Précipitations moyennes annuelles.*

Sur la période considérée, le module interannuel moyen des précipitations est de 123 mm à l'Assekrem et 58 mm à Tamanrasset.

I.3.5.2. Précipitations moyennes mensuelles :

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles enregistrées pour les deux stations sont représentées dans le tableau I.15 pour trois périodes.

Tableau. I.15 : *Précipitations moyennes mensuelles.*

Station		Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août
Précipitation (mm)	Tamanrasset (1926/1950)		7,4	1,9	1,1	1,8	3,9	1,1	0,8	1,8	6,6	3,6	3,1	9,5
	Tamanrasset (1980/2015)		5.50	7.25	0.85	1.00	1.46	1.28	5.60	1.19	2.56	7.73	7.29	11.01
	Assekrem (1980/2015)		20.21	13.70	6.61	4.18	3.69	2.14	7.61	4.76	7.87	13.02	16.04	23.53

Les histogrammes de variation des précipitations moyennes mensuelles (Fig. 25) permettent de distinguer pour la période 1980/2015 :

- Une saison pluvieuse qui s'étale d'avril jusqu'à septembre, où la hauteur des pluies atteint son maximum en août (23.53 mm) à la station de l'Assekrem et 11 mm à la station de Tamanrasset. Il en a été de même pour le même mois de la période plus ancienne 1926/1950 de la station de Tamanrasset : 9.5 mm.

Une saison sèche, d'octobre ou novembre à février pour les deux stations.

Il est à signaler que la moyenne de la hauteur de pluie importante constatées au mois de mars au niveau des deux stations au cours de la période 1980/2015 a été fortement majorée par les valeurs exceptionnelles enregistrées au cours du mois particulier de mars 2015 au niveau des deux stations : Assekrem (96 mm) et Tamanrasset (47 mm).

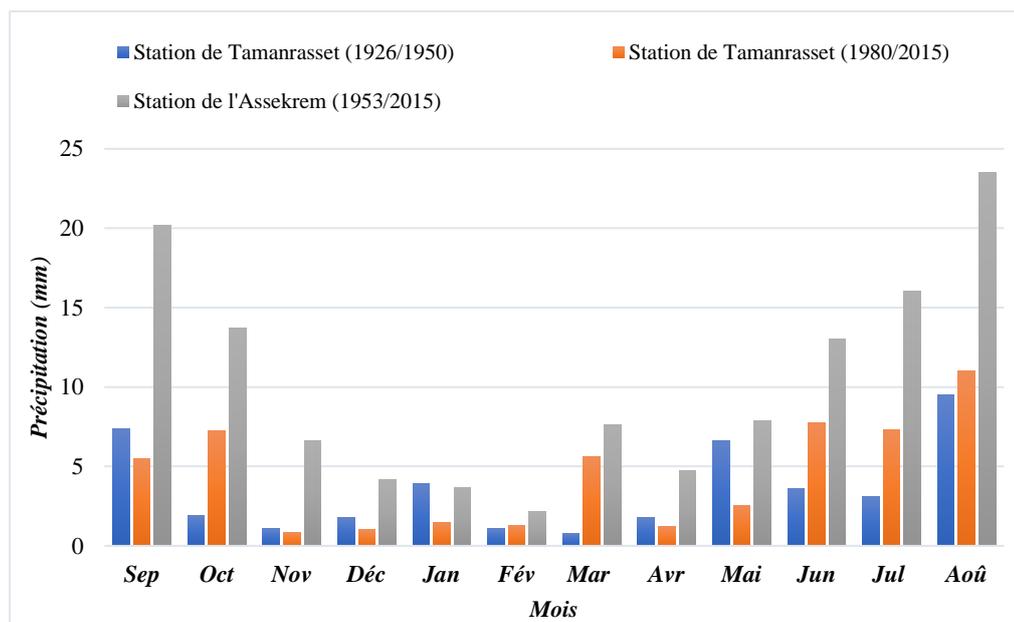


Figure 25. Précipitations moyennes mensuelles.

▪ **Généralité sur le régime des précipitations dans la région du Hoggar.**

Selon J. Dubief (1953), le régime des précipitations dans la région du Hoggar est sous la dépendance des deux facteurs :

- 1- La présence de masses d'air humide au sol ou à moyenne altitude. Ces masses d'air humide nécessaires à la production des précipitations notables proviennent, en hiver, des régions lointaines de la Méditerranée ou de l'Atlantique, et du printemps à l'automne, des régions plus voisines du Soudan qui sont elles-mêmes d'autant plus humides que l'été est plus proche. De ce facteur découle toutes choses égales une fréquence pluviométrique croissante de l'hiver à l'été.
- 2- Une structure favorable de la basse atmosphère et aussi l'existence de mouvements convectifs. La présence d'air humide est en effet insuffisante à elle seule pour produire de la pluie s'il n'y a pas une structure appropriée de la basse troposphère. En particulier, il ne faut pas qu'il y ait des inversions de température en altitude, si fréquentes au Sahara qui limitent le développement vertical des formations nuageuses. Ces conditions favorables se rencontrent lors du passage des dépressions soudano-sahariennes et assez fréquemment en été lors de l'invasion de l'Ahaggar par la mousson soudanaise.

Dans la région de Tamanrasset, ce régime climatique régional contrôle le régime des crues de l'Oued Tamanrasset également sous la dépendance des fortes pentes des montagnes et leur imperméabilité qui favorisent un ruissellement élevé (voir le sous chapitre relatif à l'hydrologie).

D'après ses observations sur la région de Tamanrasset, J. Dubief (1953) note que le ruissellement local commence dès qu'il est tombé 5 mm de pluie à une vitesse supérieure à 0,5 mm/min. Il cesse peu après celle-ci, en 30 minutes au maximum.

Le tableau ci-après renferme exemples de quelques fortes intensités de la pluie à Tamanrasset

Tableau. I.16 : Exemples de quelques fortes intensités de la pluie à Tamanrasset (d'après J. Dubief, 1953)

Date	Quantité précipitée en mm	Durée en minute	Intensité en mm/minute
14 avril 1948	12,3	10	1,23
13 septembre 1950	37	40	0,92
22 mai 1933	20	30	0,66
24 mai 1933	47,1	85	0,55 (a)
5 août 1932	12,5	45	0,28 (b)
a) La presque totalité de la pluie tomba en 20 minutes			
b) Dans le temps est compris la durée de la pluie fine qui précéda et succéda à l'averse torrentielle.			

Ce tableau fait apparaître que les intensités de pluie les plus élevées correspondent à des quantités de pluie tombée sur une faible durée.

I.3.6. Synthèse climatique :

Il est important de déterminer le type de climat affectant notre région. Cela passe par l'usage de différents indices conventionnels et empiriques. Nous allons appliquer à notre région certains parmi les plus connus.

I.3.6.1. Indice d'aridité :

L'aridité peut s'exprimer quantitativement par différents indices d'aridité, la plupart, simples rapports hydro-thermiques fondés principalement sur des grandeurs moyennes de précipitations et de température, qui sont utilisés pour définir les degrés d'aridité et les conditions de l'écoulement fluvial.

a. Indice d'aridité annuel de E. De Martonne (1926) :

Il est donné par la formule suivante :

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

Avec : P : précipitations moyennes annuelles

T : Températures moyennes annuelles

Les valeurs de la classification de type du climat et les valeurs de (I) calculées sont citées dans le tableau suivant :

Tableau. I.17 : Valeurs de l'indice d'aridité annuel de E. De Martonne.

Valeur de I	Type de climat	Station	Résultat de I	Observation
0-5	Hyperaride	Tamanrasset	1.6	Hyperaride
5-10	Aride			
10-20	Semi-aride	Assekrem	5.4	Aride
I > 20	Humide			

D'après cette méthode, la région d'étude se caractérise par un climat aride à hyperaride.

b. Indice d'aridité mensuel (I_m) de E. De Martonne :

Il est exprimé par la relation suivante :

$$I_m = \frac{12 p}{t + 10}$$

Avec :

p : Précipitations moyennes mensuelles.

t : températures moyennes mensuelles.

Les résultats de (I_m) sont donnés dans le tableau I.18 :

Tableau. I.18 : Valeurs de l'indice d'aridité mensuel (I_m) de E. De Martonne.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août
Station												
Tamanrasset	1.8	2.6	0.4	0.5	0.8	0.6	2.3	0.4	0.8	2.3	2.2	3.4
Assekrem	9.2	7.3	4.2	2.9	2.6	1.3	4.3	2.3	3.6	5.9	7.3	10.5

D'après ce tableau, pour la station de Tamanrasset, tous les mois ont des valeurs de I_m inférieures à 5, ce qu'explique que le caractère général du climat soit hyperaride. Pour la station de l'Assekrem, seuls les mois de novembre jusqu'à mai se caractérisent par un climat hyperaride et les autres mois se caractérisent par un climat aride.

I.3.6.2. Le quotient pluviométrique d'Emberger :

Emberger propose de calculer un indice climatique tel que :

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

Avec : Q_2 : quotient pluviométrique d'Emberger

M : moyenne des maximas du mois le plus chaud (en ° Kelvin)

m : moyenne des minimas du mois le plus froid (en ° Kelvin)

Tableau. I.19 : Valeurs du quotient pluviométrique d'Emberger.

Station	P (mm)	M (en ° Kelvin)	m (en ° Kelvin)	Q_2
Tamanrasset	52.7	303.8	285.9	9.97
Assekrem	123.3	291.4	279.25	35.5

Le report des valeurs de Q_2 sur le climagramme de L. Emberger nous permet de constater que la région d'étude se caractérise par un climat saharien. La station de l'Assekrem apparaît plutôt à la limite entre le domaine des zones semi-aride et aride.

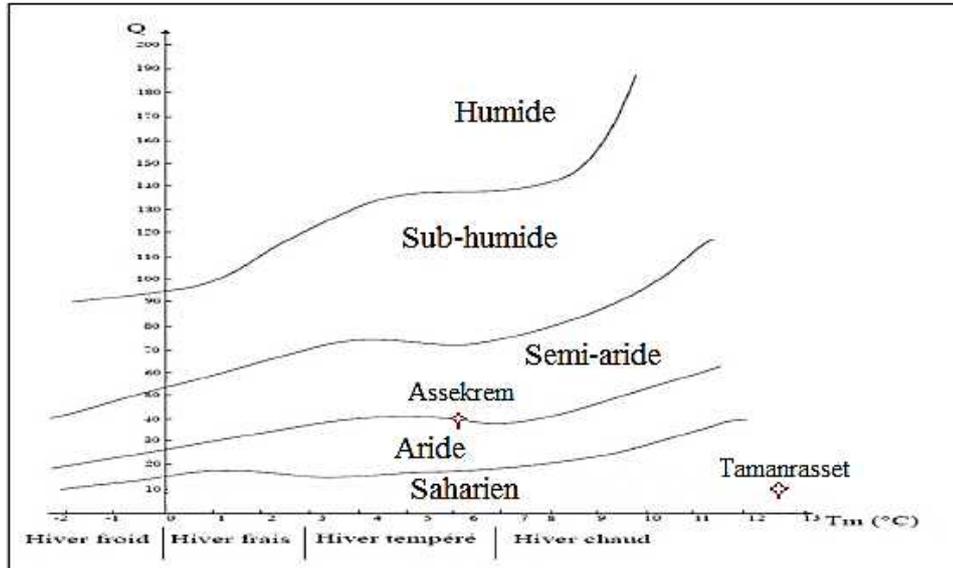


Figure 25. Détermination du régime climatique de deux stations à partir du quotient pluviothermique d'Emberger.

I.3.6.3. Indice pluviothermique annuel de Moral IM :

Selon cet auteur, l'application de cet indice au Sahara permet de fixer la limite de la zone aride pour un coefficient égale à l'unité.

Le climat est considéré comme : - Sec, lorsque $IM < 1$

- Humide, lorsque $IM > 1$.

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

Avec : P : précipitation moyenne annuelle

T : température moyenne annuelle

L'application de cet indice aux stations de Tamanrasset et de l'Assekrem aboutit à des valeurs respectivement 0.11 et 0.52. Il en découle que la région d'étude est située dans une zone à climat sec.

I.3.6.4. L'indice Ombrothermique de Gaussen :

Cet indice a été proposé par Gaussen en 1952. Il est largement utilisé pour sa simplicité et son efficacité. L'indice de Gaussen s'exprime par un diagramme ombrothermique qui permet de calculer la durée de la saison sèche. Il tient compte des précipitations et des températures moyennes mensuelles qui sont portées sur deux axes. Sa formule est : $P = 2 T$

Où, P : précipitations mensuelles en mm,

T : températures moyennes mensuelles en °C.

Cette représentation met en évidence les périodes sèches et les périodes pluvieuses. On souligne une période sèche, chaque fois que la courbe des précipitations passe au-dessous de la courbe des températures.

La figure 27 présente, les diagrammes ombrothermiques correspondant aux deux stations de la zone d'étude.

Ce diagramme montre que dans le cas des deux stations, la courbe thermique est entièrement positive par rapport à celle de la courbe ombrique, ce qui montre grosso modo que la période sèche s'étale sur tous les mois de l'année.

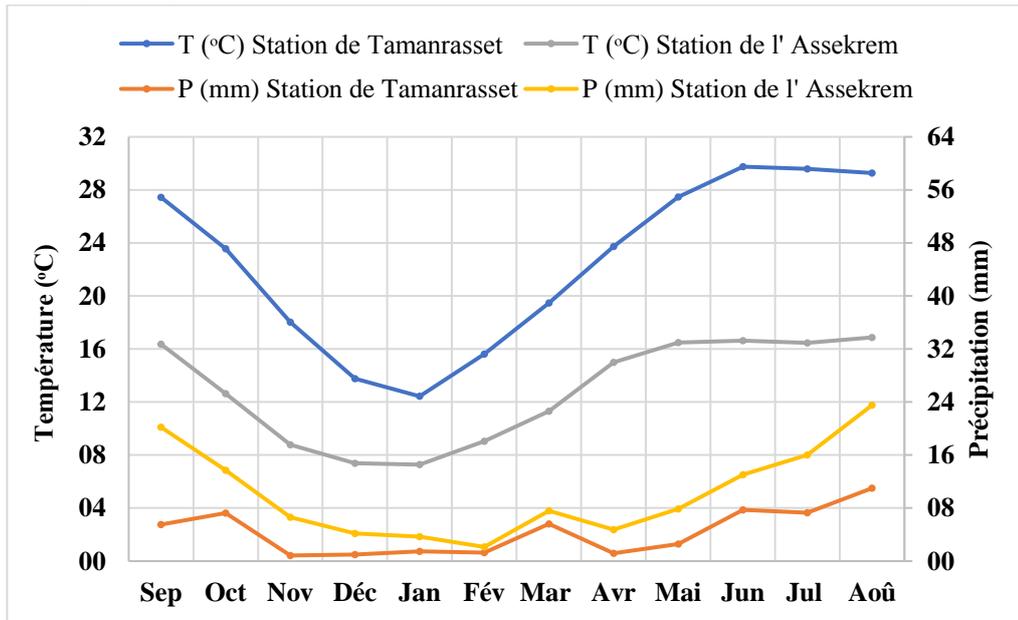


Figure 27. Diagramme ombrothermique de Gaussen des appliqués aux stations de Tamanrasset et de l'Assekrem.

I.4. Contexte géologique :

I.4.1. Grands traits géologiques du Hoggar :

Le socle cristallin du Hoggar appelé également "bouclier targui" est une chaîne plissée d'âge protérozoïque supérieur ou paléozoïque, qui s'étale sur une surface de près de 500 000 km². Ce socle correspond à un vaste bombement d'environ 700 km de diamètre, qui s'allonge du nord-est au sud-ouest. Ce bombement qui correspond un soulèvement de la lithosphère serait d'âge ancien mésozoïque et Cénozoïque (Lesquer et al., 1988)

Ce socle cristallin fait partie de la chaîne panafricaine transsaharienne (Chen et al., 1984). Il a subi une évolution orogénique complexe au cours du protérozoïque supérieur, à savoir une subduction suivie d'une collision entre le craton ouest africain et une zone mobile orientale (Black et al., 1979). Le bouclier est découpé en blocs lithologiquement différents (Lelubre, 1952) par des zones mylonitiques subméridiennes attribuées à des jeux en décrochement d'âge panafricain tardif (Caby, 1968 ; Vitel, 1975, 1979). Trois grands domaines structuraux ont été définis au Hoggar, séparés par des linéaments majeurs (Bertrand et Caby., 1978) ayant une orientation subméridienne : 4°50' et 8°30'.

Ce sont d'Ouest en Est : la chaîne pharusienne, le Hoggar central et le Hoggar oriental (Fig. 28).

Comme signalé dans la présentation de la région d'étude (sous-chapitre I.1), notre zone d'étude se positionne dans la partie Ouest du panneau du Hoggar central (Fig. 1).

L'étude de zones myloniques particulièrement développées dans le Hoggar central montre que deux processus distincts dans le temps sont responsables de leur formation :

- une déformation précoce en relation avec une tectonique tangentielle profonde,
- une déformation tardive concentrée dans des couloirs mylonitiques à foliation verticale en relation avec des coulissages.

Plusieurs auteurs ont contribué à l'étude et à l'amélioration des connaissances de l'histoire géologique du Hoggar. De cette importante masse des données bibliographiques, une synthèse succincte est portée sur :

- les formations précambriennes du socle d'âge Paléoprotérozoïque ;
- les formations de couverture.

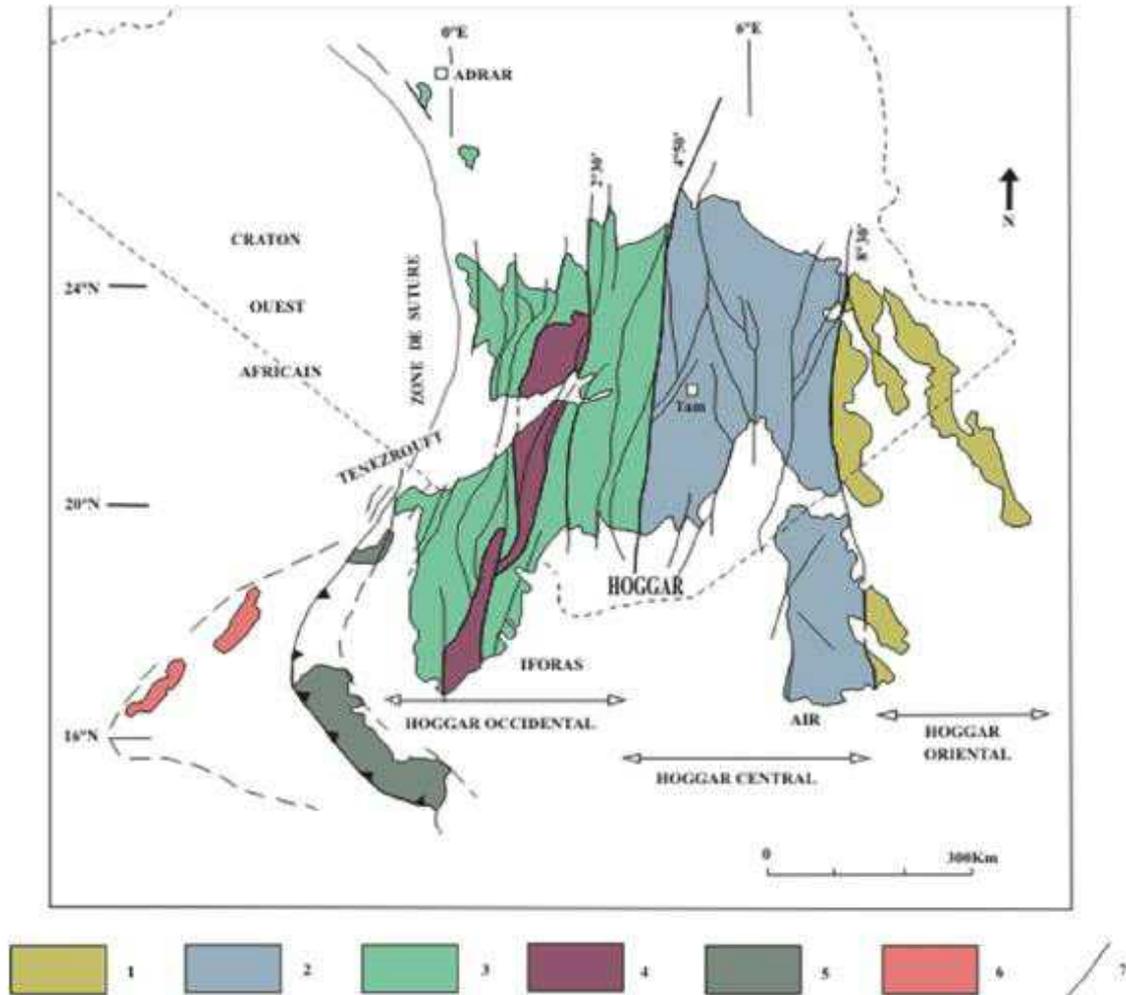


Figure 28. Carte des principaux domaines structuraux du Bouclier Touareg (d'après Caby et al., 1981, modifié par Boullier et al., 1991). 1 : Hoggar Oriental; 2 : Hoggar central et Air ; 3 : Hoggar occidentale ; 4 : Môle granulitique d'In Ouzzal et des Iforas ; 5 : Nappes du Grouma et du Timertine ; 6 : Craton ouest africain ; 7 : Failles.

I.4.1.1. Le Hoggar oriental :

Le Hoggar oriental est caractérisé par deux socles séparés par un rameau linéaire très étroit, et une couverture présentée par la chaîne Tiririnienne.

- **Les formations du socle :**

On peut distinguer : (Fig. 29).

- **Le socle de l'Ouest (mole Issalane) :**

C'est un bloc homogène d'élongation N-S s'étendant sur plus de 60 km, qui borde la limite occidentale de l'accident 8°30'. Il est formé de métasédiments (métapelites, marbres), de metabasites, de gneiss souvent alcalins et de migmatites.

- **Le socle de l'Est (formation Tafassasset-Djanet) :**

Il diffère du mole Issalane par sa lithologie (abondance des termes volcano-détritiques), par l'énorme développement de granodiorites tardi-tectoniques, datés autour de 725 Ma (Caby et al., 1987).

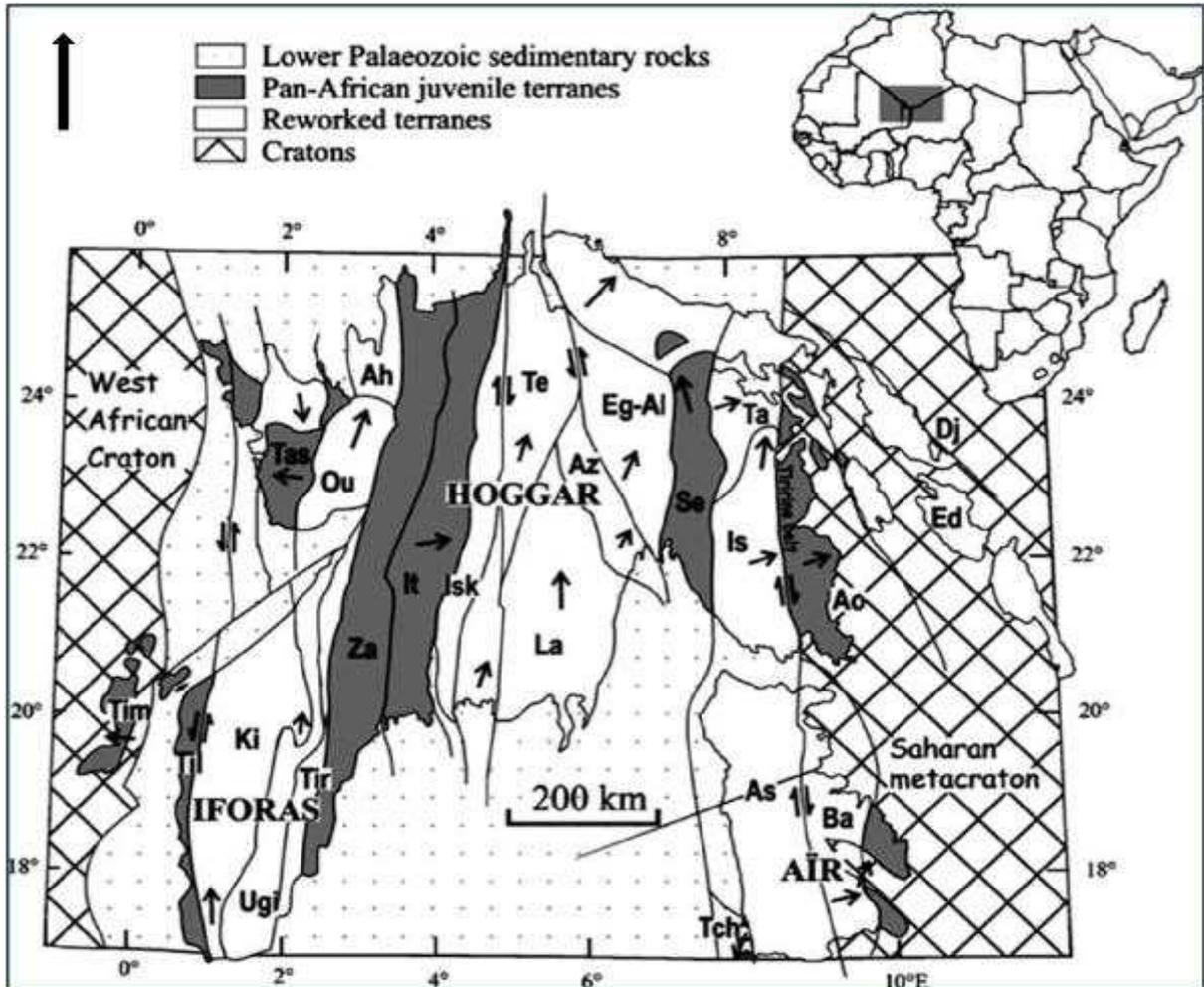


Figure 29. Carte des 23 blocs [terrane] du bouclier Touareg (d'après Black et al., 1994). Flèches pleines: direction du mouvement. De l'Est vers l'Ouest, les 23 terranes sont : Dj : Djanet, Ed : Edembo, Ao : Aouzegueur, Ba : Barghot, As-Is : Assodé-Issalane, Tch : Tchilit, Ta : Tazat, Se : Serouenout, Eg-Al : Egéré-Aleksod, Az : Azou-n-fad, Te : Tefedest, La : Laouni, Isk : Iskel, It : In Tedeini, Za : Tin Zaouatene, Tir : Tirek, Ah : Ahnet, Ou : In Ouzzal, Uni : Unité granulitique des Ifores, Tas : Tassendjanet, Ki : Kidal, Til : Tilemsi, Tim : Timétrine.

• **La couverture :**

La chaîne Tiririnienne longe la bordure occidentale de la zone de cisaillement 8°30' dont l'évolution sédimentaire et orogénique serait ensialique (Blaise 1976 ; Bertrand et al 1978). Elle est essentiellement sédimentaire et repose en discordance sur le socle du domaine Tafassasset-Djanet. La nature pétrographique de ces sédiments montre qu'ils dérivent entièrement du domaine Tefassasset-Djanet.

I.4.1.2. Le Hoggar central :

Il représente la partie médiane du bouclier, limité à l'Ouest par l'accident 4°50' et à l'Est par l'accident 8°30'. Il s'agit d'un système de roches précambriennes très métamorphisées (Suggarien) recoupé par des épanchements volcaniques finis par une couverture Tertiaire et Quaternaire. Ce domaine comporte très peu de matériel sédimentaire ou volcanique d'âge protérozoïque supérieur ne formant que de sillons étroits allongés N-S (Bertrand et al., 1984). Deux groupes de métasédiments de l'Arechchoum et de l'Aleksod ont une lithologie très semblable mais dans la région de l'Aleksod, des dykes basiques ont permis leur distinction (Bertrand 1974).

- La série de l'Arechchoum :

Représente la formation la plus ancienne, elle est constituée de gneiss gris tonalitiques ayant un âge proche de 2000 Ma (Bertrand 1974, Bertrand et Lasserre, 1976), et d'orthogneiss granitiques associés à quelques rares métasédiments (Fig.29).

- La série de l'Aleksod :

La série de l'Aleksod comprend essentiellement des métasédiments et repose en discordance structurale sur la série de l'Arechchoum. Elle est séparée de cette dernière par un cisaillement profond, lié à l'empilement de nappes panafricaines datées à 615 Ma (Bertrand., 1986).

I.4.1.3. La chaîne pharusienne (le Hoggar occidental) :

Il est limité à l'Ouest par le craton Ouest-africain à noyaux d'âge Archéen. A l'Est, il est séparé du Hoggar central par l'accident subméri dien 4°50'. Deux rameaux y sont distingués (Occidental et oriental, Caby, 1970 ; Black, 1978), séparés par le môle granulitique de In-Ouzzal, lequel est constitué de formations archéennes, structurées et métamorphisées à l'Eburnéen (Ferrara et Gravelle ; 1966, Allegre et Caby ; 1972, Lancelot et al ; 1976, Haddoum ; 1984).

D'un point de vue lithologique, le Hoggar occidental est constitué essentiellement par des séries volcano-sédimentaires d'âge néoprotérozoïque, séparées par la discordance stratigraphique infrapharusienne (Lelubre, 1952 ; Bertrand et al, 1966 ; Caby, 1969). Reposant sur un socle gneissique d'âge paléoprotérozoïque inférieur, ces deux séries sont recoupées un plutonisme orogénique d'âge néo-protérozoïque et recouvertes par une série molassique éocambrienne-cambrienne, nommé la série pourprée.

I.4.2. Evénements tectono-métamorphiques du bouclier touareg

L'histoire du bouclier touareg a enregistré le passage de plusieurs événements orogéniques, qui sont :

- un événement très ancien (archéen) daté à 2.86-3.5 Ga (Peucat et al., 1996), correspondant aux roches à facies granulitique daté de 2.99 à 3.30 Ga pour les carbonatites et à 2.86 Ga pour les charnokites dans le mole de l'In-Ouzzal (Hoggar occidental) et à 3.50 Ga pour les métasédiments de la série rouge de Gour Oumelalen (Hoggar central).

- l'événement éburnéen (birimien) daté à 2 Ga (Allègre et al., 1972 ; Latouche et al., 1974 Bertrand et Lasserre, 1976). Il a été reconnu dans le Hoggar occidental : Tassandjanet, mole

In-Ouzzal et son prolongement vers le sud Adrar des Iforas (Allegre et Caby ; 1972). Dans le Hoggar central, cet événement a été mis en évidence dans l'Aleksod, dans le Gour Oumelalen (Bertrand et Laser ; 1976, Latouche et Vidal ; 1974, Bertrand et al 1984, Peucatet *al.*, 2003) et dans les régions Tefedest et Tidjenouine (Viallette et Vitel, 1979, Bertrand *et al.*, 1986 ; Bendaoud et al., 2008).

- l'événement kibarien, défini avec incertitude (1.13 Ga sur les roche de la série d'Aleksod et 982 Ma sur les roches de la série de Toukhmatine et de Tit-n'Afra).

- l'événement panafricain entre 800 et 600 Ma (Caby et al., 1981), cet événement majeur est responsable de la structuration actuelle du Hoggar. Ces manifestations tectoniques sont très variables d'un domaine à l'autre du Hoggar.

Le contexte géologique plus détaillé des quatre secteurs d'étude sera traité dans leur description en chapitre II.

I.5. Contexte hydrogéologique de la région d'étude

1.5.1. Caractéristiques générales des aquifères en milieu de socle cristallin :

En milieu cristallin et cristallophyllien, les niveaux aquifères possibles correspondent aux altérites (arènes sableuses ou sableux argileuses) et aux fissures et/ou fractures du socle. Les caractéristiques hydrauliques des aquifères fissurés varient fortement aux échelles locales et régionales. Elles dépendent notamment : de la densité et de l'extension des réseaux de fracturation, de l'épaisseur et de la granulométrie de formations d'altération qui les recouvrent ainsi que des conditions géomorphologiques et pluviométriques locales (M. Sidoro et al, 1993). L'"horizon fissuré" est généralement caractérisé, dans les premiers mètres de profondeur, par des fractures sub-horizontales et sub-verticales en très grand nombre et dont la densité décroît au fur et à mesure que l'on descend (Cho et al., 2003 ; Maréchal et al, 2004 ; Wyns et al., 2004). La densité de fissure et leur ouverture détermine la porosité de la roche, leur interconnexion détermine sa perméabilité. Porosité et perméabilité décroissent du haut vers le bas (BRGM, 2010).

Pour comprendre le mode de fonctionnement des aquifères du socle, Wyns, 1999 a proposé un modèle conceptuel d'un profil d'altération des roches en milieu cristallin (Fig. 30).

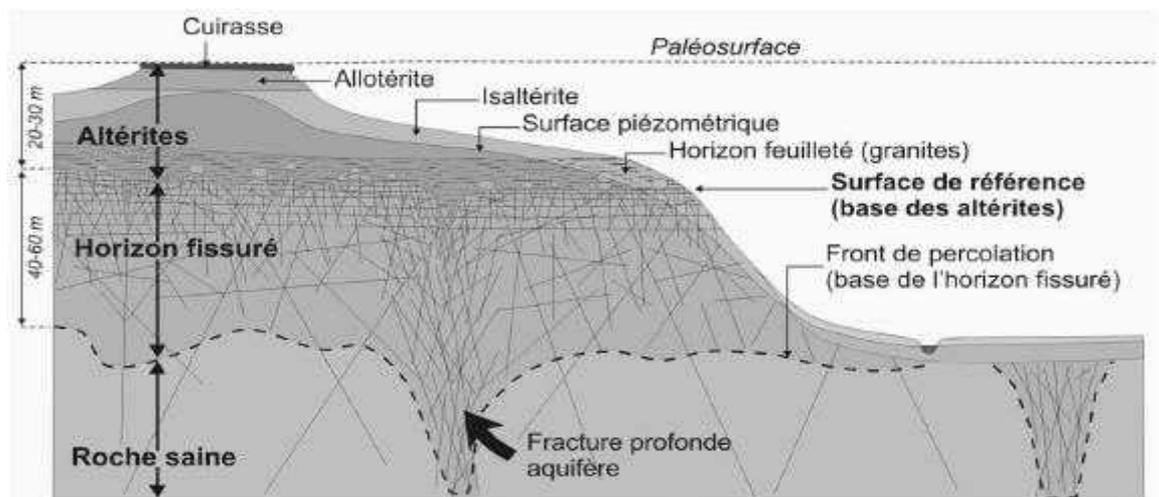


Figure 30. Schéma conceptuel de formation d'altération de roche de socle (Wyns, 1999).

Le profil d'altération type des roches de socle tel que présenté, comprend de haut en bas deux horizons principaux aux propriétés hydrodynamiques spécifiques :

- Les altérites, argileuses ou sablo-argileuses, développées en surface sur plusieurs dizaines de mètres. Cet horizon présente une porosité d'interstices significative (supérieure à 5% dans certains granites) et une perméabilité relativement faible. Il assure une fonction capacitive de stockage des eaux souterraines au sein de l'aquifère lorsqu'il est saturé. Proche de la surface, cette zone peut réagir aux variations de conditions climatiques et aux apports de surface, naturel et/ou anthropique. En zone aride ou semi-aride (massifs du Sahara, d'Arabie Occidentale et d'Australie Occidentale et centrale, etc.), les aquifères de socle sont le plus souvent dépourvus d'altérites aquifères (Margat, 2008).

- L'horizon fissuré, dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres, est constitué de roche dure, affectée par la présence de fissures. Cet horizon se situe entre la roche saine imperméable et les altérites de surface. L'origine des fissures étant souvent attribuée à la décompression (Davis et Turk, 1964 ; Acworth, 1987; Wright, 1992, cités par Lachassagne et al. 2001) résultent des contraintes engendrées par le gonflement des minéraux au cours du processus d'altération avec une fréquence décroissante de fissures avec la profondeur (Wyns et al., 2004; Lachassagne et Wyns, 2005). Plus l'altération progresse, plus l'espacement entre les fissures se rétrécit (progression de bas en haut dans le profil) jusqu'à atteindre un écart de la taille des minéraux, où la roche commence à s'aréniser. Contrairement aux altérites, ce milieu présente une perméabilité élevée et forme la partie transmissive de l'aquifère.

1.5.2. Typologie des points d'eau au Hoggar :

Quatre catégories de points d'eau se retrouvent au Hoggar :

- **Les Gueltas :** Les gueltas permanentes se forment au niveau des seuils rocheux. La plupart sont situées dans l'Atakor : Issekerassen, Afillal, Tamekrest, Tamagh-Tamagh, Imlaoulaouène, Amsel, Imeghra et Tamada sont les plus connues.
- **Les sources :** elles sont liées aux failles. La plus connue est Tahabort Tizaine (ou source Chapuis) qui se situe à 8 km à l'Est de Tamanrasset et jaillit en contrebas du batholite granitique de l'Adrar Hégguéghène (Saighi O, 1999). Ahidja se situe à 42 km au Sud de Tahabort. Tihoubagh se trouve dans la zone de Tazrouk.
- **Les puits :** généralement ces puits, creusés par des particuliers, captent essentiellement les nappes d'inféro-flux avec des profondeurs variées. Ces puits peuvent capter aussi la nappe du socle fissuré comme le cas des plupart puits de l'Oued Tamanrasset. Ils sont destinés à l'alimentation des populations en eau potable et aussi pour l'irrigation.
- **Les forages :** ils ont été réalisés pour exploiter les différentes aquifères de la région du Hoggar en particulier la nappe du socle fissurée et l'aquifère des basaltes tertiaires.

A ces quatre types des points d'eau, s'ajoute l'existence des petits ruisseaux qui coulent sur quelques kilomètres à la périphérie des coulées basaltiques et des dômes granitiques de l'Atakor : Oued Ilamane, Oued Taghouhaoût, Oued In Tounine et les oueds du col d'Azrou, etc.

1.5.3. Contexte hydrogéologique général du Hoggar :

Le contexte géologique du Hoggar conditionne l'existence de trois grands types d'aquifères tel que cela peut être décelé à travers la carte hydrogéologique du Hoggar (Fig. 31).

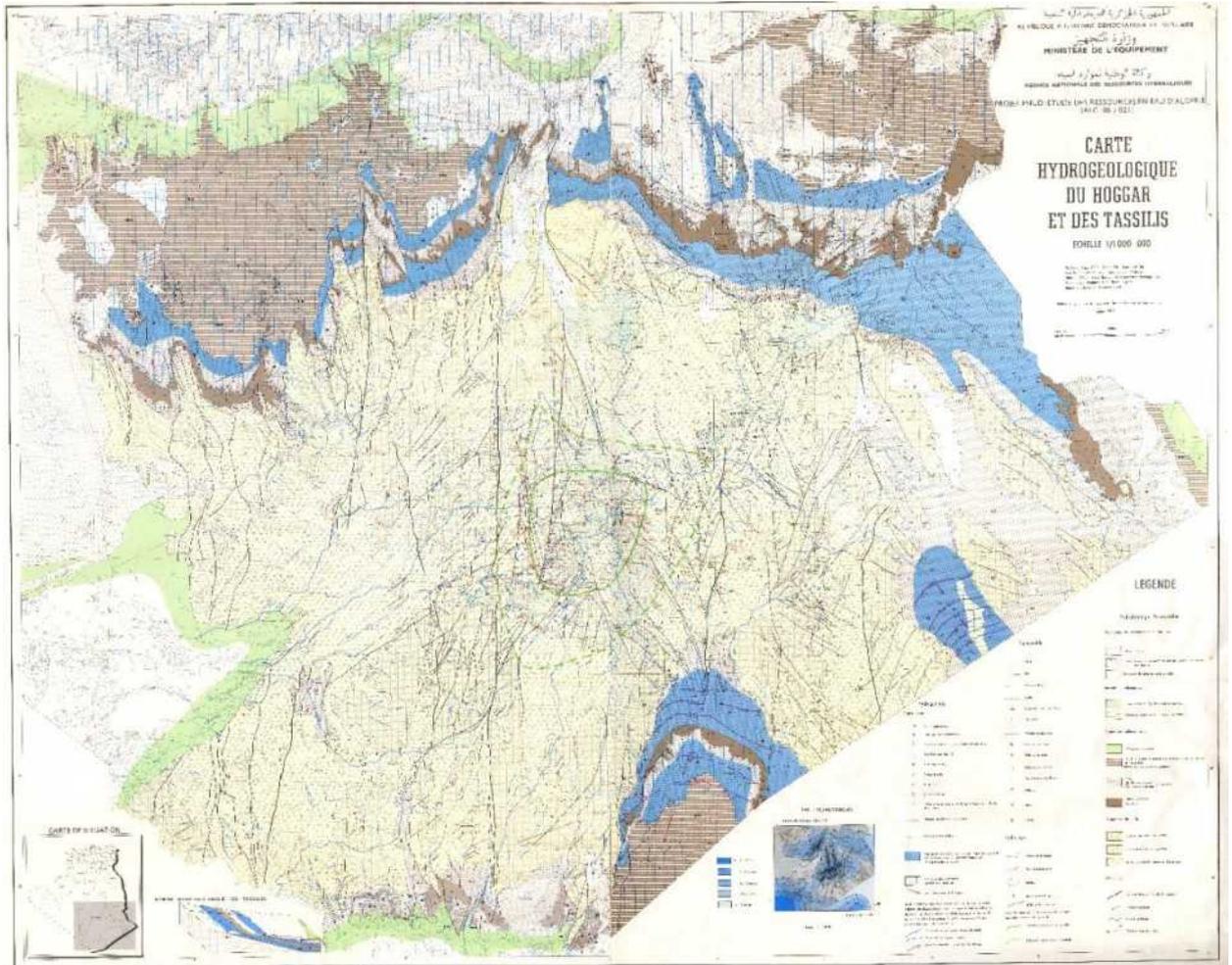


Figure 31. Carte hydrogéologique du Hoggar (ANRH, 1990).

Les aquifères ont été définis sur la base des données lithologiques, géomorphologiques, tectoniques et géologiques. Trois types d'aquifères se distinguent sur la base de la perméabilité des roches qui les constituent :

1.5.3.1. Les aquifères du socle Précambrien :

Les aquifères de socle, en terrains plutoniques (particulièrement granitiques) et métamorphiques sont très différentes des aquifères poreux en terrains sédimentaires, à cause principalement de la formation d'une porosité et d'une perméabilité secondaires. Ceci conduit à une extrême variabilité et une forte hétérogénéité des paramètres hydrogéologiques. Ces roches de socle ne constituent des aquifères qu'au niveau des 100 premiers mètres environ, siège des processus d'altération supergène (Boubakar H A, 2010).

Les terrains du socle du Hoggar sont affectés par de nombreuses fractures. Pour l'établissement de cette carte, la densité de ces fractures a été étudiée et synthétisée par interprétation des deux images satellites Landsat TM qui a fait ressortir la prédominance de trois familles principales supposées ouvertes, dans l'orientation et par ordre d'importance : N 110, N 160 et N 45.

La profondeur de la fissuration étudiée par le Burgeap en 1975 sur un échantillon de 27 forages réalisé par la Sonarem dans les lits majeurs des oueds du socle, hors de la zone de

l'Atakor, a montré que dans 59% des cas étudiés, la profondeur d'altération et de fissuration du socle est supérieure à 30 m alors que dans 33% des cas, elle est supérieure à 40 m. Dans seulement 15% des cas, elle est supérieure à 45 m.

Ce système aquifère du socle fissuré est capté par des forages dont les forages productifs ont rencontré l'eau à des profondeurs comprises entre 20 et 50 m. les débits unitaires varient de moins de 0.5 m³/h à quelques m³/h et les débits spécifiques oscillent entre 5. 10⁻² m³/h/m et 0.5 m³/h/m (ANRH 1990).

I.5.3.2. L'aquifère des basaltes d'âge Tertiaire :

Les basaltes ou formations volcaniques récentes (Cénozoïque et Quaternaire) du massif de l'Atakor et des plateaux de Silet et du haut Tafassasset présentent une porosité d'interstice ainsi que quelques fissures de moindre importance (ANRH 1990). Leur épaisseur est d'une centaine de mètres au maximum. Les basaltes bénéficient de par leur altitude et des conditions climatiques locales particulièrement favorables à une alimentation directe. Recoupés par des forages de moins de 50 m de profondeur dans le plateau de Silet, ils présentent un niveau statique compris entre 4 et 40 m de profondeur, et un débit unitaire variant entre quelques dixièmes de l/s et quelque l/s (ANRH, 1990).

I.5.3.3. Les nappes d'inféro-flux :

Ces nappes captant les alluvions quaternaires des lits d'oueds qui sont essentiellement constituées de fragments de roches arrachées au massif de l'Atakor, et la frange d'altération supérieur du socle antécambrien, surtout au-dessus de 1000 à 1200 m dans des couloirs grabbens à surépaisseur d'altérites, à extension transversale de l'ordre de 0.1 à 1 km drainant en général les systèmes fracturés du socle encaissant au-dessus de 1000 m. Elles sont alimentées uniquement à la faveur des crues des différents oueds dont elles sont tributaires. Ces nappes constituent la ressource hydrogéologique principale du Hoggar.

Chapitre II :

***Caractéristiques géologiques,
géophysiques et hydrogéologique des
sites d'étude***

II.1. Généralités sur les barrages souterrains captant les nappes d'inféro-flux :

Les digues ou barrages captant les nappes d'inféro-flux constituent une des catégories des barrages souterrains. L'objectif essentiel visé dans la création de ces derniers est l'amélioration des ressources hydrauliques d'une vallée. Par la création d'une retenue souterraine artificielle, on peut en effet aboutir à :

- l'accroissement des ressources en eaux souterraines,
- la régulation inters-saisonnière et interannuelle de ces ressources,
- le relèvement et la stabilisation du niveau de la nappe,
- le stockage d'eau à l'abri de l'évaporation et de sources polluantes éventuelles.

Un barrage souterrain à travers un aquifère, de section transversale limitée, peut servir à surélever et à fixer le niveau de la nappe qui y circule (Fig. 32).

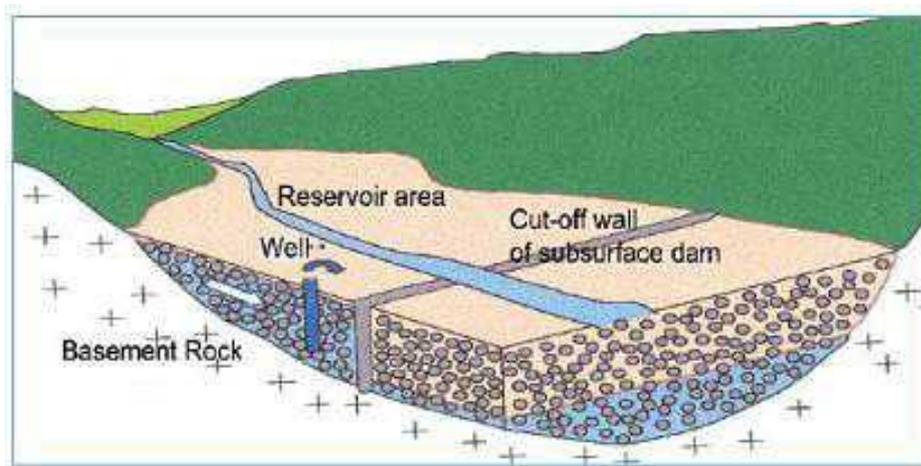


Figure 32. Coupe schématique d'un barrage d'inféro-flux (Irura 2006, in J. Barkhordari, 2015).

Les avantages des barrages souterrains sont très nombreux :

- remontée des eaux souterraines à une cote favorable d'utilisation,
- stabilisation relative de cette cote en cas d'utilisation rationnelle des eaux,
- réserve d'eau soustraite à l'évaporation particulièrement intense sous climat aride,
- possibilité de régulariser (plus ou moins suivant la capacité de la retenue) les consommations d'eau en fonction des apports pluviométriques intermittents,
- qualité de l'eau conservée : épuration naturelle au travers des alluvions et fraîcheur ; pollution par les bêtes et les hommes évitée,
- caractère définitif et fiable de l'ouvrage de captage,
- coût de fonctionnement et d'entretien peu élevé et coûts de construction pouvant être peu importants et dans certains cas favorables,
- récupération partielle ou totale des eaux de surface normalement perdues au moment des crues, et utilisation de celles-ci en épandage (cultures saisonnières),
- garantie des besoins en eau des populations et du bétail lorsque le bilan hydrologique est sérieusement calculé et lorsque les consommations sont contrôlables.

▪ **Procédés de réalisation de l'écran étanche d'un barrage souterrain :**

1- Les palplanches :

- Les **palplanches en bois (2 à 6 m)** : elles sont légères, durables dans l'eau et assurent une bonne étanchéité. Cependant leur profondeur d'emploi est très réduite, inférieure à 6 m. Elles peuvent se briser facilement sur du terrain graveleux.
- Les **palplanches en béton armé (5 à 15 m)** : elles sont durables, solides et résistantes aux agents physiques et chimiques. Leur poids est important, leur prix élevé. L'étanchéité est mal assurée.
- Les **palplanches en béton armé moulées dans le sol** : sous forme de caissons en acier de section rectangulaire de dimension inférieure à 1m x 0.2 m, et de hauteur maximale 8 m.

2- Les injections : Les voiles d'injection prolongent les fondations et les ancrages des barrages, notamment quand ces derniers sont édifiés sur des assises perméables. L'inconvénient majeur du procédé est la difficulté de pouvoir chiffrer à l'avance le coût d'un rideau injecté.

3- Les pieux jointifs : souvent employés dans la construction des barrages souterrains. Un des avantages des pieux forés est que leur mode d'exécution permet de traverser au trépan les gros blocs de pierre qui pourraient être rencontrés dans les alluvions.

4- Les parois moulées : elles sont utilisées de plus en plus pour la réalisation d'écrans étanches souterrains dans des conditions très variées. L'avantage majeur d'utilisation des parois moulées est la réalisation des profondeurs atteignant 50-100 m.

En Algérie, le premier barrage d'inféro-flux réalisé a été celui de Tadjemout, réalisé en 1952 sur le haut bassin de l'Oued Mzi (wilaya de Laghouat) (Fig. 33). C'est un barrage consistant en une digue enterrée constituée en sa partie centrale de la juxtaposition de 27 cellules en béton filtrantes, avec collecteur bas, le tout prolongée en rive gauche par des palplanches battues jusqu'au substratum sous-alluvionnaire. L'ouvrage plonge dans le sous-sol jusqu'à la rencontre du "bed-rock" à 6, 8 et 10 mètres de profondeur. La digue enterrée porte en crête une chaussée submersible formant un seuil déversant (M. Gautier, 1952).



Figure 33 : vues générales du premier barrage d'inféro-flux d'Algérie : le barrage de Tadjemout sur l'Oued Mzi (W. de Laghouat)
(a) en fin de construction en 1952 : vue de l'amont, seule est apparente la partie superficielle de l'ouvrage (M. Gautier, 1952) ;
(b) vue générale en octobre 2003, (cliché M.I. Hassani).

Dans notre région d'étude, et à titre illustratif, le barrage d'inféro-flux (BIF3) sur l'Oued Outoul est constitué :

- d'un mur paroi moulée en béton plastique pour imperméabiliser la couche alluviale,
- d'un voile injection en coulis de ciment et bentonite, destiné à l'étanchéité de la couche altérée du substratum rocheux et de liaison entre le mur paroi moulée et le substratum sain créant ainsi une étanchéité continue béton- substratum sain,
- d'une surélévation de 1,20 m par un mur en béton armé le long de l'axe du barrage pour diminuer la vitesse d'écoulement, et en conséquence, créer une recharge supplémentaire de la nappe.

I.1.1. Historique de réalisation des ouvrages de modification des conditions d'infiltration des eaux superficielles des oueds du Hoggar :

La région du Hoggar avait reconnu plusieurs études dans le but de sélectionner et de favoriser ses ressources en eau, en particulier les inféro-flux des oueds.

En 1971, V. Levassor a proposé plusieurs solutions, concernant essentiellement la modification des conditions d'infiltration des eaux s'écoulant dans les oueds pendant la période des crues. Ces solutions sont :

a- L'épandage de l'eau des crues :

Cette méthode peut être assurée par :

- La création de champs d'épandage : le champ de captage doit présenter à priori des conditions favorables à l'infiltration où un tel aménagement nécessite une topographie relativement plate et la création de digues.
- Les bassins d'infiltration : une recharge de la nappe peut assurer le passage de l'eau dans des bassins qui sont, soit de simples excavations, soit des ouvrages avec digues ou petits barrages. Il est exclu de pomper de l'eau dans l'oued et de la rejeter dans des bassins qui seraient construits sur la rive,
- Les sillons et canaux d'infiltration : cette méthode consiste à distribuer l'eau dans des sillons ou des canaux étroits, à fond plat, espacés de façon à obtenir la plus grande surface possible de contact avec l'eau. La pente doit être suffisante pour que les matériaux fins restent en suspension. La méthode peut être appliquée à des terrains irréguliers.
- L'aménagement du lit naturel de l'oued : cette méthode est une combinaison des champs d'épandage et des bassins d'infiltration. En construisant en travers de l'oued une série de digues de faible hauteur (1 m) à crête horizontale, on crée autant de biefs où le lit de l'oued tendra à devenir pratiquement horizontal. L'effet de la chute de l'eau contribuera même à creuser une petite excavation à l'amont du bief. On aura donc à la fois une surface d'épandage et un bassin d'infiltration.

Signalons que l'aménagement du lit naturel de l'oued est la principale méthode qui contrôle la mobilisation des eaux dans la région qui s'est basée sur la réalisation par un ensemble de digues en gabion, faiblement ancrées au sol, établies le long du lit des oueds. Certaines de ces digues sont implantées transversalement au lit (barrages en gabion de longueur variée selon la section de l'oued), d'autres longent ses berges. Ces digues ont pour objectifs de :

- ralentir la vitesse des crues,
- protéger les berges de l'oued
- réduire la pente de l'oued en amont, et par conséquent, favoriser l'infiltration et la recharge de la nappe pendant la période de pluie.
- accumuler les alluvions transportés par la crue; et par conséquent, participer à l'augmentation de l'épaisseur de l'aquifère.

b- La recharge de nappe par puits et tranchées d'infiltration :

En général, cette méthode s'appliquera lorsqu'il existe une couche de terrain imperméable qui empêche l'eau de s'infiltrer.

c- La création d'un barrage souterrain :

En vue d'augmenter les réserves de l'eau et diminuer le débit de perte à l'amont, et dans des conditions géologiques favorables, la création d'un barrage souterrain est envisageable.

Pour être efficace, un tel ouvrage devrait s'étendre largement au-delà de l'oued jusqu'aux limites naturelles de la nappe où l'aquifère est biseauté par la remontée du socle sain.

Depuis les années soixante-dix, les méthodes d'épandage de l'eau des crues avaient été les principaux ouvrages contribuant à la mobilisation des eaux dans les oueds de la région de

Tamanrasset. Les oueds ont commencé à connaître l'implantation de certains barrages souterrains à la fin des années quatre-vingt-dix.

Les caractéristiques de certaines digues souterraines implantées dans les oueds de la région de Tamanrasset seront décrites dans les sous chapitres suivants.

I.1.2. Données et méthodes d'étude des barrages d'inféro- flux de la région du Hoggar :

Dans le cadre des études pour la réalisation des barrages d'inféro-flux, et vue la particularité du contexte géologique de la région, les études géophysiques sont primordiales. A cet effet plusieurs études géophysiques ont été réalisées dans les vallées des oueds de la région de Tamanrasset. Les méthodes géophysiques utilisées sont essentiellement la méthode électrique (sondages électriques et réalisation de profils électriques) et la sismique réfraction. Elles comportent aussi l'exécution de sondages mécaniques. Les travaux permettent de déterminer pour chaque aquifère, la résistivité spécifique des différents horizons du remplissage alluvionnaire, leur géométrie, leur profondeur, et par conséquent la profondeur du toit du substratum sain.

La prospection électrique paraît tout à fait adaptée pour l'étude des aquifères superficiels. Les sondages électriques verticaux de type Schlumberger ont été privilégiés car bien adaptés pour :

- la détermination des résistivités des terrains superficiels (alluvions),
- la détermination de l'importance du remplissage alluvial, les caractéristiques communes des aquifères, les failles connues dans les secteurs d'étude et l'épaisseur de la tranche superficielle altérées du substratum.

La prospection électrique est souvent couplée à la sismique réfraction qui permet également la détermination de la profondeur des aquifères alluviaux si leur épaisseur est suffisante. De plus, elle donne de bons résultats sur la profondeur du substratum des alluvions à condition que celles-ci reposent sur un terrain résistant (granite sain, gneiss, etc.)

La détermination de la géométrie des aquifères en amont des barrages d'inféro-flux est également basée sur l'exploitation de données des forages réalisés dans l'objectif de la recherche des réserves d'eau souterraine pour l'alimentation en eau potable de la ville de Tamanrasset, In Amguel et les villages d'Outoul et d'Ihelfene.

Les campagnes géophysiques et les sondages mécaniques, effectués essentiellement par l'entreprise ENHYD, dans le cadre des études de la faisabilité des barrages souterrains dans ces secteurs offrent les informations nécessaires permettant de caractériser la géométrie des aquifères, et d'estimer leurs paramètres hydrodynamiques.

Dans un but à objectif géotechnique, au niveau de l'emplacement exact des digues, des essais hydrauliques tels que l'essai de Lefranc et celle de Lugeon ont également été mis en œuvre pour estimer les paramètres hydrodynamiques (perméabilités, etc.).

L'ensemble des données que nous avons pu rassembler, résultats de ces études et d'autres études (DHW, etc.), nous ont permis de caractériser les contextes hydrogéologiques détaillés de nos quatre sites d'étude autour des barrages d'inféro-flux de Tamanrasset (BIF1), d'Outoul (BIF2 et BIF3) et d'In Amguel(BIF4).

II.2. Contexte hydrogéologiques et caractéristiques des diges des quatre sites étudiés : BIF1, BIF2, BIF3 & BIF4 :

II.2.1. Secteur de du barrage de l'Oued Tamanrasset - BIF 1 :

II.2.1.1. Situation géographique :

Le barrage de l'Oued Tamanrasset est situé aux coordonnées : $22^{\circ}48'13''$ N et $5^{\circ}34'17''$ E. La zone objet de cette étude se situe entre les parallèles $22^{\circ}47'$ et $22^{\circ}52'$ de latitude Nord, et les méridiens $5^{\circ}35'40''$ et $5^{\circ}33'40''$ de longitude Est (Fig. 34). Elle couvre une superficie d'environ 7 km².

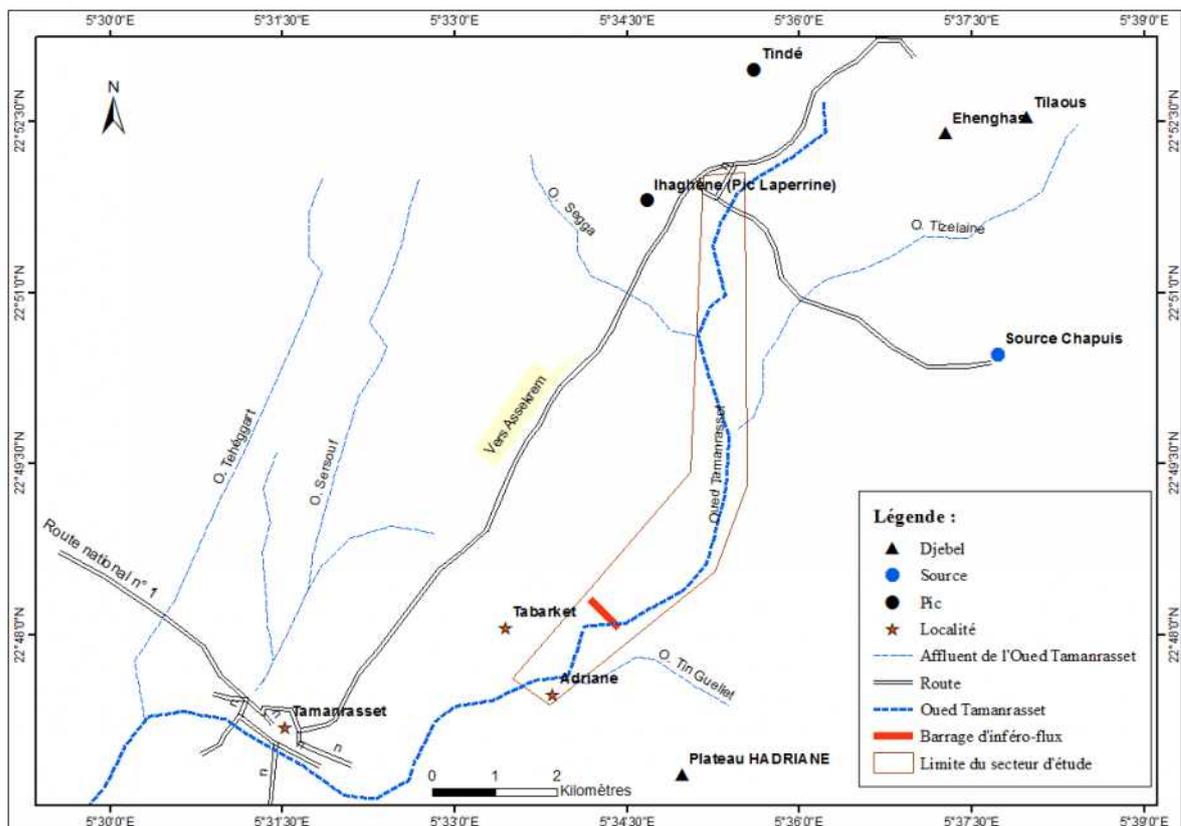


Figure 34. Situation géographique du secteur du barrage de l'Oued Tamanrasset (BIF1).

II.2.1.2. Descriptif technique du barrage BIF1 :

Le barrage souterrain de l'Oued Tamanrasset a été livré au cours de l'année 2000. C'est un mur-barrage en béton ayant 350 m de long et 15 m de hauteur maximale correspondant à l'épaisseur des alluvions. Il se prolonge dans le substratum gneissique sur une profondeur de 6.8 m. Il a été construit pour retenir une capacité d'eau de 1.2 Hm³.

II.2.1.3. Caractéristiques géologiques :

Les forages et les sondages mécaniques exécutés dans l'Oued Tamanrasset montrent la présence d'un faciès suggarien gneissique. Il s'agit d'un gneiss rubané, à grains grossiers. Ce faciès affleure en continuité morphologique sur la vallée de l'oued où il se présente en bancs d'épaisseur décimétrique à pendage très forte. La direction de la structure est NNE SSO perpendiculairement au sens d'écoulement de l'oued.

Les affleurements gneissiques se prolongent sous les alluvions dans toute l'aire d'étude et forment le substratum (Fig. 35).

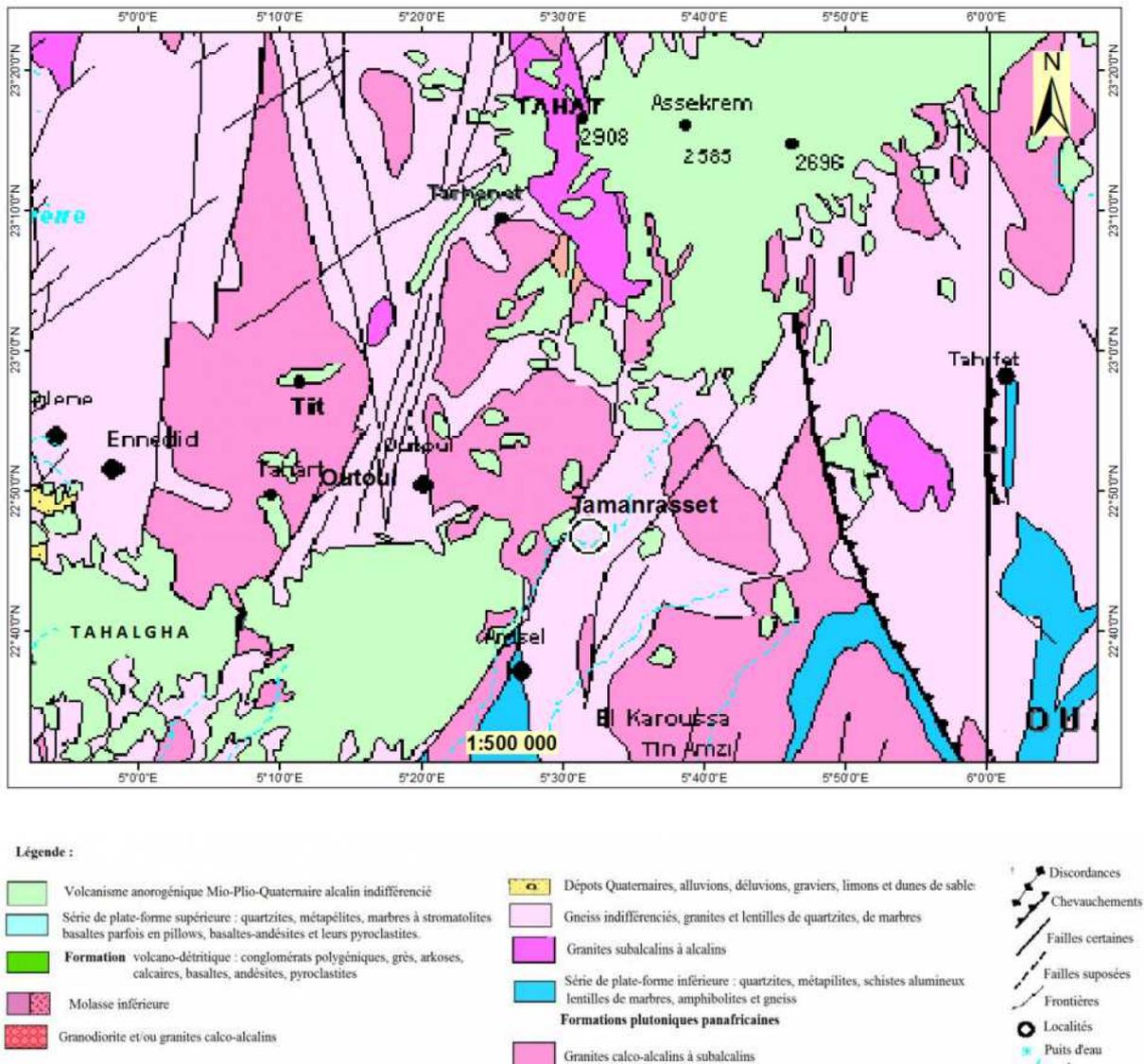


Figure 35. Carte géologique de la région de Tamanrasset (extrait de la carte géologique du massif du Hoggar, ORGM 2004).

Les dépôts alluvionnaires sont essentiellement constitués de fragments de roches arrachées au massif de l'Atakor, variées par leur dimension, leur nature et leur mode de dépôt.

II.2.1.4. Prospection géophysique :

L'Oued Tamanrasset a fait l'objet de plusieurs travaux en géophysique appliquée à l'hydrogéologie :

a- Par la Compagnie Générale de Géophysique (CGG) :

- Dès 1959 et en 1969 (in Saighi, 1984) :

La première prospection géophysique a concerné les abords de la ville de Tamanrasset et la deuxième en amont de la cuvette de l'Hadriane. La méthode électrique et la sismique réfraction avaient été utilisées conjointement, pour préciser la géométrie et les caractéristiques des niveaux aquifères.

- En 1971 et mars 1972 :

Dans le cadre de cette campagne, 53 sondages électriques, plusieurs profils sismiques de longueur totale de 9890 mètres et 09 sondages mécaniques ont été réalisés. Cette campagne avait pour but d'étudier la position structurale du socle cristallin, sa configuration et les épaisseurs du remplissage alluvial.

b- Par l'Entreprise Nationale des Etudes Hydrauliques (E.N.HYD) - 1990 :

Dans le cadre de l'étude de faisabilité d'un barrage souterrain sur l'Oued Tamanrasset, 23 sondages électriques de type Schlumberger (longueur AB variant de 150 à 200 mètres), 08 profils sismiques et 06 sondages mécaniques ont été réalisés. Cette campagne a eu pour objet la reconnaissance de la lithologie, l'épaisseur de dépôts alluviaux, la détermination de l'épaisseur de la tranche superficielle altérée du substratum ainsi que la profondeur du substratum sain, en particulier au niveau des sites proposés pour l'implantation du barrage inféro-flux.

c- Par le bureau d'étude DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE en juin 2001 :

Cette étude a eu pour but de faire ressortir les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques en vue d'une éventuelle implantation d'ouvrages de captage sur l'Oued Tamanrasset et ses affluents. A cet effet, une campagne géophysique comprenant des sondages électriques (61, de AB = 800 m), un sondage électrique d'étalonnage au niveau du forage F13, un trainé électrique et 44 stations sismiques réfraction de trois tirs normale-centré-inverse ont été effectués.

d- Par le bureau d'étude HIMEX en 2008 :

Dans le cadre de l'étude de trois barrages inféro-flux à travers la wilaya de Tamanrasset, une campagne de 09 sondages électriques a été effectuée le long de l'Oued Tamanrasset avec les mêmes objectifs des campagnes géophysiques précédentes.

• Présentation et interprétation des prospections géophysiques réalisées au niveau du secteur étudié :

Au niveau du site A :

A l'emplacement exact de BIF1 : site A (figure 36), l'étude par sondage électrique effectuée par l'ENHYD (1990) indique que les alluvions se subdivisent en trois horizons (Fig. 37) :

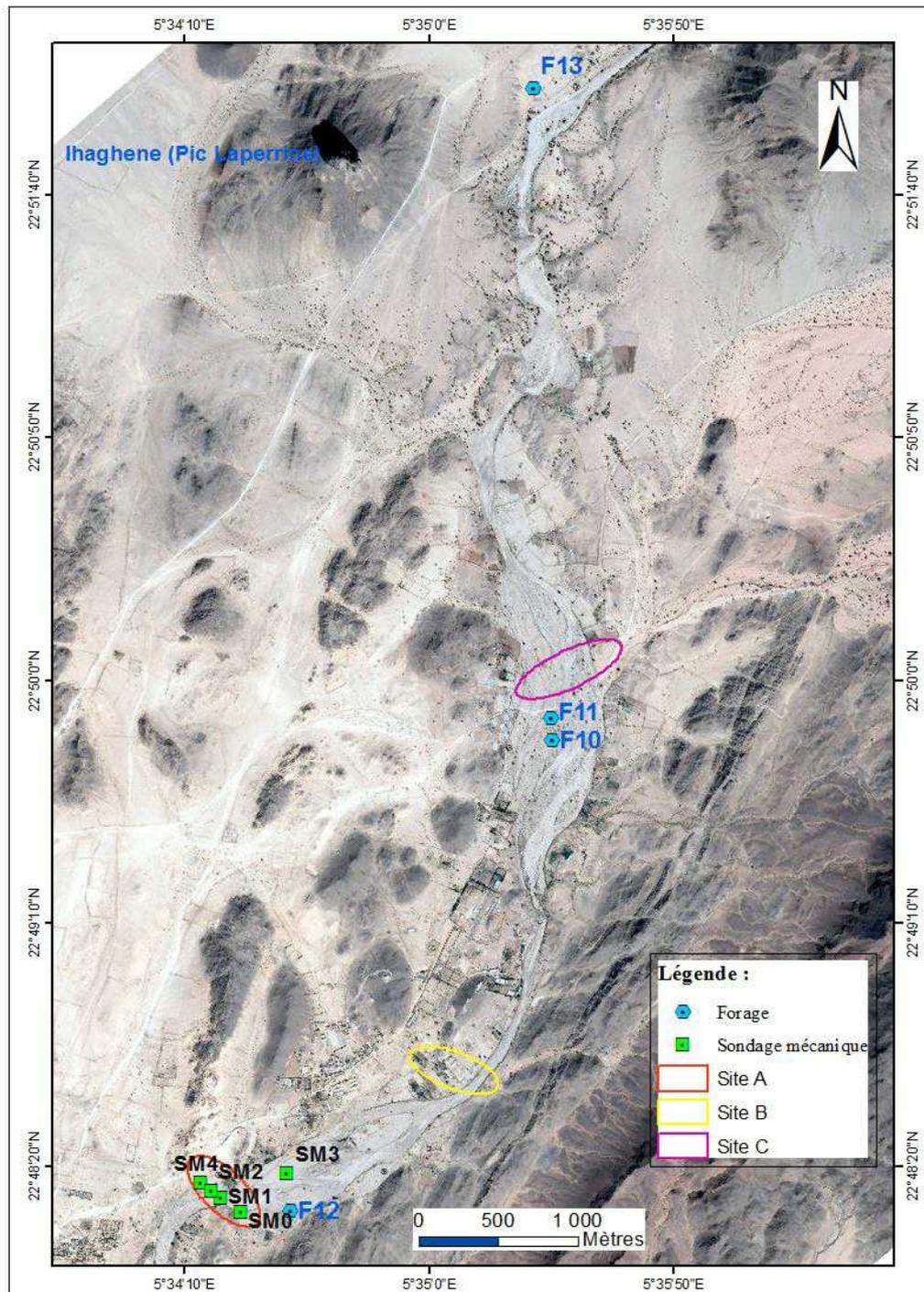


Figure 36. Localisation de différentes prospections géophysiques dans sur le site BIF 1.

- Une couche mince est caractérisée par des résistivités comprises entre 25 et 150 Ω m correspondant à des limons sableux et sables argileux, et d'autres, comprises entre 150 et 3000 Ω m, correspondant aux sables limoneux.
- La deuxième couche est à une profondeur de 3 m, dont la résistivité moyenne atteint 700 Ω m caractérisant des graviers et des sables limoneux. Un changement de faciès probable apparaît entre les sondages mécaniques SM11 et SM12.
- La troisième couche attribuée aux alluvions sèches (graviers imbibés, limons, sables, etc.), de résistivité variée entre 100 et 250 Ω m. Cette couche présente beaucoup de

variations due point de vue épaisseur. Les alluvions ayant une épaisseur de 2.5 m près de la rive droite, sont plus développées au niveau du lit de l'oued dont l'épaisseur atteint 10 m.

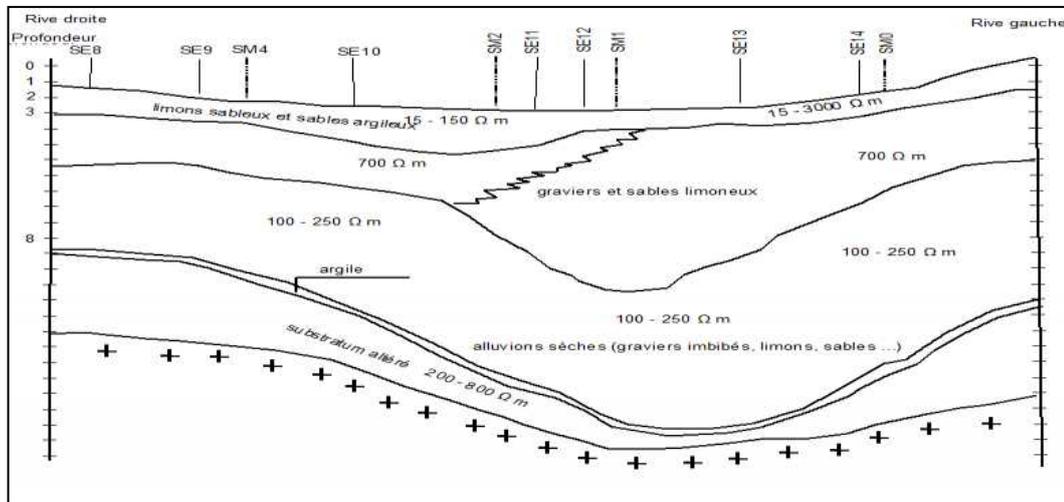


Figure 37. Coupe géoélectrique correspondante au site A (ENHYD, 1990).

Une mince couche conductrice caractérisée par une faible épaisseur, 0.8 m, et une résistivité de 30 Ω m, correspondante aux argiles, disparaît en s'approchant des deux rives. Une couche altérée sous-jacente au remplissage alluvionnaire se caractérise par une résistivité comprise entre 200 et 800 Ω m (Fig. 37).

Le toit du substratum sain est à une profondeur maximale de 15 m qui diminue progressivement jusqu'à atteindre 6 m près de la rive droite. Sa résistivité est supérieure à 1000 Ω m.

Au niveau du site B :

Les alluvions se subdivisent aussi en trois horizons (Fig. 38) :

- Une couche superficielle résistante, dont la résistivité varie entre 400 et 500 Ω m, est attribuée aux sables secs. Son épaisseur est en moyenne de 0.7 m. Elle présente des passages de 2000 à 8000 Ω m qui correspondraient probablement à la remontée du substratum.
- Au-dessous, vient une couche d'épaisseur moyenne de 3.5 m. Elle présente plusieurs variations de la résistivité :
 - dans la partie la plus proche de la rive gauche, les résistivités sont comprises entre 120 et 150 Ω m et seraient attribuées aux graviers, limons et sables,
 - la partie centrale entre les sondages SE19 et SE21 peut être attribuée aux colluvions.
- Dans la troisième couche, le remplissage alluvionnaire est plus développé. Il atteint 8.5 m d'épaisseur près des deux rives et diminue vers le centre pour atteindre 3 m. Cette faible épaisseur s'explique par une remontée du substratum.

Une couche probablement altérée sous-jacente au remplissage alluvionnaire se caractérise par une résistivité comprise entre 250 et 500 Ω m et une faible épaisseur de 1.8 m.

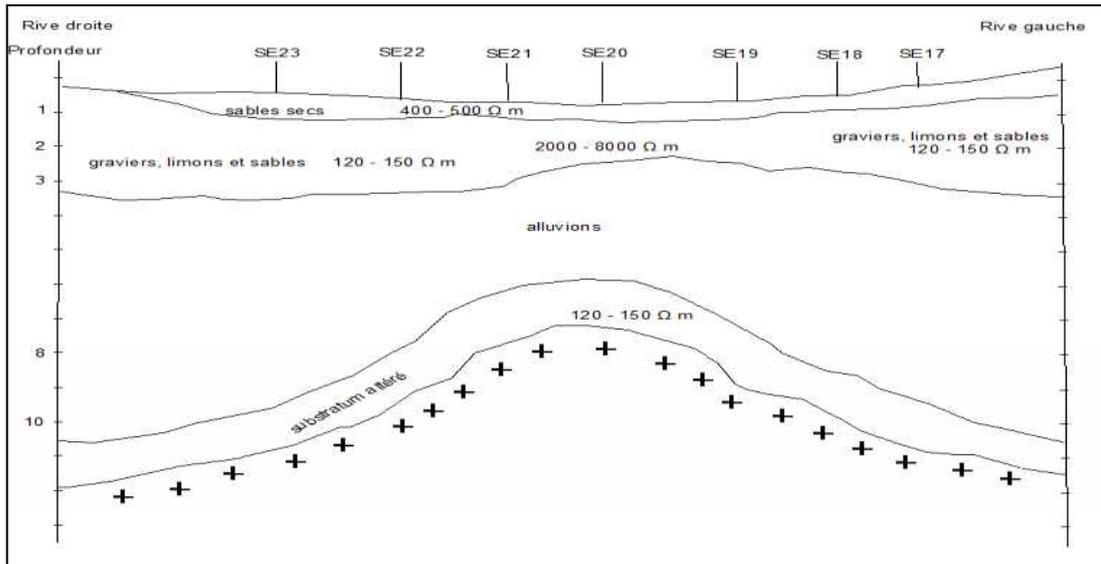


Figure 38. Coupe géoélectrique correspondante au site B (ENHYD, 1990).

Au niveau du site C :

L'application de la méthode électrique a mis en évidence quatre niveaux (Fig. 39) :

- Niveau superficiel aéré, de faible épaisseur et de résistivité supérieure à 300 Ω m. Il est composé essentiellement de sable limoneux, arènes.
- Niveau plus au moins résistant à résistivité assez variable de 25 à 500 Ω m. Il correspond au socle altéré sec et aux alluvions sèches, dont les valeurs de faible résistivité montrent la présence des argiles. L'épaisseur de cet horizon est d'environ 12 m.
- Un niveau conducteur formé d'alluvions humides de 15 à 60 Ω m et de socle altéré humide de résistivité 40 à 120 Ω m. L'épaisseur de cet ensemble varie entre 5 et 24 m. Cette variation serait causée par la morphologie du substratum. Ce niveau est généralement composé de sables, galets et d'argile.
- Un substratum très résistant se caractérisant par des valeurs de résistivité supérieures à 700 Ω m.

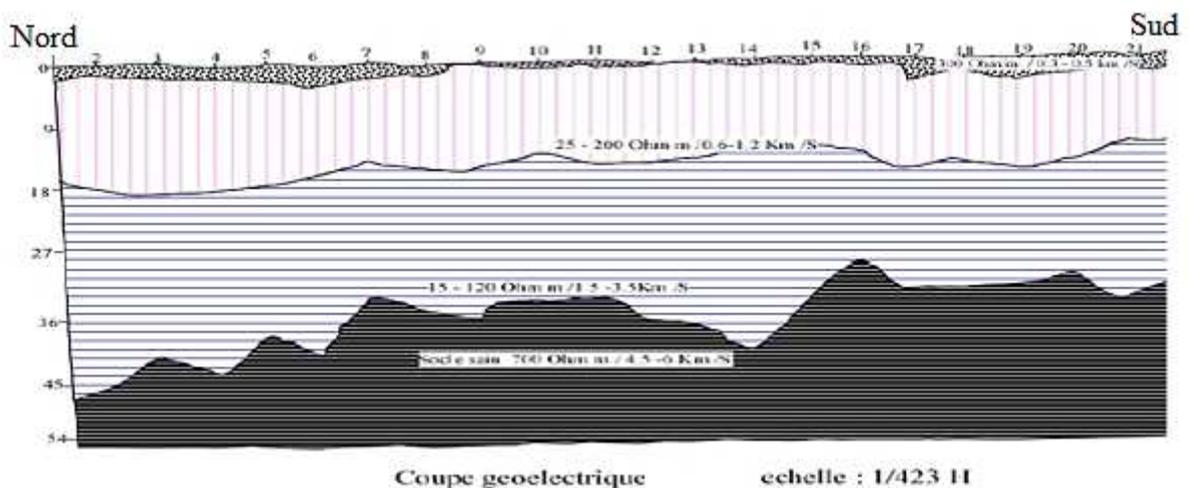


Figure 39. Coupe géoélectrique correspondante au site C (DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE, 2001).

L'analyse des résultats des prospections sismiques (dromochroniques) réalisées sur ce secteur de l'Oued Tamanrasset par *DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE* a permis la détermination de l'ensemble des vitesses qui caractérisent les quatre niveaux détectés par les sondages électriques.

La distinction entre le socle altéré et les alluvions est souvent délicate à cause de l'interférence des vitesses de propagation.

Les résultats de cette prospection sont donnés dans le tableau II.1 :

Tableau. II.1 : Résultats de la prospection sismique effectuée sur le site C (*DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE*).

Niveaux	Vitesses (km/s)	Lithologie
Niveau superficiel	0.1 – 0.5	Couche aérée
Niveau intermédiaire sec	0.6 – 1.2	Socle altérée sec, alluvions sèches
Niveau humide	1.5 – 3.4	Socle altéré humide, alluvions humides
Niveau terminal	4.5 – 6	Socle sain

II.2.1.5. Contexte hydrogéologique :

II.2.1.5.1 Géométrie de l'aquifère :

La partie étudiée de l'aquifère alluvial de l'Oued Tamanrasset s'étale sur une longueur de 11 km. En amont du barrage, la cuvette s'allonge sur près de 9 km avec des largeurs comprises entre 63 et 520 m. En aval, le lit de l'oued s'élargit. La largeur varie de 48 m et 492 m.

Cet aquifère est formé par des dépôts alluvionnaires essentiellement constitués de fragments de roches arrachées au massif de l'Atakor, variées par leur dimension, leur nature et leur mode de dépôts. Ces alluvions présentent une large gamme granulométrique (galets et grains de quartz, basalte, feldspath, etc.)

Le faciès gneissique affleure en continuité morphologique le long de la vallée de l'oued. Il se prolonge sous les alluvions dans toute l'aire d'étude et forme le substratum. Il se caractérise par une remontée au niveau du site B (Figure 38). Cela subdivise la cuvette en deux parties et par conséquent en deux réservoirs souterrains, le plus important est celui capté par les forages F10 et F11.

Les forages et les sondages mécaniques exécutés dans ce secteur d'étude montrent que les alluvions se caractérisent par des épaisseurs variantes entre 4 et 25 m. Les faibles épaisseurs se retrouvent à la partie amont de l'aquifère, 7 m en F13 (Fig. 40), et aussi au niveau de l'emplacement des sites géophysiques A (BIF1) et B, avec des épaisseurs égales respectivement à 9 m et 7 m. Une épaisseur de 4 m est observée au niveau de SM 03 (Fig. 40). Au niveau des forages F11, F10 et F12, les épaisseurs des alluvions sont très importantes, elles atteignent respectivement 24 m, 25 m, et 19 m. (Fig. 40).

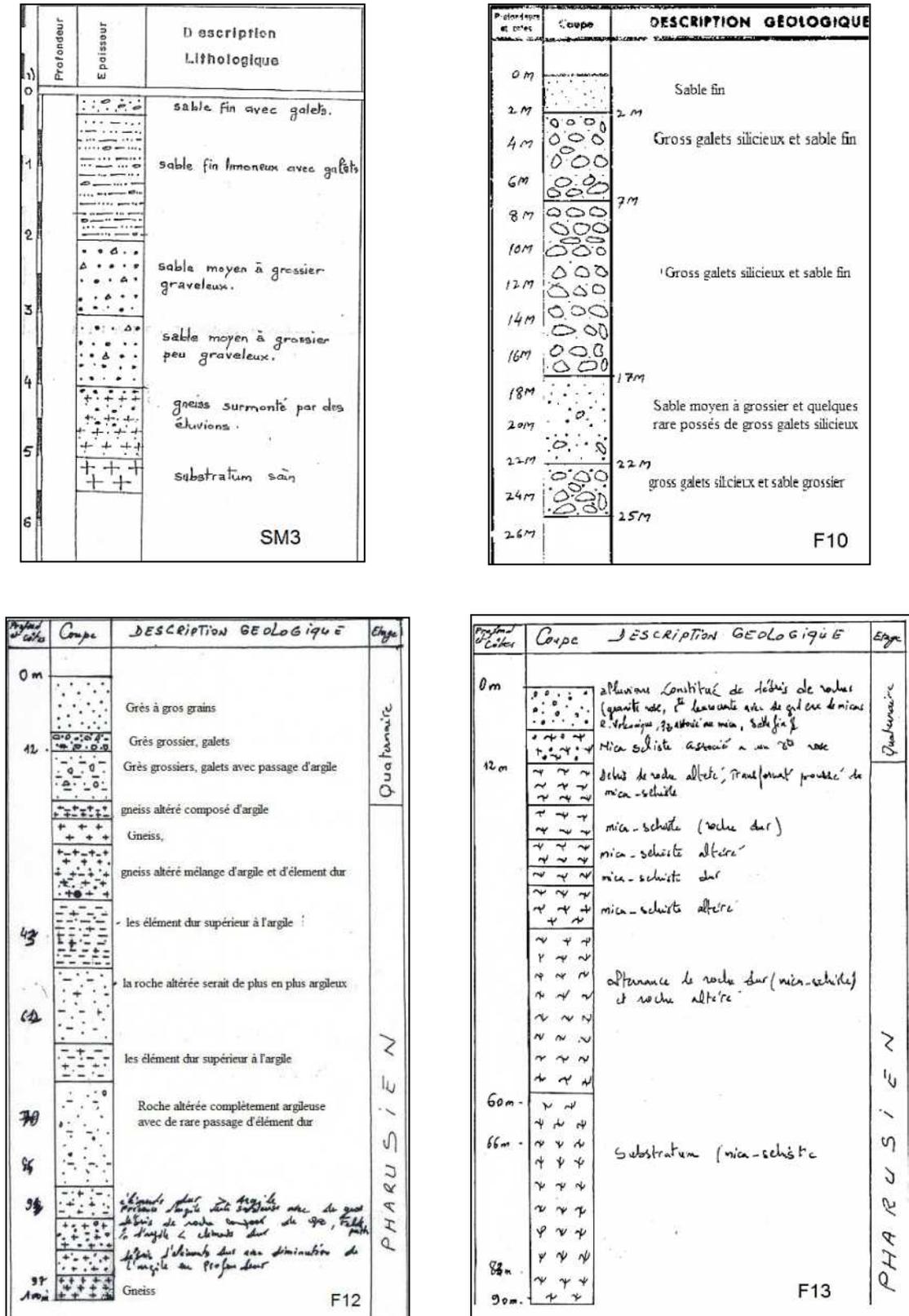


Figure 40. Coupes des forages de l'aquifère alluvial de l'Oued Tamanrasset (SM3, F10, F12 et F13)

II.2.1.5.2. Caractéristiques hydrodynamiques :

L'hétérogénéité des dépôts de l'aquifère alluvial de l'Oued Tamanrasset engendre des paramètres hydrodynamique variables en termes de perméabilité (Tableau II.2). Les valeurs de perméabilité présentées dans le tableau II.2 ont été obtenues sur la base de traitement des courbes granulométriques des échantillons prélevés au niveau du site A (ENHYD).

Tableau. II.2 : Perméabilités relevés au niveau de l'aquifère alluvial autour de BIF1 (Oued Tamanrasset) (ENHYD, 1990).

Sondage	SM1	SM2	SM4	SM0
K (10^{-5} m/s)	2,07	0,1	3,5	5,4

Ces résultats montrent des perméabilités relativement faibles.

II.2.2. Secteur du barrage de l'Oued Outoul - BIF2 :

II.2.2.1. Situation géographique :

Le barrage de l'Oued Outoul - BIF2 se situe à 20 km au Nord-ouest de la ville de Tamanrasset. Il est implanté à 3 km au nord du village éponyme situé sur la route nationale RN n°1 (Transaharienne), aux coordonnées : 22°52'36'' N et 5°20'58'' E.

Le secteur étudié autour du barrage BIF2, s'étend à 2 km en amont de la digue et à 4 km en son aval. Il est délimité par les parallèles 22° 50' 30'' et 22° 53' 20'' de latitude Nord, et les méridiens 5° 20' 20'' et 5° 21' 40'' de longitude Est (Fig. 41).

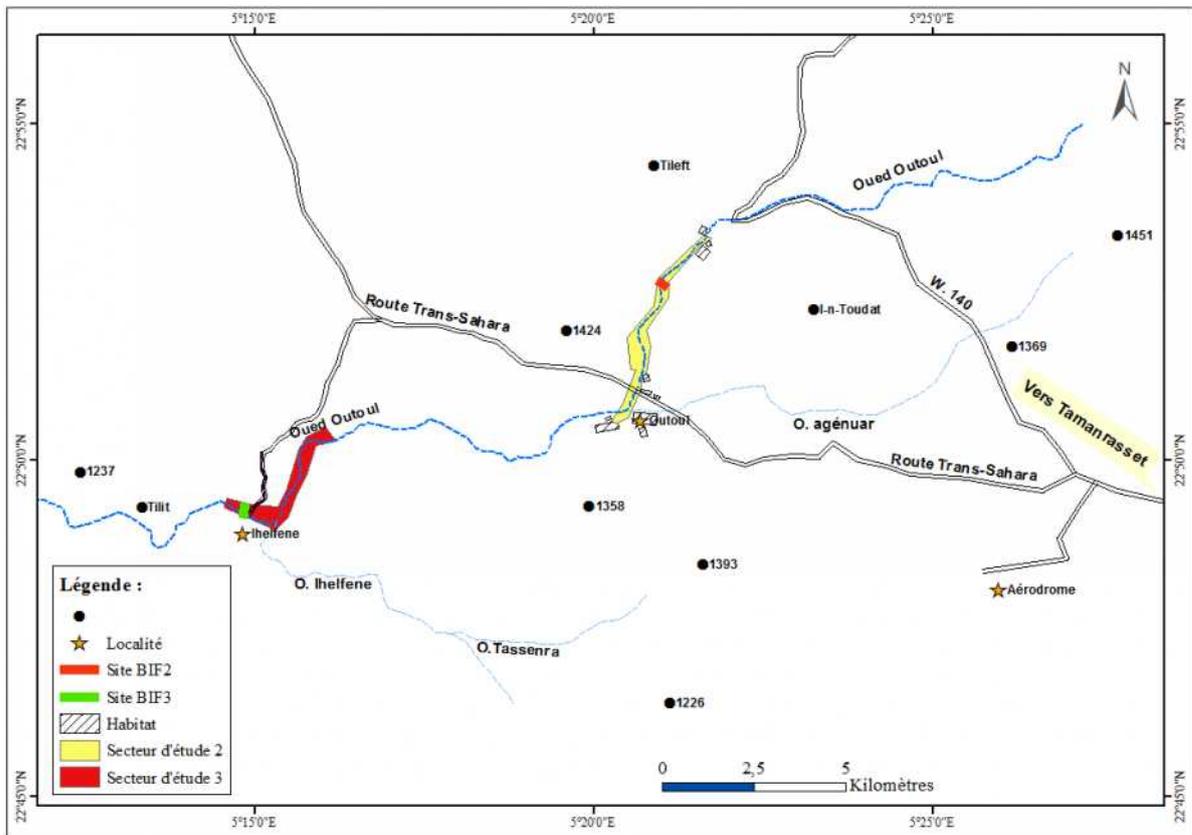


Figure 41. Situation géographique des secteurs BIF2 et BIF3 (Oued Outoul).

II.2.2.2. Descriptif technique du barrage BIF2 :

Le barrage d'inféro-flux d'Outoul (BIF2) a été livré au cours de l'année 2000. Il s'agit d'un petit ouvrage construit sur l'Oued Outoul (*Photo n°1* en annexe). Le barrage en béton recoupe une couche d'alluvions d'une épaisseur de 4 m. Il est fondé sur un substratum granitique, destiné à capter l'inféro-flux de l'oued en un point où la vallée se rétrécit et ne dépasse pas une largeur de 30 m. Ce barrage a une capacité de stockage de 0.05 Hm³.

II.2.2.3. Caractéristiques géologiques :

Le secteur autour de BIF2 se caractérise par l'affleurement de granites arénisés et aplanis qui seraient contemporains à la phase pharisienne (600 ma) (Piccioto, 1966). Ces affleurements granitiques résultent d'une mobilisation locale des schistes cristallins (Feragne, 1962 ; in Saighi, 1984). Les faciès sont très fréquemment granodioritiques, souvent à amphibole avec des réseaux de filons d'aprites et pegmatite, et des grands dykes de microdiorite, microgranite et rhyolite de direction subméridienne recoupant les granites d'Anfeg-Outoul en très grand nombre. Ces formations sont syn à tardi-tectonique. Un ensemble gneissique inférieur est toujours en association avec les granites à dominance d'orthogneiss et à rares métasédiments qui représentent l'équivalent de la série de l'Arechchoum.

Les formations Quaternaires affleurent sur le lit majeur de l'Oued Outoul. Ils présentent une gamme granulométrique étendue. Des limons plus graveleux apparaissent plus en rive droite qu'en rive gauche formant une falaise surplombant l'oued.

Du point de vue tectonique, les grandes zones mylonitiques et phyllonitiques sont bien visibles. Les zones BIF2 et BIF3 sont situés à proximité du grand décrochement dextre de direction globale NNE-SSW. Cette même direction est décelée pour le réseau de failles régionales qui affectent le secteur et la région (Fig. 35).

II.2.2.4. Prospection géophysique :

Dans le cadre du projet de réalisation du premier barrage d'inféro-flux dans l'Oued Outoul - BIF2, l'ENHYD a effectué une campagne géophysique en octobre 1991 comprenant :

- deux profils sismiques : un de longueur de 32 m et l'autre de longueur de 100 m,
- 14 sondages électriques.
- **Présentation et interprétation des prospections géophysiques réalisées au niveau du secteur BIF2 :**

Le sondage géophysique effectué sur le secteur BIF2 a permis d'établir six coupes géoélectriques, dont la corrélation a été difficile à faire pour les premières couches. Cela peut être expliqué par l'absence d'un contraste de résistivité entre les couches (ENHYD, 1991).

La coupe géoélectrique réalisée au niveau du BIF2, permet de montrer l'existence d'un modèle de trois couches (Fig. 42) :

- La première résistante, de nature sableuse, caractérisée par de résistivité comprise entre 1300 et 3300 Ω m d'une épaisseur de 1 m.
- La deuxième couche de nature limoneuse apparaît avec une épaisseur comprise entre 2 et 3 m.

- La troisième couche est attribuée aux graviers humides d'épaisseur variée entre de 2 et 3 m, cette couche manifeste avec une résistivité de 400 à 450 Ωm .

Ces couches reposent sur un substratum granitique de résistivité 700 Ωm .

L'étude géophysique montre également que les alluvions atteignent une épaisseur maximale de 15 m au niveau de SM5.

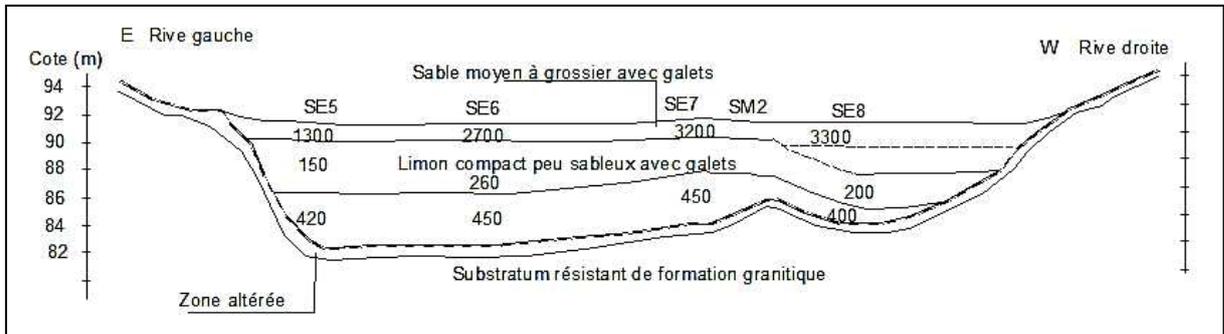


Figure 42. Coupe géoélectrique correspondante au site BIF2 sur Oued Outoul (ENHYD, 1991).

La prospection sismique effectuée également sur ce secteur indique l'existence de 3 niveaux :

- Un niveau supérieur de vitesse 0.33 km/s,
- Un niveau intermédiaire (humide) de vitesse 1.6 km/s,
- Un niveau inférieur (substratum altéré) de vitesse 2.33 km/s.

II.2.2.5. Contexte hydrogéologique :

II.2.2.5.1. Géométrie de l'aquifère :

L'aquifère de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul est constitué principalement par les alluvions quaternaires qui sont caractérisés par la dominance des sables moyens à grossiers et des graviers, à l'exception de quelques niveaux argilo-limoneux de faibles épaisseurs (Fig. 43 en annexe). En amont de BIF2, ces alluvions comblent une cuvette étroite qui s'étale sur une longueur de 2 km avec une largeur comprise entre 30 et 100 m. Leur substratum est formé par le socle granitique qui affleure en continuité vers les berges de l'oued en formant les limites latérales de l'aquifère. Ce dernier est délimité tout à fait en amont par l'affleurement d'un seuil granitique (Fig. 44). Ce seuil constitue une limite hydrogéologique, sous forme de discontinuité hydrodynamique, entre une nappe d'eau souterraine en son amont et la nappe d'eau qui fera l'objet de notre étude piézométrique qui s'entendra jusqu'à 4 km en aval de la digue.

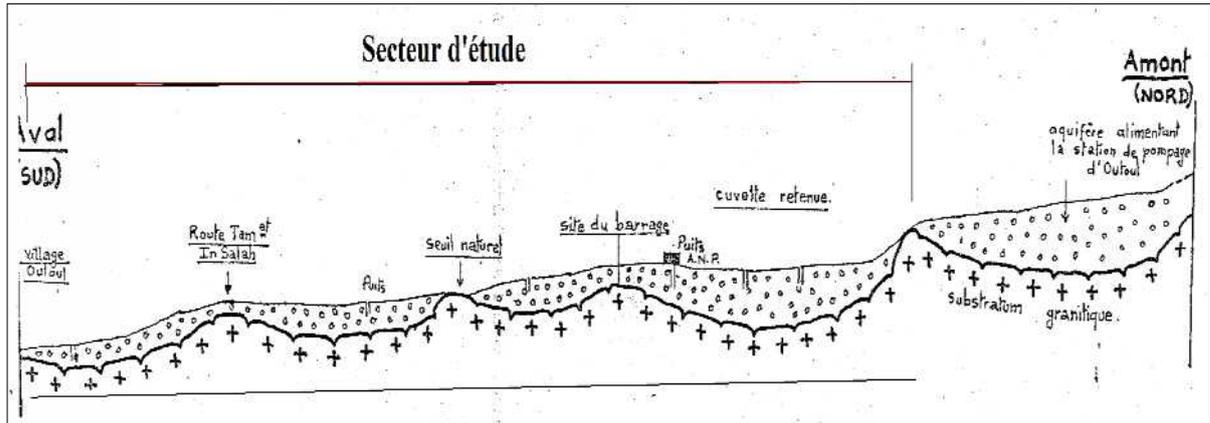


Figure 44. Profil en long de la cuvette de l'Oued Outoul _autour BIF2 (ENHYD,1991).

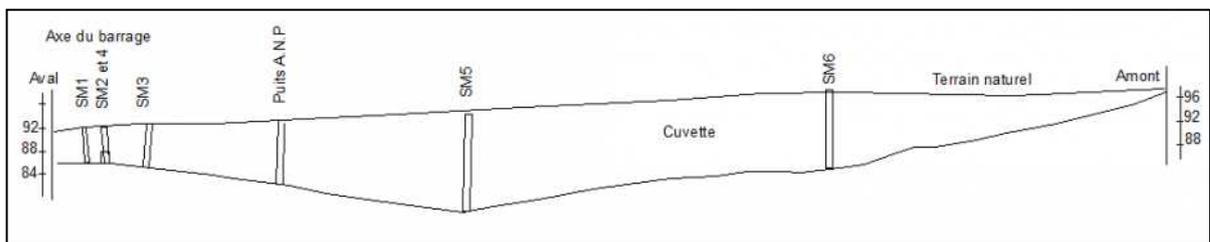


Figure 45. Profil en long indiquant la variation d'épaisseur des alluvions quaternaires en amont de la digue BIF2 _Oued Outoul (d'après ENHYD, 1991).

Entre le seuil granitique et la digue, l'aquifère se caractérise par l'importance du remplissage alluvial en sa partie médiane, 13 m d'épaisseur au maximum au niveau du SM 5 (Fig. 45). Près de la digue, les sondages SM 2 et SM 4 indiquent des épaisseurs de respectivement 4.5 et 3.7 m (Fig. 43 en annexe).

En aval de la digue, l'aquifère alluvial s'étale sur une distance de 4 km avec des largeurs atteignant jusqu'au 430 m. Seul le SM 1, nous renseigne sur l'épaisseur de l'aquifère qui est de l'ordre de 4 m.

Dans cette partie en aval de la digue, le substratum granitique affleure fréquemment dans le lit de l'oued. Il apparait sous deux formes (Fig. 46) :

- un granite sain de couleur grise,
- un granite altéré de couleur rose, sa décomposition donnant un ensemble d'arènes granitiques.



Figure 46. Affleurement du substratum granitique dans le lit de l'Oued Outoul (site BIF2).

La figure suivante représente le profil hydrogéologique de l'inféro-flux au niveau du barrage :

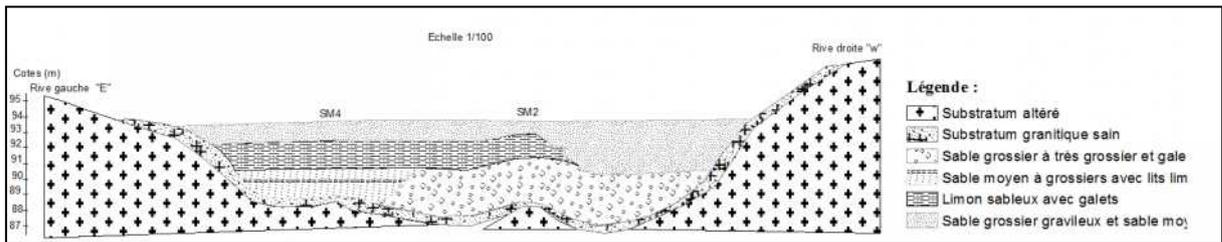


Figure 47. Profil hydrogéologique de l'inféro-flux de l'Oued Outoul au niveau du site BIF2.

II.2.2.5.2. Caractéristiques hydrodynamiques :

Les données hydrodynamiques disponibles pour l'aquifère alluvial de ce secteur d'étude sont celles des perméabilités qui ont été déterminées sur la base d'une étude granulométrique ciblant les échantillons prélevés lors de l'exécution des sondages mécaniques (ENHYD, 1991). Leurs valeurs obtenues sont présentées dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Perméabilités relevés au niveau de l'aquifère alluvial autour de BIF2 (Oued Outoul) (d'après ENHYD, 1991).

Sondage mécanique	01	02	03	04	05	06
K_{moy} (m/s)	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$

Ces résultats mettent en évidence une bonne perméabilité de l'aquifère à l'amont de la digue. La valeur moyenne est $3,6 \cdot 10^{-2}$ m/s. La perméabilité la plus élevée se retrouve dans la partie médiane, au niveau de SM 5.

Lors de la réalisation de ma campagne de terrain (mai 2016), une observation effectuée sur un puits, P204 (Fig. 93) localisé dans le lit de l'oued, en amont de la digue, a permis de constater que suite à l'arrêt des pompes, le niveau piézométrique connaît une remontée rapide, de l'ordre de 3 m en 30 minutes. Ceci est indicateur que l'aquifère présente une bonne perméabilité autour de ce puits.

La nature lithologique de la cuvette aquifère avec la dominance des sables moyens à grossiers, de graviers et de galets explique les bonnes perméabilités obtenues et probablement des porosités utiles élevées.

II.2.3. Secteur du barrage de l'Oued Outoul/Oued Ihelfene - BIF3 :

II.2.3.1. Situation géographique :

Le barrage de l'Oued Outoul BIF3 est situé en aval du barrage BIF2, à quelques centaines de mètres après la confluence des oueds Outoul et Ihelfene, à l'emplacement de l'agglomération d'Ihelfene. Cette agglomération est située à 30 km à l'Ouest de la ville de Tamanrasset (*Photo n°2 en annexe*).

Les coordonnées de l'ouvrage sont : $22^{\circ}49'17''$ N et $5^{\circ}14'42''$ E.

Le secteur du barrage BIF3, objet de notre étude, est situé entre les parallèles $22^{\circ}49'0''$ et $22^{\circ}50'30''$ de latitude Nord, et les méridiens $5^{\circ}14'30''$ et $5^{\circ}16'0''$ de longitude Est (Fig. 41), correspondant à une superficie de près de 62 hectares.

II.2.3.2. Descriptif technique du barrage BIF3 :

Il s'agit d'un ouvrage en béton recoupant transversalement l'oued sur une largeur de 141 m. Il présente une profondeur moyenne de 5 m.

Le barrage BIF 3 est constitué :

- d'un mur paroi moulée en béton plastique pour imperméabiliser la couche alluviale,
- d'un voile injection en coulis en ciment et bentonite, destiné à l'étanchéité de la couche altérée du substratum rocheux et de liaison entre le mur paroi moulée et le substratum sain créant ainsi une étanchéité continue béton- substratum sain,
- d'une surélévation de 1,20 m par un mur en béton armé le long de l'axe du barrage pour diminuer la vitesse d'écoulement, en conséquence, créer une recharge supplémentaire de la nappe.

II.2.3.3. Caractéristiques géologiques :

Le secteur de BIF3 présente le même contexte géologique général que le secteur de BIF2 (voir II.2.2.3).

II.2.3.4. Prospection géophysique :

- **Présentation et interprétation des prospections géophysiques réalisées au niveau du secteur d'étude :**

Dans le cadre de l'étude de réalisation du barrage BIF3, l'ENHYD a effectué une campagne géophysique en août 2004 comprenant :

- trois profils sismiques de longueur de 100 m,
- 61 sondages électriques dont la longueur AB égale 300 m,
- deux sondages électriques paramétriques, le premier exécuté sur les formations rocheuses du Pharusien, et le second sur les formations suggariennes,
- un sondage électrique C2 étalonné sur le sondage mécanique SM9.

Les sondages électriques effectués sur l'Oued Ihelfene ont permis de réaliser 22 coupes géoélectriques longitudinales bien réparties sur l'ensemble de l'aire d'étude (Fig. 48) et une coupe transversale, d'une direction grossièrement NO-SE, SE-NO, recoupant plusieurs sondages électriques.

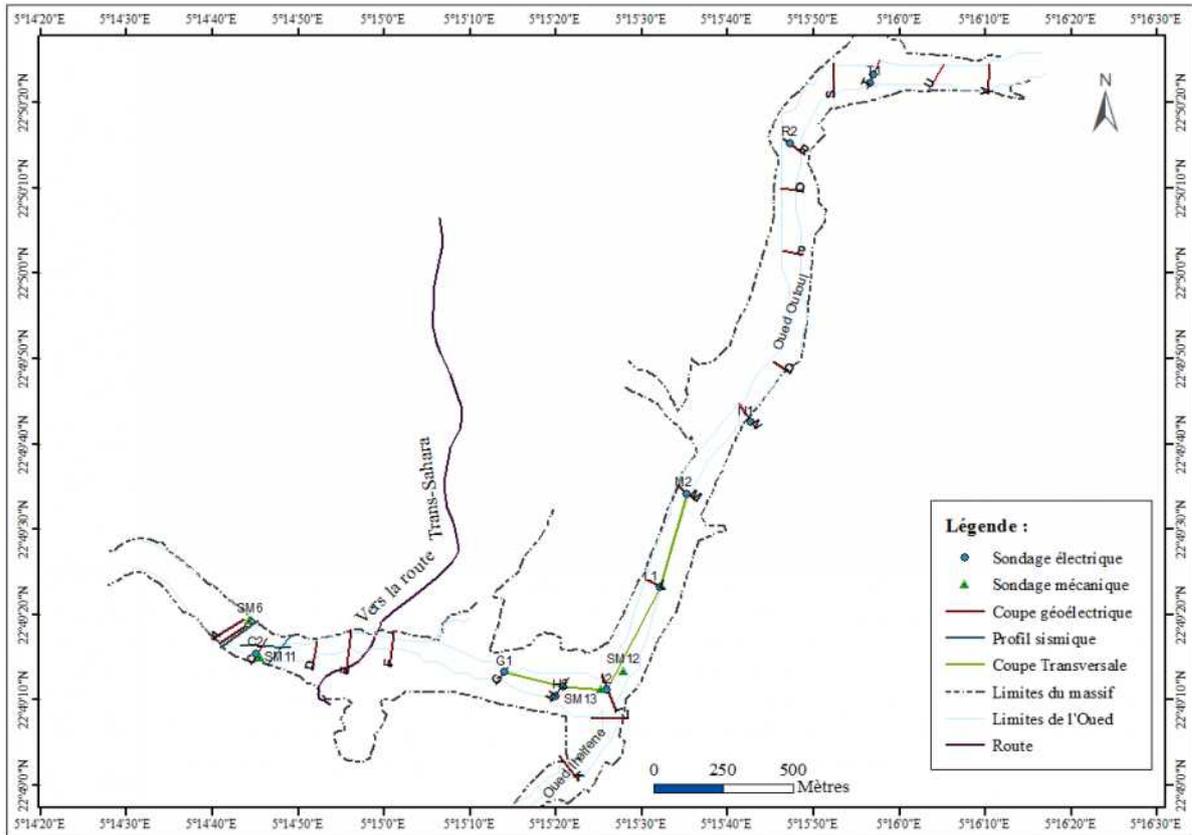


Figure 48. Localisation de différentes prospections géophysiques (D'après ENHYD, 2005).

L'analyse et l'interprétation des coupes précédentes a permis de détecter les principaux horizons, qui sont essentiellement :

- Des alluvions quaternaires représentées par des galets, sables moyens, et parfois par des sables fins et des limons. Leurs résistivités sont comprises entre $27 \Omega \text{ m}$ et $2100 \Omega \text{ m}$ dont les plus faibles correspondent aux alluvions limoneuses et les plus fortes aux galets alluvionnaires. Sur les coupes A, B, et C, ces alluvions sont moins importantes en extension et en épaisseur (1.5 à 5 m) (Fig. 49). Ces épaisseurs ont été confirmées par les sondages mécaniques, respectivement SM 6 et SM 9.

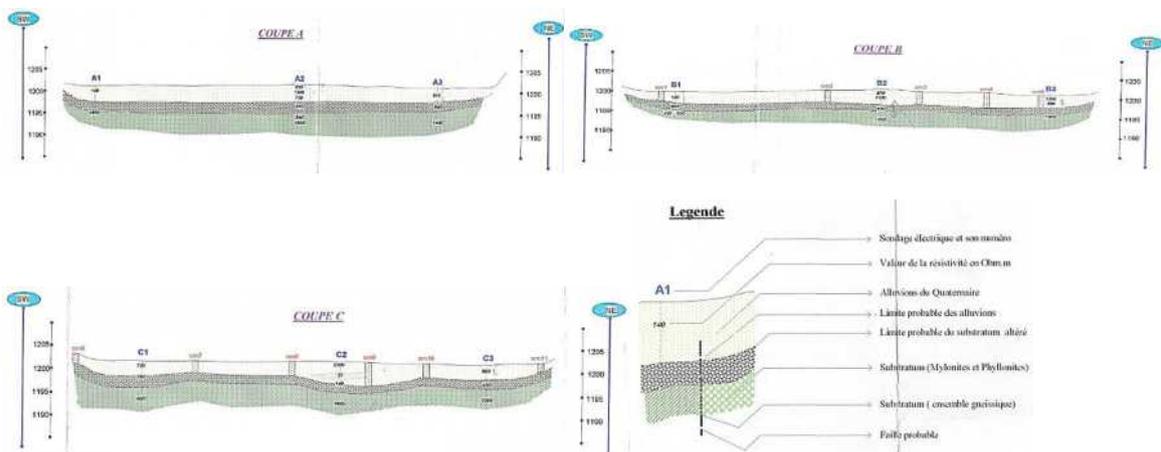


Figure 49. Coupes géoélectrique A, B et C (ENHYD, 2005).

La coupe transversale des sondages électriques G1, H1, I2, L1, M2 (Fig. 50) recoupe en longitude la faille régionale qui passe au niveau des coupes I et J. Elle montre des épaisseurs importantes des alluvions qui seraient de 4.5 m au sondage H1. Celles-ci augmentent vers l'amont jusqu'à 10 m au niveau de SE M2 avec un maximum du sondage I2.

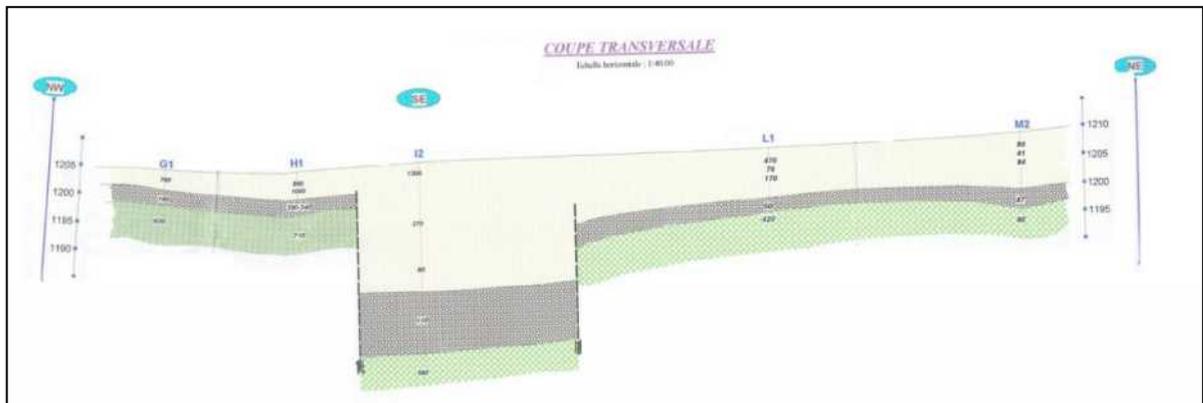


Figure 50. Coupe transversale des sondages électriques G1, H1, I2, L1 et M2 (ENHYD, 2005).

L'épaisseur des alluvions est moins importante vers l'amont à partir de la coupe N jusqu'à la coupe V. Elle est maximale au niveau du SE N1 et T1. Ces alluvions ont des résistivités comprises entre 16 et 4600 Ω m.

L'étude géophysique montre également que le remplissage alluvionnaire repose sur un substratum de nature différente :

- Un substratum de résistivité comprise entre 130 et 6600 Ω m représenté par des formations suggariennes altérées au sommet et compactes en profondeur. Elles sont localisées entre la coupes A et la coupe H. Le niveau altéré se caractérise par une faible épaisseur sur les coupes A, B, et C avec des résistivités variées entre 400 et 600 Ω m. Son épaisseur maximale est de 6.5 m au niveau du SE H2.
- Un substratum de 35 à 2000 Ω m de résistivité représenté par des terrains pharisiens altérés et sains qui sont compris entre les coupes I et V. Son niveau altéré présente une épaisseur plus importante sur les coupes I et J (Fig. 51), avec des résistivités comprises entre 60 et 140 Ω m. Cet horizon peut atteindre une épaisseur de l'ordre de 3 m entre les coupes N et V, avec des résistivités qui varient entre 55 Ω m et 300 Ω m, enregistrées respectivement aux SE T2 et SE R2 (Fig. 51).

On note que l'épaisseur du niveau altéré est tracée arbitrairement du fait qu'il se confond avec les alluvions lorsqu'il est humide et avec le substratum compact lorsqu'il est sec.

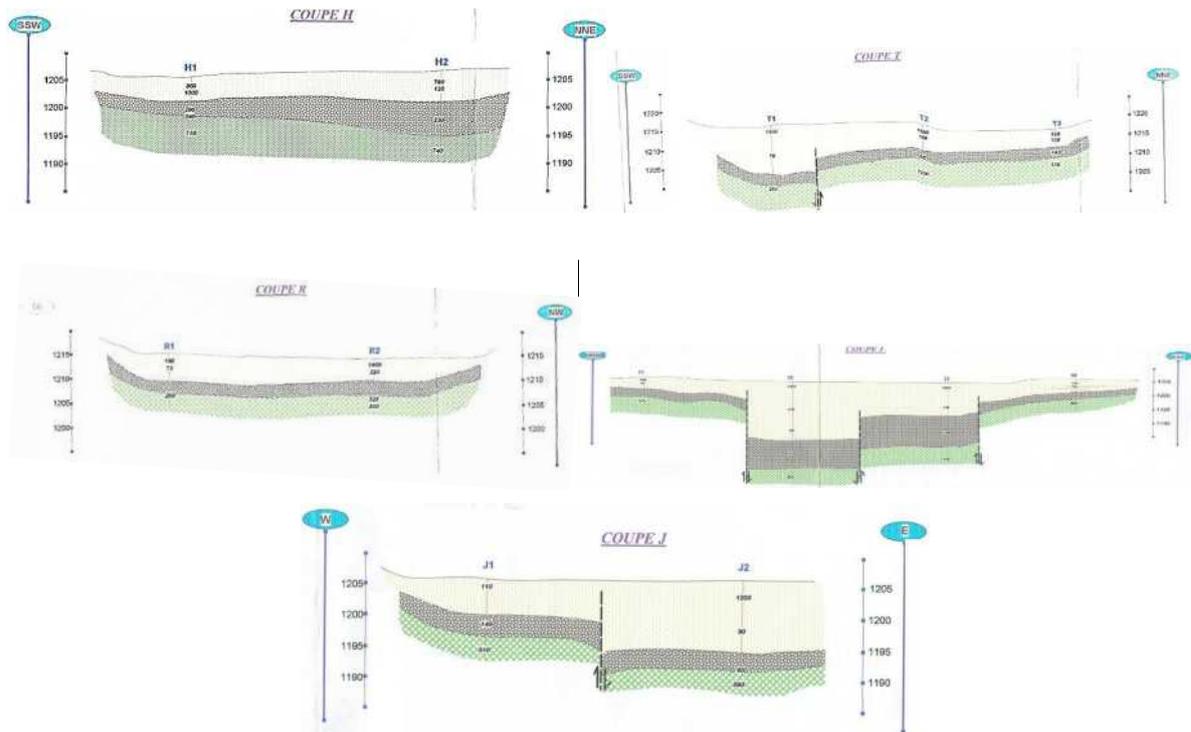


Figure 51. Coupes géoélectriques H, T et R (ENHYD, 2005).

Les résultats de trois profils sismiques qui ont été implantés sur l'Oued Outoul autour du site BIF3, dont deux en tirs direct et inverse, et un autre en tir direct uniquement (profil 3), sont présentés au tableau II.4 :

Tableau II.4 : Résultats de la prospection sismique effectuée sur le secteur BIF3 (ENHYD, 2005).

Profil	Niveaux	Vitesses (km/s)		Lithologie
		Tir direct	Tir inverse	
1	Niveau superficiel	0.25	0.4	Sables et alluvions peu ou pas consolidés
	Niveau intermédiaire	2.5	1.6	Substratum altérée
	Niveau terminal	5.15	5.9	Substratum sain
2 et 3	Niveau superficiel	0.55 – 0.53	0.55	Sables et alluvions
	Niveau terminal	4 – 4.8	4.5	Substratum sain

Les résultats de la prospection sismique ont permis de réaliser trois coupes montrant, en fonction de la profondeur, les positions relatives des différentes interfaces de réfraction. L'allure de ces coupes montre que :

- le profil 1 représente un modèle de trois terrains (Fig. 52) :
 - Sables et alluvions peu ou pas consolidés ayant une épaisseur de l'ordre du mètre,
 - un niveau du substratum altéré caractérisé par une variation des épaisseurs entre les tirs direct et inverse (4.7m à 7.6 m),
 - un substratum qui apparaît non homogène. Il est plus épais dans sa partie sud-ouest.

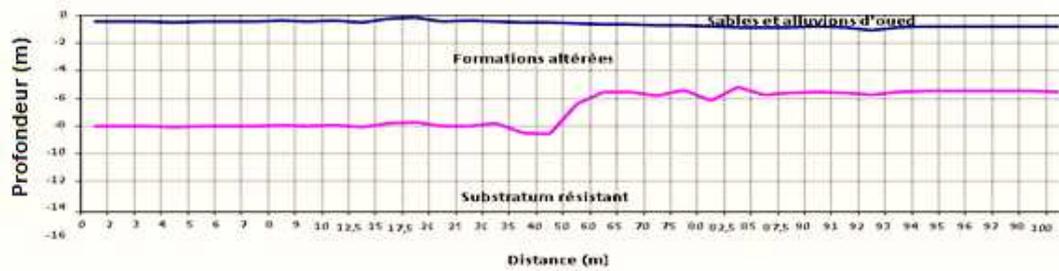


Figure 52. Profil sismique 01 orientation SW_NE.

- le profil 2 (qui présente la même allure que la coupe du profil 3) représente un modèle de deux terrains dont le premier correspond aux sables et alluvions, d'épaisseur moyenne environ 4 m. Le deuxième terrain correspond au substratum résistant relativement homogène (Fig. 53).

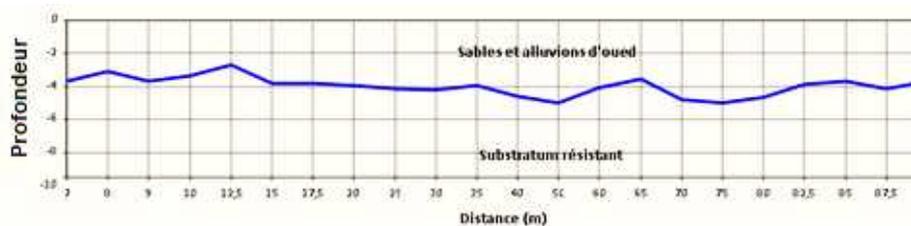


Figure 53. Profil sismique 02 orientation SW_NE.

Remarque : suite à une surélévation de la digue entreprise en 2009, l'épaisseur des alluvions a subi une augmentation de l'ordre de 1.2 m au niveau du site BIF3.

II.2.3.5. Contexte hydrogéologique :

II.2.3.5.1. Géométrie de l'aquifère :

L'aquifère alluvial au niveau du secteur du barrage BIF3 est représenté sous forme d'une cuvette allongée. Il s'allonge sur une distance de près de 5 300 m avec une largeur moyenne de 140 m. Le substratum granitique est généralement incliné de l'amont vers l'aval. L'aquifère se caractérise par une profondeur maximale observée au niveau de la confluence de l'Oued Outoul avec l'Oued Ihelfene.

La carte des épaisseurs du remplissage alluvionnaire montre la puissance relativement élevée des alluvions au niveau de la confluence. La profondeur des alluvions atteint une épaisseur minimale de 3 m, elle est observée près de BIF3 et en amont de secteur (Fig. 54).

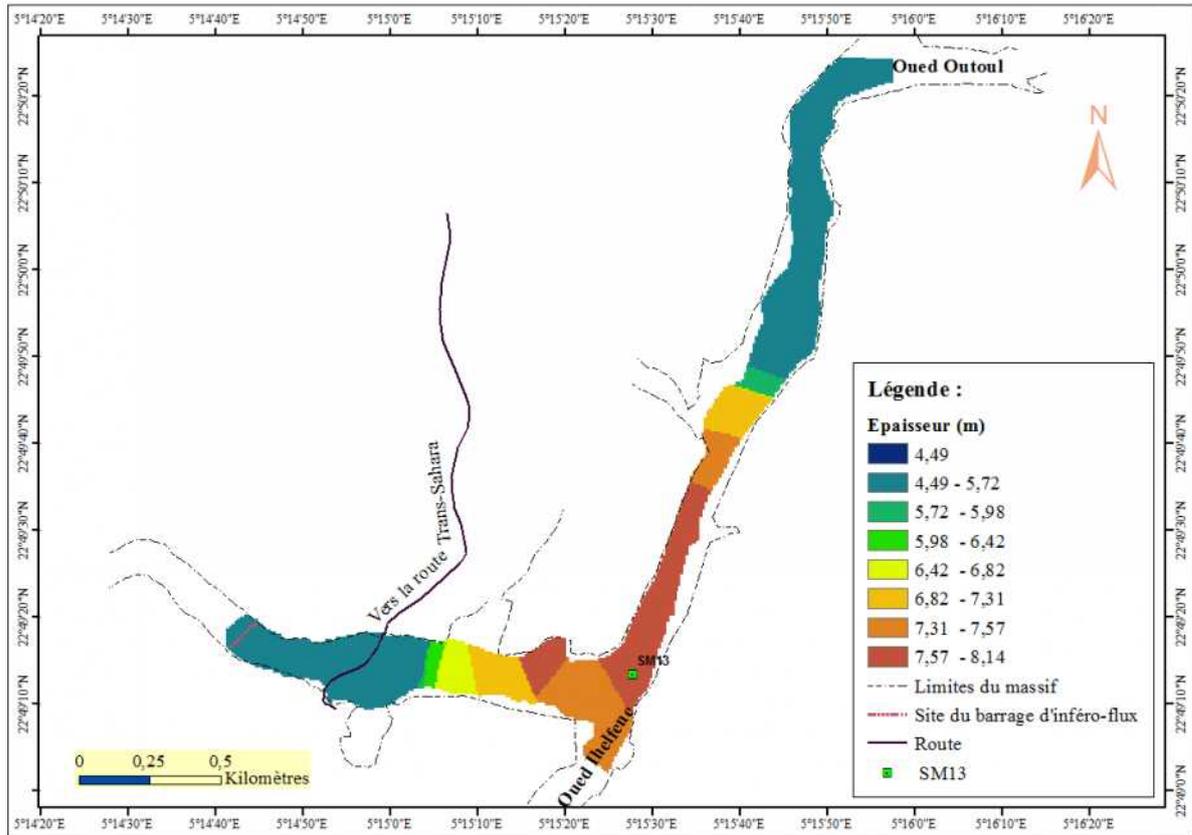


Figure 54. Carte en courbes isopaches des alluvions du Quaternaire (inféro-flux) de l'Oued Outoul au niveau du secteur de BIF3.

Une représentation de l'évolution spatiale de l'épaisseur des alluvions du Quaternaire (inféro-flux) au niveau du secteur d'étude est présentée en figure 55.

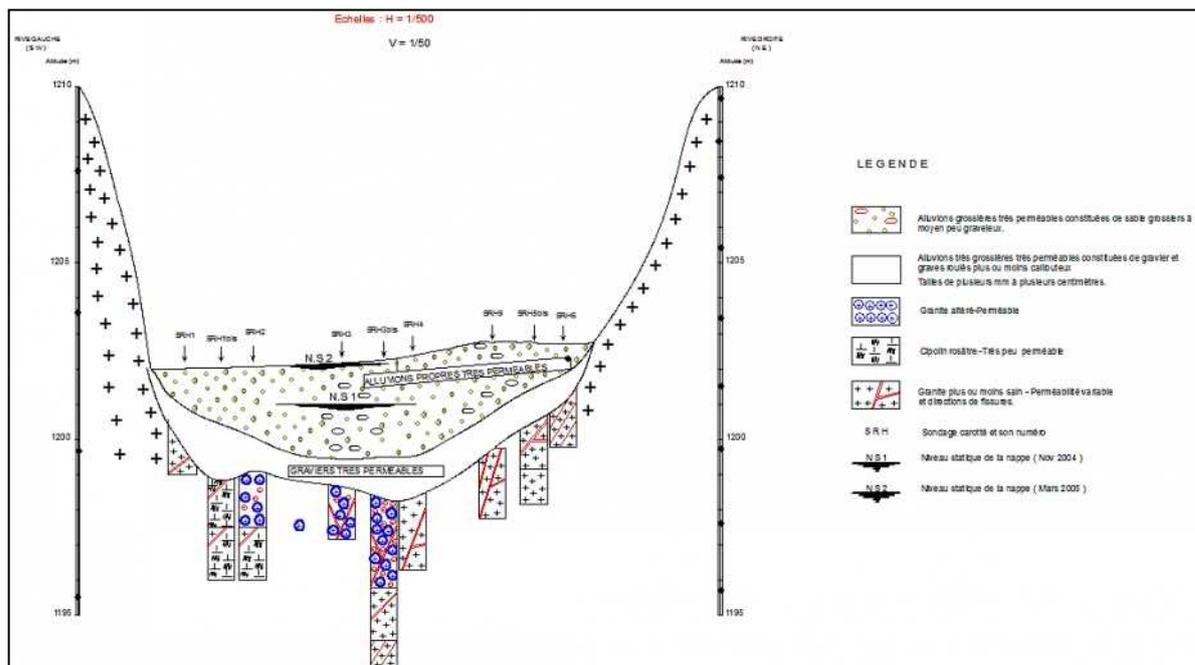


Figure 55. Coupe hydrogéologique de l'aquifère alluvial de la partie aval de l'Oued Outoul _site BIF3 (ENHYD,2005).

II.2.3.5.2. Caractéristiques hydrodynamiques :

L'estimation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère de cette portion d'oued a été possible à partir des essais hydrauliques (Lefranc et Lugeon) in-situ effectués par l'ENHYD dans les sondages mécaniques : SM1 à SM 11 (Fig. 56 en annexe). Les résultats de ces essais sont résumés dans le tableau II.5.

Tableau II.5 : *Perméabilités relevés au niveau de l'aquifère alluvial autour de BIF3 (Oued Outoul) (d'après ENHYD, 1990).*

Sondage mécanique	SM 01	SM 02	SM 03	SM 04	SM 05	SM 06	SM 07	SM 08	SM 09	SM 10	SM 11
K Lefranc (10^{-3} m/s)	0.71	0.83	5.94	0.96	2.84	1.92	1.32	0.22	0.05	2.32	1.93
K Lugeon (10^{-7} m/s)	6.25	0.02	6.78	3.13	4.68	3.58	5.48	4.19	4.9	9.57	6.35

Les valeurs de la perméabilité obtenues par l'essai de Lefranc varient entre $0,71 \cdot 10^{-3}$ et $5,94 \cdot 10^{-3}$ m/s au niveau du barrage BIF3 avec une moyenne de $2,2 \cdot 10^{-3}$ m/s. Au niveau de l'axe constitué par les sondages SM 7 à SM 11, la perméabilité est comprise entre $0,05 \cdot 10^{-3}$ et $2,32 \cdot 10^{-3}$ m/s. Sa moyenne est de $1,17 \cdot 10^{-3}$ m/s. Ces résultats indiquent que l'aquifère alluvial de ce secteur se caractérise par une bonne perméabilité.

Les valeurs des perméabilités obtenues par l'essai Lefranc restent les plus fiables pour l'aquifère alluvionnaire.

Les valeurs des perméabilité obtenues par l'essai de Lugeon, oscillent entre $0,02 \cdot 10^{-7}$ et $9,57 \cdot 10^{-7}$ m/s, caractérisant les fissures subhorizontales du socle rencontrées localement dans les sondages mécaniques. Les perméabilités obtenues à partir de ce type d'essai correspondent à des perméabilités ponctuelles.

II.2.4. Secteur du barrage d'In Amguel - BIF4 :

II.2.4.1. Situation géographique :

Le barrage souterrain de l'Oued In Amguel - BIF4, est implanté après la confluence de l'Oued Ifragh, à l'emplacement de l'agglomération éponyme, située sur la route nationale 1 (transaharienne), à près de 120 km au Nord-ouest de la ville de Tamanrasset. Ses coordonnées géographiques sont : $23^{\circ}41'26''$ N et $5^{\circ}8'43''$ E.

Le secteur du barrage objet de notre étude, est situé entre les parallèles $22^{\circ}49'0''$ et $23^{\circ}41'30''$ de latitude Nord, et les méridiens $5^{\circ}14'30''$ et $5^{\circ}16'0''$ de longitude Est (Fig. 57, *Photo n°3 en annexe*). Il occupe une surface de près de $2,8 \text{ km}^2$.

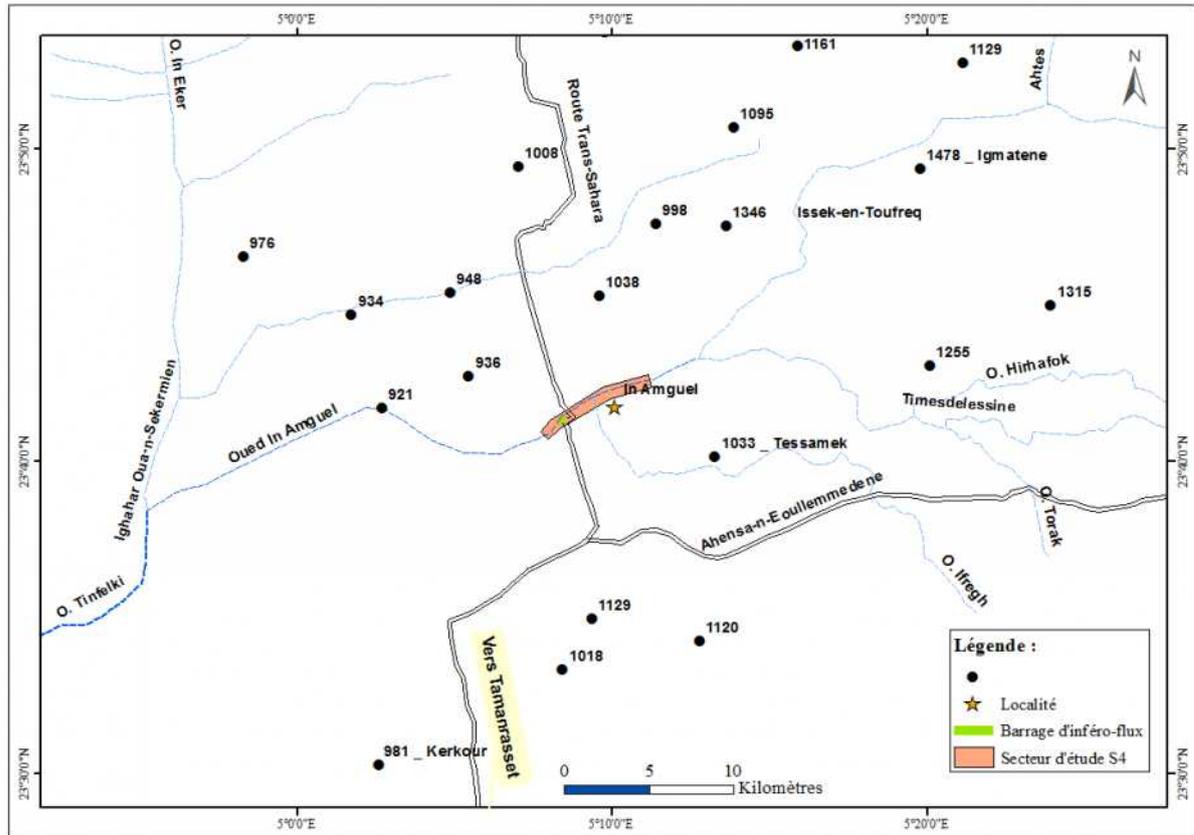


Figure 57. Situation géographique du secteur 3 (Oued In Amguel).

II.2.4.2. Descriptif technique du barrage BIF4 :

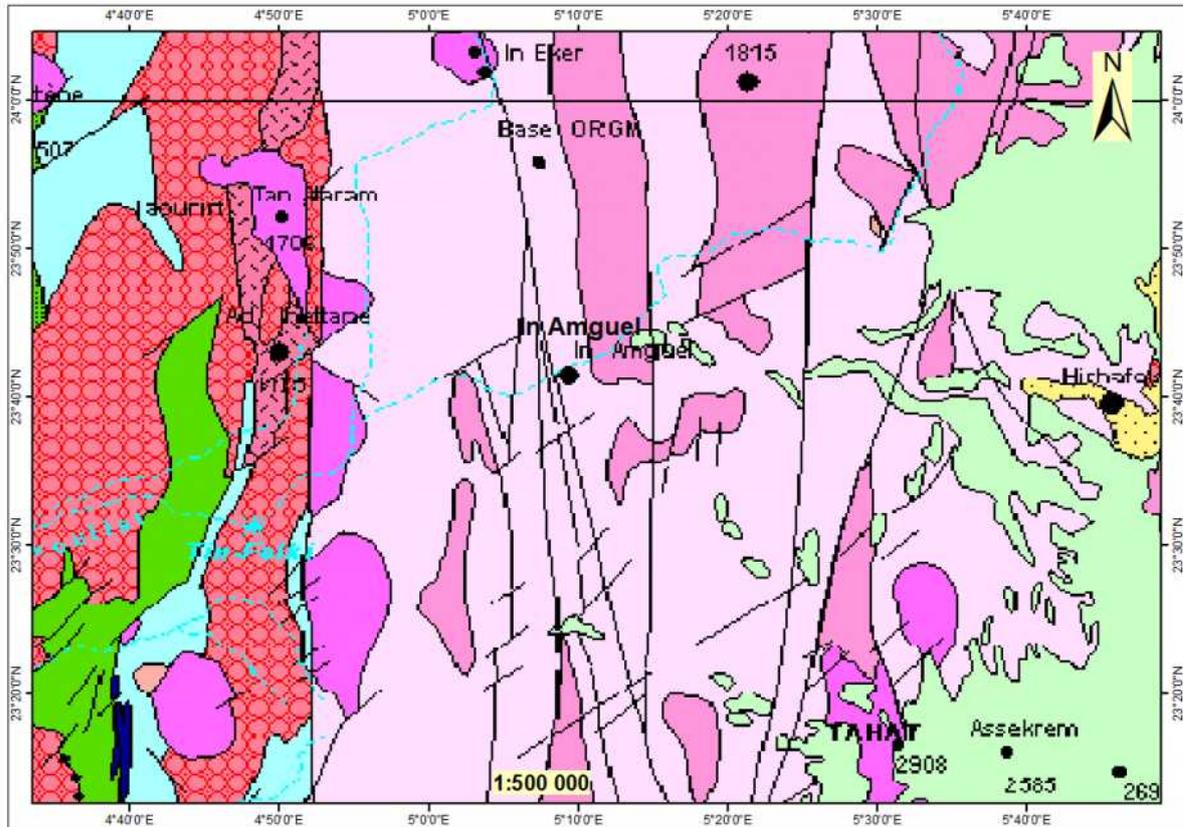
C'est un barrage souterrain projeté en l'année 2000. Il s'agissait de barrer l'inféro-flux tout en laissant le lit de l'oued In Amguel libre pour l'écoulement des crues. Sa longueur est de l'ordre de 150 m, et sa profondeur maximale est de 26 m. Onze (11) mètres de l'ouvrage est enfoncé dans le substratum gneissique, et par conséquent les alluvions sont captées par une épaisseur de 15 m. Ce barrage a une capacité de réserve en eau de 4 Hm³.

II.2.3.3. Caractéristiques géologiques :

Le secteur d'étude est délimité dans les séries suggariennes constituées de roches précambriennes métamorphiques (Fig. 58). Cet ensemble est formé à la base par une série de roches métamorphiques, représentée par des gneiss rubanés, des gneiss ocellés et des micachistes formant le socle.

A cette série est liée la présence de granites syntectoniques ou postectoniques qui ont affecté ce socle. Ce faciès est relevé dans les terminaisons en amont du cours de l'oued, soit beaucoup plus au Nord-est du secteur étudié (ENHYD, 1989).

Les dépôts quaternaires présentent les caractéristiques des formations fluviales déposées par l'oued. Elles sont essentiellement sableuses. Les matériaux transportés, proviennent, au rythme des crues, des actions érosives de l'eau et du vent sur les massifs montagneux du bassin versant de l'oued.



Légende :

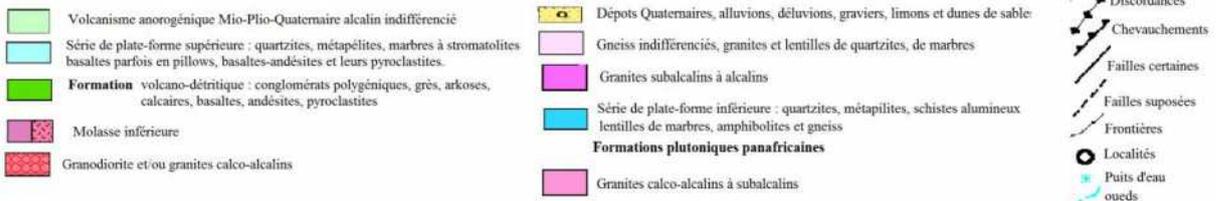


Figure 58. Carte géologique de la région d'In Amguel (Extrait de la carte géologique du massif du Hoggar, ORGM 2004)

D'un point de vue tectonique, la zone d'In Amguel est affectée par d'importance plissements. Les formations en place ont également été le siège de nombreuse failles et fracturations d'importance variable.

II.2.4.4. Prospection géophysique :

Pour but de reconnaissances hydrogéologiques, le bassin de l'Oued In Amguel, autour du site BIF4, a fait l'objet de plusieurs campagnes géophysiques :

1- Par ALGEO en 1979 :

Dans le cadre de cette campagne, 303 sondages électriques AB = 300 m et une prospection sismique ; d'un dispositif de longueur L=148 m avec un pas variable entre les géophones, ont été réalisés. Des piézomètres et des sondages de reconnaissances totalisant 800 m linéaires ont également été exécutés le long de la cuvette.

2- Par l'Entreprise Nationale des Etudes Hydrauliques (E.N.HYD)

Il a été réalisé 18 sondages électriques, 2 profils sismiques d'une longueur $L=210$ m et 6 sondages mécaniques. Cette campagne est intervenue dans le cadre de l'étude de faisabilité du barrage d'inféro-flux sur l'oued concerné.

• Présentation et interprétation des prospections géophysiques réalisées au niveau du secteur étudié :

L'analyse des sondages électriques réalisés sur le secteur du barrage BIF4 permet de caractériser les différents niveaux lithologiques de la cuvette de l'oued :

- Les résistivités des alluvions aquifères, graviers fins et moyens, sont relativement peu élevées, de 50 à 90Ω m, comparativement avec les valeurs rencontrées habituellement.
- La résistivité du substratum gneissique est supérieure à 1000Ω m. Cependant, certains sondages indiquent une fin de l'ordre de 500 à 1000Ω m due à un début d'altération du substratum (A. Bouguern ; H. Baker ; 2007).

Le sondage géophysique a permis d'établir quatre coupes géoélectriques, dont la coupe géoélectrique n° 2 réalisée au niveau de BIF4 qui a montré l'existence d'un modèle de trois terrains (Fig. 59) :

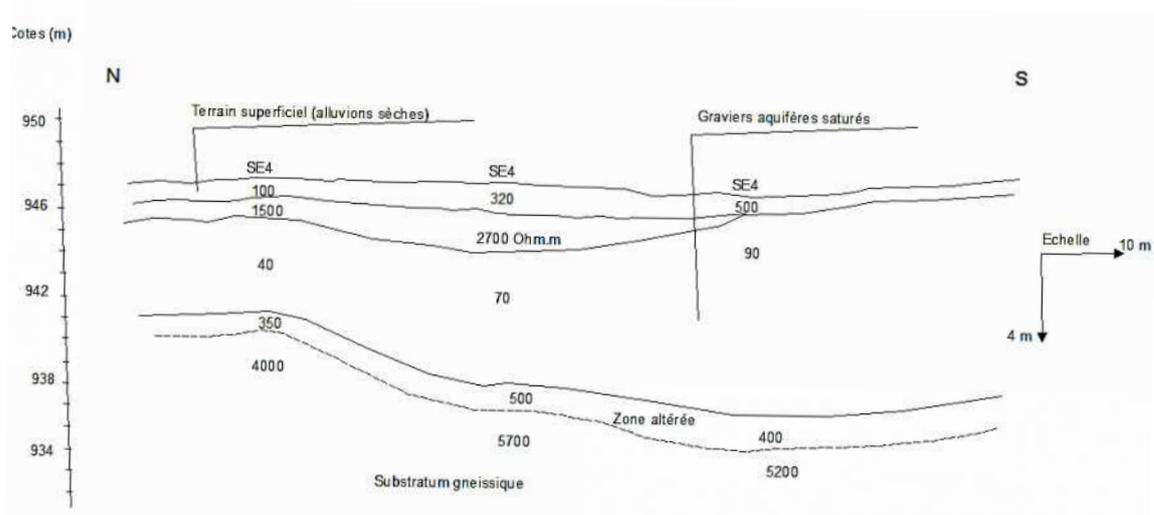


Figure 59. Coupe géoélectrique n° 2 correspondante à l'axe du barrage BIF4 (ENHYD, 1989).

- Le premier terrain correspond aux alluvions. Selon leurs caractères lithologiques et leurs résistivités, plusieurs niveaux ont été distingués :
 - un niveau supérieur de 200 à 500Ω m de résistivité, attribué aux sables moyens à grossiers de faible épaisseur (1 à 2 m).
 - un niveau intermédiaire d'une résistivité de 100 à 120Ω m qui correspond à une couche mince formée par des sables moyens limoneux. Elle disparaît à la limite du SM6.
 - le dernier horizon se présente beaucoup plus conducteur ayant une résistivité de 40 à 600Ω m qui indique que ce niveau des alluvions est saturé en eau. Leur épaisseur est relativement importante et atteint les 11 m près des SE1 et SE2. Cette épaisseur diminue en s'approchant des deux rives.

- Le deuxième terrain, de 150 à 450 Ω m de résistivité, est attribué à une zone altérée au sein du substratum. Son épaisseur est de 5 m au niveau du SM3, elle diminue pour atteindre 1 m au SM4.
- Enfin, le substratum sain, d'une résistivité comprise entre 1200 et 6000 Ω m, caractérisant une formation de nature gneissique.

La prospection sismique a montré que les formations géologiques se caractérisent par les vitesses suivantes :

Tableau. II.5 : Résultats de la prospection sismique effectuée sur le site BIF4.

Vitesses (km/s)	Lithologie
0.3 – 0.5	Zone altérée : sables secs et limons
0.6 – 0.8	Alluvions sèches
1.2 - 2	Substratum altéré, alluvions aquifères
4 - 6	Substratum sain

II.2.4.5. Contexte hydrogéologique :

II.2.4.5.1. Géométrie de l'aquifère :

L'aquifère de la nappe d'inféro-flux de l'Oued In Amguel, objet du présent travail, comporte la cuvette alluvionnaire qui longe sur une distance de 5 km en amont du barrage, et 1 km en son aval. La largeur de l'aquifère varie entre 190 et 350 m.

Cet aquifère est de même nature lithologique que les aquifères précédents avec la caractérisation d'un horizon très mince repéré dans toutes les coupes des forages mais qui a une influence hydrodynamique très limitée.

La coupe hydrogéologique correspondant à l'axe du barrage est schématisée en figure 60.

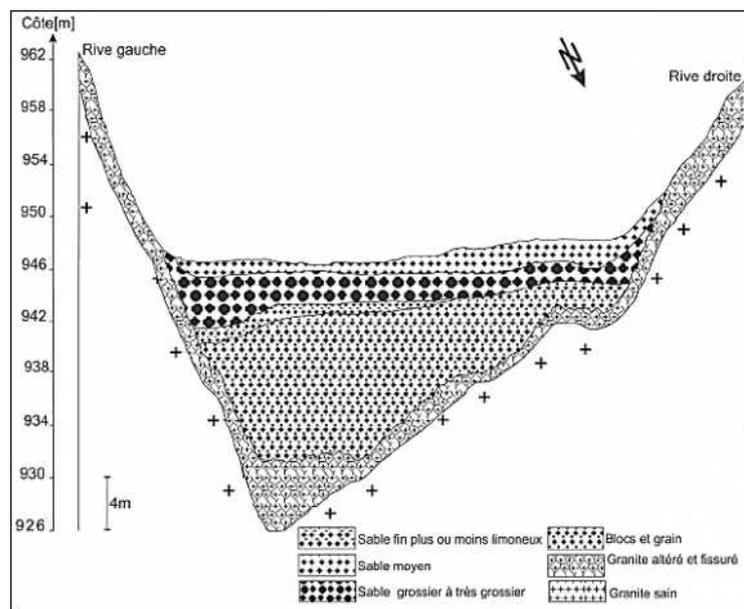
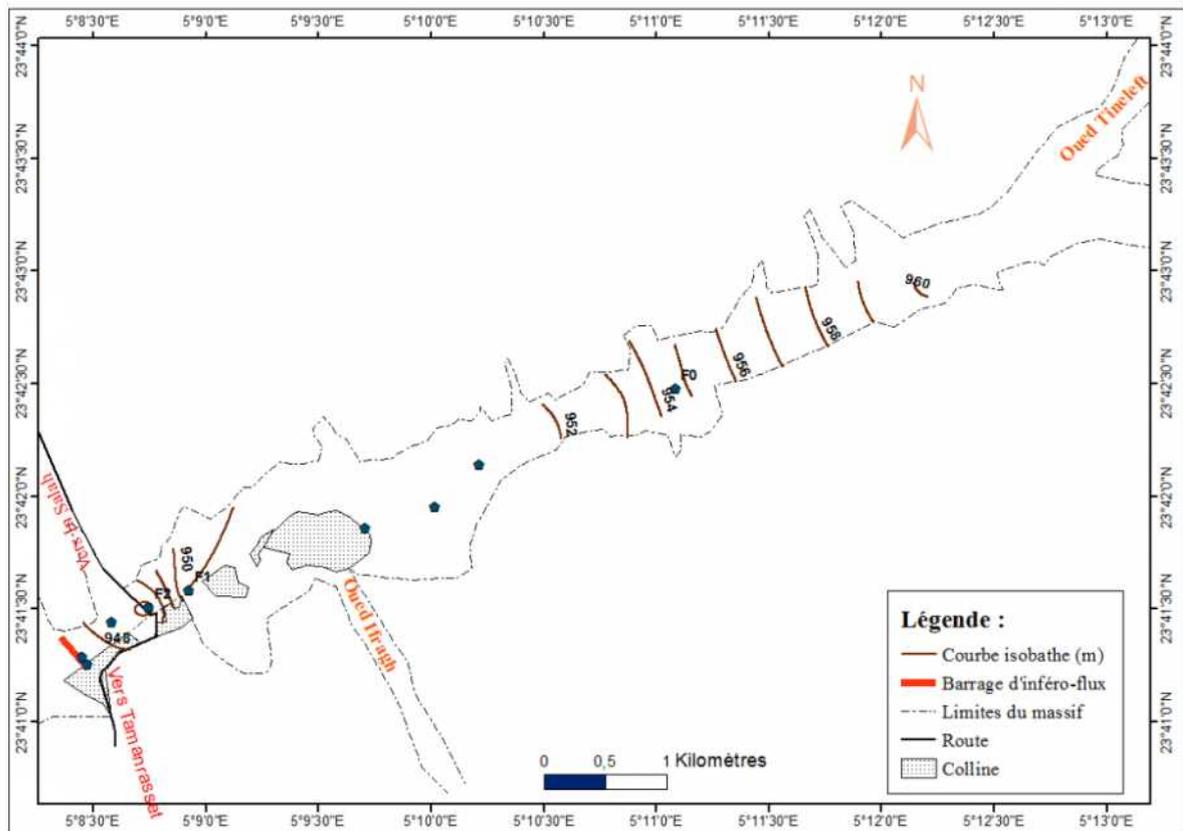


Figure 60. Profil hydrogéologique des niveaux de l'inféro-flux d'Oued In Amguel (ENHYD, 1991 in Draibat, 2015).

Le substratum gneissique présente une pente vers l'aval avec une différence de 10 m entre l'amont, au niveau de F0 (limite de la cuvette en amont), et le site du barrage d'inféro-flux (Fig. 61). La continuité du socle gneissique non altéré entre les deux berges présente les limites latérales de l'aquifère.



L'allure de la carte en courbes isopaches de cet aquifère indique que les épaisseurs du remplissage alluvial augmentent progressivement de l'amont, à partir le forage F2, pour atteindre une puissance de 25 m au niveau de F0 (Fig. 62). Les faibles épaisseurs se trouvent entre F2 et le BIF4. L'épaisseur faible observée au niveau de F2, en rive droite (12 m), peut s'expliquer par une remontée probable du substratum.

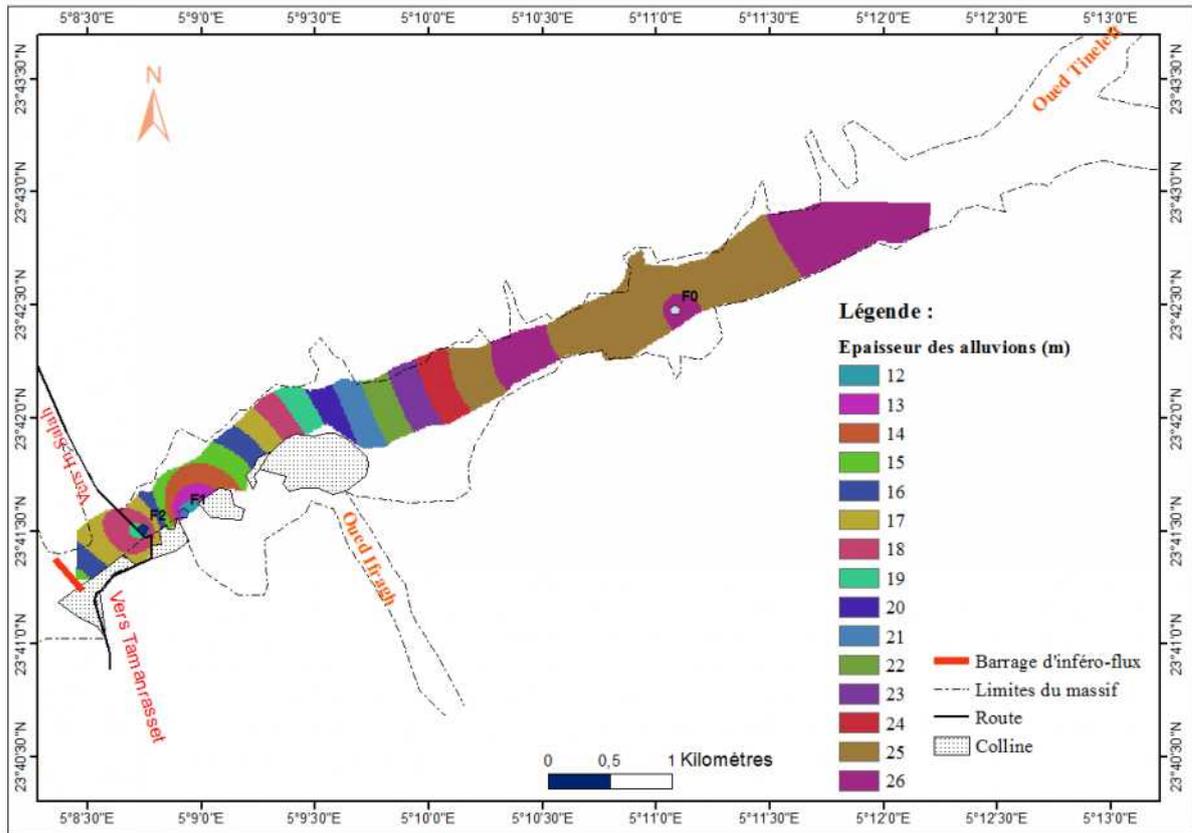


Figure 62. Carte en courbes isopaches au niveau d'inféro-flux de l'Oued In Amguel en amont de BIF4.

II.2.4.5.2. Caractéristiques hydrodynamiques :

D'un point de vue hydrodynamique, Chenafi en 1984 a proposé pour l'aquifère de la nappe d'inféro-flux d'In Amguel des valeurs globales de transmissivité (T) comprises entre $8 \cdot 10^{-3}$ et $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. correspondantes à des valeurs de perméabilité (K) de $4,5 \cdot 10^{-4}$ à $0,47 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Les résultats des pompages effectués sur les forages captant cette nappe au moment de leur réalisation en 1985 ((Fig. 77, Tableau II.6) permettent de résumer les informations relatives aux propriétés hydrodynamiques de cet aquifère.

Tableau. II.6 : Perméabilités de l'aquifère alluvial de l'Oued In Amguel (ENHYD, 1989).

Forage	F 7	F6	F0	F5	F4	F1
T ($10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$)	4,4	3,5	0,73	0,17	2,9	4,4
K (10^{-3} m/s)	3,2	2,3	0,42	9,1	1,7	3,7

Les valeurs de perméabilités varient entre $0,42 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ et $9,1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Ces résultats indiquent que cet aquifère est caractérisé par une bonne perméabilité.

Conclusion :

L'exploitation de données des différentes études réalisées ces dernières décennies dans la région de Tamanrasset dans le cadre de la mobilisation des ressources en eau souterraine nous a permis de détailler les spécifications géotechniques des quatre barrages d'inféro-flux objet de ce travail. Les contextes géologiques, géophysiques et hydrogéologiques autour de chaque barrage d'inféro-flux ont également été passé en revue.

Les digues des barrages étudiés se caractérisent par des hauteurs qui correspondent globalement à l'épaisseur des alluvions, variant entre 4 m et 15 m, et se prolongeant dans le substratum soient gneissique ou granitique, sur des profondeurs variables : 11 m pour le cas du BIF4 sur l'Oued In Amguel et 6.8 m pour le cas du BIF1 sur l'Oued Tamanrasset. Dans le sens latéral, ces barrages s'étendent largement au-delà du lit mineur des oueds jusqu'aux limites naturelles de la nappe. La longueur des digues est 350 m au niveau du BIF1 sur l'Oued Tamanrasset, 150 m au niveau du BIF4 sur l'Oued In Amguel, et de respectivement, 141 m au niveau du BIF3 et 30 m au niveau du BIF2, implantés sur l'Oued Outoul. Les quatre barrages présentent des capacités de stockage variant entre 0.05 Hm³ et 4 Hm³.

D'un point de vue géologique, les forages et sondages mécaniques exécutés sur les différents secteurs montrent la prédominance du contexte de présence de formations suggariennes gneissiques et/ou pharusiennes granitiques surmontée au niveau des vallées d'oued, et constituant le substratum des formations alluviales. Les études géophysiques montrent la présence d'un modèle de trois terrains avec le passage dans quelques endroits des couches minces, ces dernières se caractérisent par une faible épaisseur, correspondantes aux argiles, elles disparaissent en s'approchant des deux rives de l'oued. Les dépôts quaternaires combrent des cuvettes allongées, parfois étroites. Ils reposent sur un socle fissuré passant progressivement à la roche saine. L'épaisseur de ces dépôts alluvionnaires peut atteindre 30 m.

Concernant les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères alluviaux des oueds autour des quatre sites étudiés, les données de la perméabilité disponibles indiquent des valeurs variables. Si l'aquifère alluvial de l'Oued Tamanrasset présente de faibles valeurs de perméabilité, les trois autres aquifères présentent de bonnes perméabilités qui oscillent généralement autour de 10⁻³ m/s. La discrimination de ces valeurs est due à l'hétérogénéité des alluvions et de la gamme granulométrique qu'ils présentent au niveau de chaque portion d'aquifère. Par ailleurs, le niveau altéré du socle sous-jacent est également aquifère, mais ses caractéristiques hydrodynamiques restent moins bien connues.

Chapitre III :

***Etude piézométrique des nappes
alluviales autour des sites d'étude***

Introduction :

Le socle précambrien du massif du Hoggar étant caractérisé par une faible perméabilité, les seuls niveaux perméables correspondent aux dépôts des formations quaternaires. Ils sont essentiellement localisés dans les parties basses des reliefs et dans les vallées d'oueds et correspondent à des dépôts alluviaux, et recelant des nappes d'inféro-flux alimentées essentiellement par infiltration à partir des crues d'oueds. Les barrages d'inféro-flux construits ces dernières décennies dans la région de Tamanrasset n'ont pas manqué d'impacter la piézométrie de ces nappes autour des ouvrages construits. Afin d'évaluer cet impact, nous avons réalisé dans le cadre de cette étude, des campagnes piézométriques ciblant les puits et forages, situés en amont et en aval des différents barrages étudiés. L'objectif est de rendre compte des perturbations hydrodynamiques engendrées par la construction des ouvrages concernés.

Les relevés piézométriques dans les nappes des oueds étudiés ont été effectués dans une période où le volume puisé à partir de ces nappes est réduit. Ils se sont déroulés à des heures bien définies de la journée : soit très tôt le matin avant l'exploitation des puits, ou une heure à deux heures après la fin de l'exploitation.

A l'aide des différentes mesures effectuées, des cartes piézométriques ont été établies. Ces cartes ont permis de déterminer le sens général d'écoulement des systèmes aquifères en faisant ressortir les effets des barrages d'inféro-flux sur l'hydrodynamique respective des différents aquifères.

La fiabilité et la représentativité des cartes piézométriques réalisées ont dépendus de la densité et de la précision de détermination des niveaux topographiques des points d'eau ciblés.

III.1. Données piézométriques exploitées :

Les données exploitées pour rendre compte de la piézométrie des différentes nappes alluviales proviennent de données inédites mais également de données antérieures.

III.1.1. Données antérieures :

Les données anciennes proviennent de campagnes de reconnaissance, de rapports techniques et de quelques mémoires et travaux de recherche. Souvent, elles concernent des zones particulières et se limitent à des informations élémentaires comme le niveau de la nappe.

Les principales données antérieures comprennent essentiellement :

- 13 mesures piézométriques de forage dans l'aquifère de l'Oued In Amguel, fournies par la direction des Ressources en Eau de la wilaya de Tamanrasset en 1982,
- 28 mesures hydrodynamiques des puits et un piézomètre dans l'aquifère alluvial de l'Oued Outoul - site BIF3, réalisées par l'ENHYD en 2004.
- une campagne de 23 mesures, portant 4 forages et 19 puits en avril 2015 ciblant l'aquifère de l'Oued In Amguel (Draibat A., 2015).

III.1.2. Données acquises au cours de cette étude :

Dans le cadre de la réalisation de ce travail, et pour pallier à toute variation rapide des niveaux piézométriques (épisode de crue, pompage), nous avons tenu à effectuer au cours de la même journée les mesures piézométriques pour chaque nappe étudiée. En vue de l'établissement de

cartes piézométriques représentatives de l'état des niveaux d'eaux souterraines des nappes étudiées, quatre campagnes de terrain ont été réalisées entre le 26 novembre et le 22 décembre 2015. Elles ont permis le relevé de 134 niveaux piézométriques dans les différents secteurs d'étude.

III.2. Description des points d'eau :

Les points d'eau de notre étude sont représentés par des puits et des forages. La majorité des points de captage recensés dans les différentes nappes sont des puits (Fig.63). Les quelques forages concernés sont des forages encore en activité ou hors-service.



Figure 63. Puits *a* : équipé par deux pompes, *b* : équipé par une seule pompe.

Les points d'eau sont situés dans les terrasses d'oued (jardins de particuliers) et d'autres dans les lits mineurs des oueds. Ils sont relativement bien répartis sur toutes les zones étudiées et sont généralement d'accès facile pour la mesure du niveau piézométrique, à l'exception de certains puits fermés par un bouchon (pour éviter leur effondrement pendant les crues), localisés dans les lits des oueds et empêchant toute prise de niveau d'eau (Fig. 64).



Figure 64. Exemples de puits fermés par bouchon.

Les points d'eau de notre région d'étude captent la nappe alluviale au niveau de chaque oued, à l'exception de l'aquifère de l'Oued Tamanrasset où forages et puits captent simultanément la nappe alluviale et la nappe du socle fissuré sous-jacent, à l'exception du forage F13 qui capte uniquement la nappe du socle fissuré.

Les différents points d'eau ont été référencés en fonction des secteurs étudiés. Le premier chiffre correspond au numéro de secteur, les deux derniers chiffres représentant le numéro du

point d'eau. Les lettres P, F désignent les types de points de captage, à savoir respectivement puits et forage. Par exemple, le point d'eau P219 est le puits numéro 19 localisé au niveau du secteur de BIF2.

III.3. Piézométrie des différentes nappes d'inféro-flux de la zone d'étude :

III.3.1. Piézométrie de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset (secteur de BIF1) :

III.3.1.1. Inventaire des points d'eau :

La répartition géographique des points d'eau inventoriés et mesurés est présentée en figure n° 65.

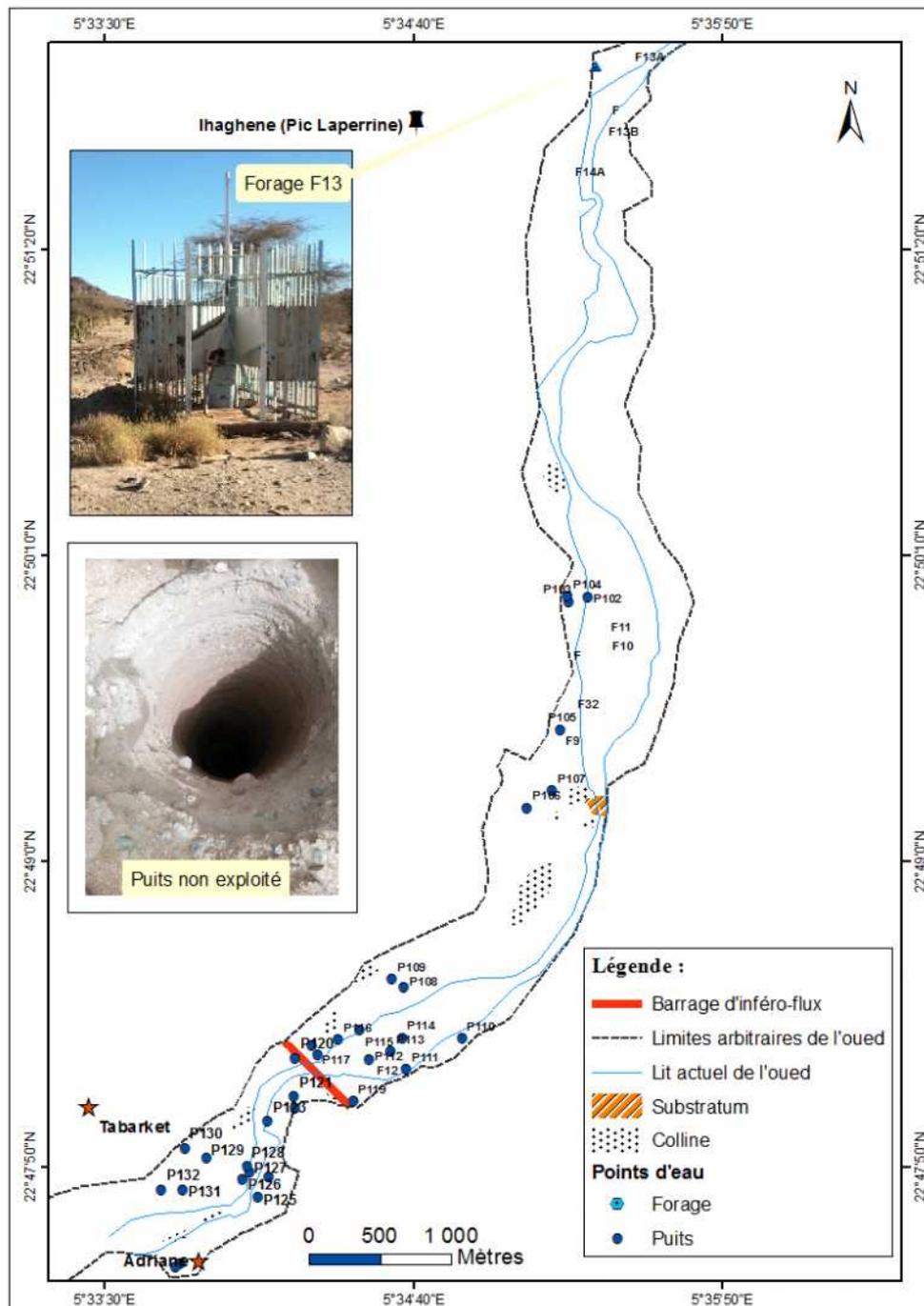


Figure 65. Inventaire des points d'eau de la nappe inféro-flux de l'Oued Tamanrasset.

III.3.1.2. Piézométrie de la nappe du 02 décembre 2015 :

La campagne de mesure s'est effectuée le 02 décembre 2015. Elle a concerné 43 relevés piézométriques.

La surface piézométrique de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset (figures 66 et 67) présente la morphologie d'une nappe à écoulement assez régulier en amont du barrage à l'exception de certaines perturbations dans les parties les plus en amont de l'oued (Pic Ihaghene) et au niveau de la zone de remontée du substratum gneissique.

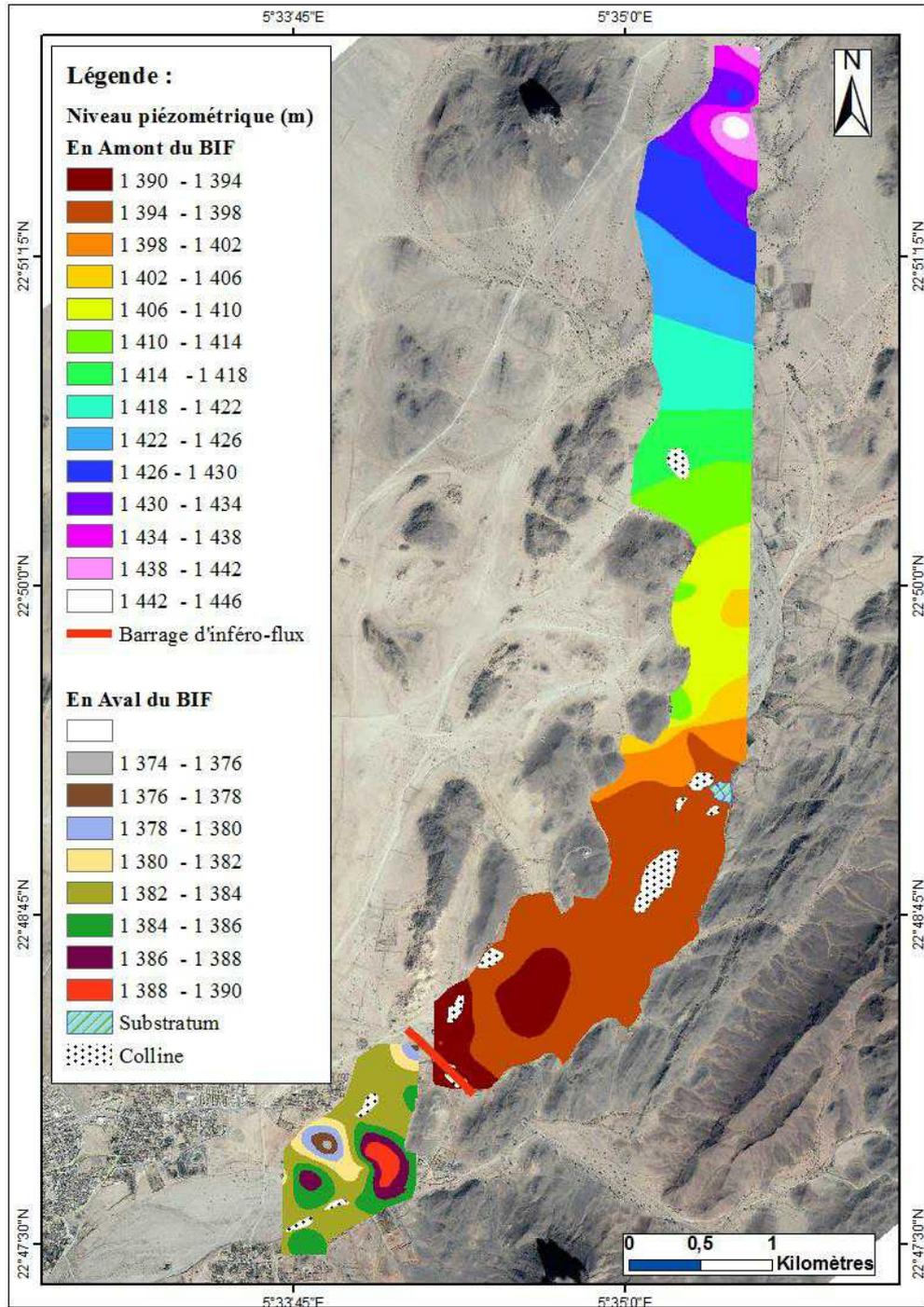


Figure 66. Carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique de la nappe inféro-flux de l'Oued Tamanrasset (02 décembre 2015).

Pour interpréter la carte piézométrique de l'Oued Tamanrasset, il est nécessaire de prendre en considération que la nappe du socle fissurée est en communication directe avec la nappe alluviale : le niveau piézométrique traduit la pression résultante de ces deux nappes en communication.

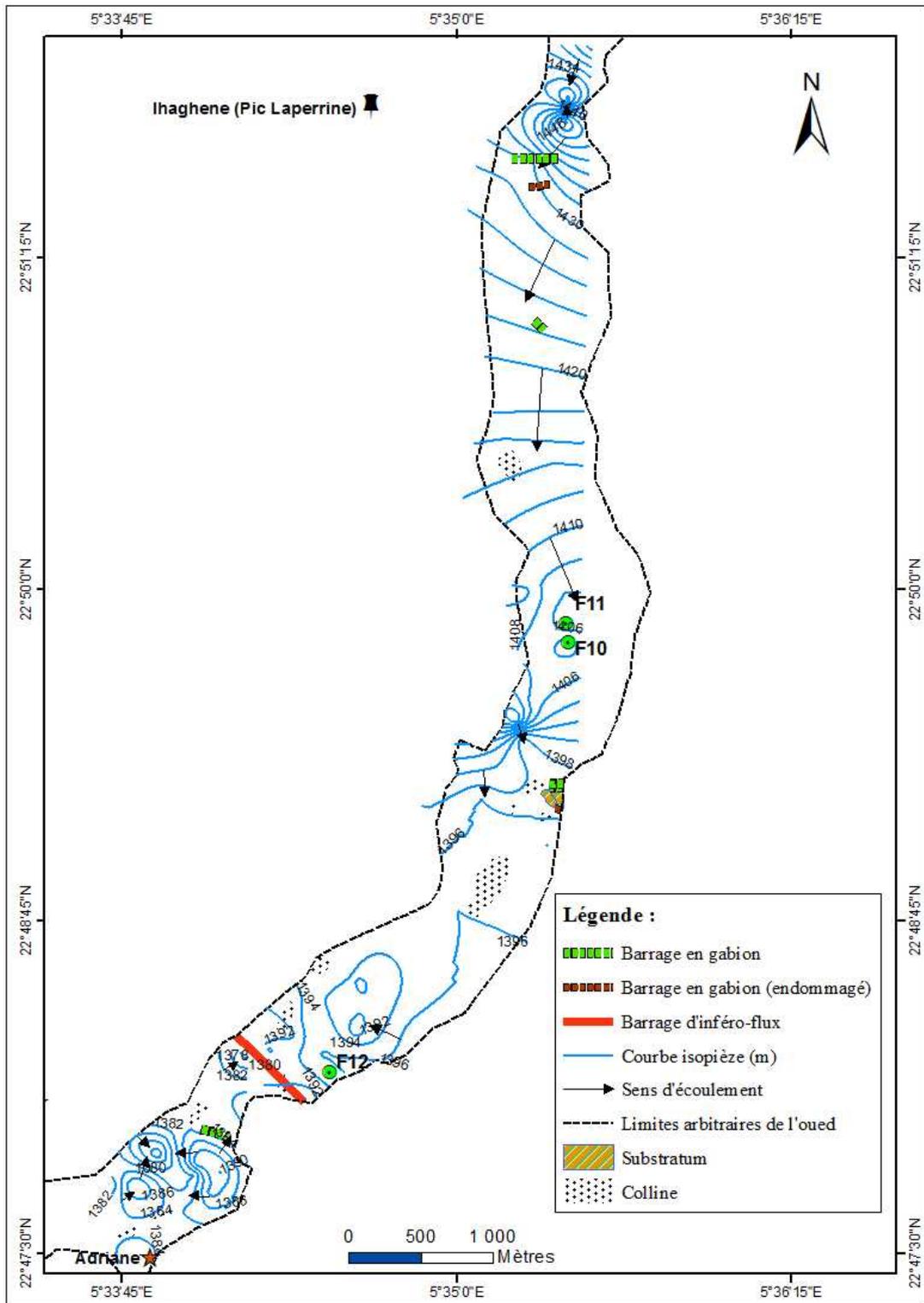


Figure 67. Carte des courbes isopièzes de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset (02 décembre 2015).

La carte en courbes isopièzes permet de relever les observations suivantes :

- l'analyse de cette carte piézométrique révèle des altitudes de courbes isopièzes variant d'un maximum de 1438 m en amont à un minimum de 1392 m près du barrage d'inféro-flux,
- En amont du barrage d'inféro-flux, l'aquifère alluvial est subdivisé en deux réservoirs (voir géométrie de l'aquifère secteur BIF1). L'allure de la carte dans cette partie amont montre que la nappe d'inféro-flux est caractérisée par un sens d'écoulement global orienté conformément à la direction de la pente de l'Oued Tamanrasset avec des gradients hydrauliques forts variant entre 2% et 4% dans le premier réservoir (que capte F11) et un gradient moyen de 1.4 % caractérisant la deuxième partie du réservoir,
- une valeur élevée du gradient hydraulique est notée juste en amont nord-ouest du secteur près de la remonté du substratum. Cette valeur peut être interprétée, soit par la sollicitation intense de la nappe par les camions citernes en plus de l'eau puisée pour l'irrigation des jardins,
- l'effet de pompage par les forages est important en amont du premier barrage en gabion,
- la zone saturée de la nappe présente une épaisseur de 10 m dans le forage F11 et une épaisseur de 4.5 m dans le forage F12.

En partie aval du barrage d'inféro-flux, la nappe est caractérisée par la présence de deux dômes piézométriques encadrant une dépression se développant en rive droite, marquées par des lignes de courant convergentes qui indiquent un effet important des pompages en cette zone.

La comparaison de la carte piézométrique entre l'amont et l'aval du barrage d'inféro-flux montre un dénivelé de 10 m de la nappe d'inféro flux. Ce dénivelé met en évidence l'effet notable du barrage sur le système aquifère de ce secteur d'étude.

III.3.2. Piézométrie de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul - BIF2 :

III.3.2.1. Inventaire des points d'eau :

La répartition des points d'eau inventoriés lors de cette étude est présentée en figure 68 :

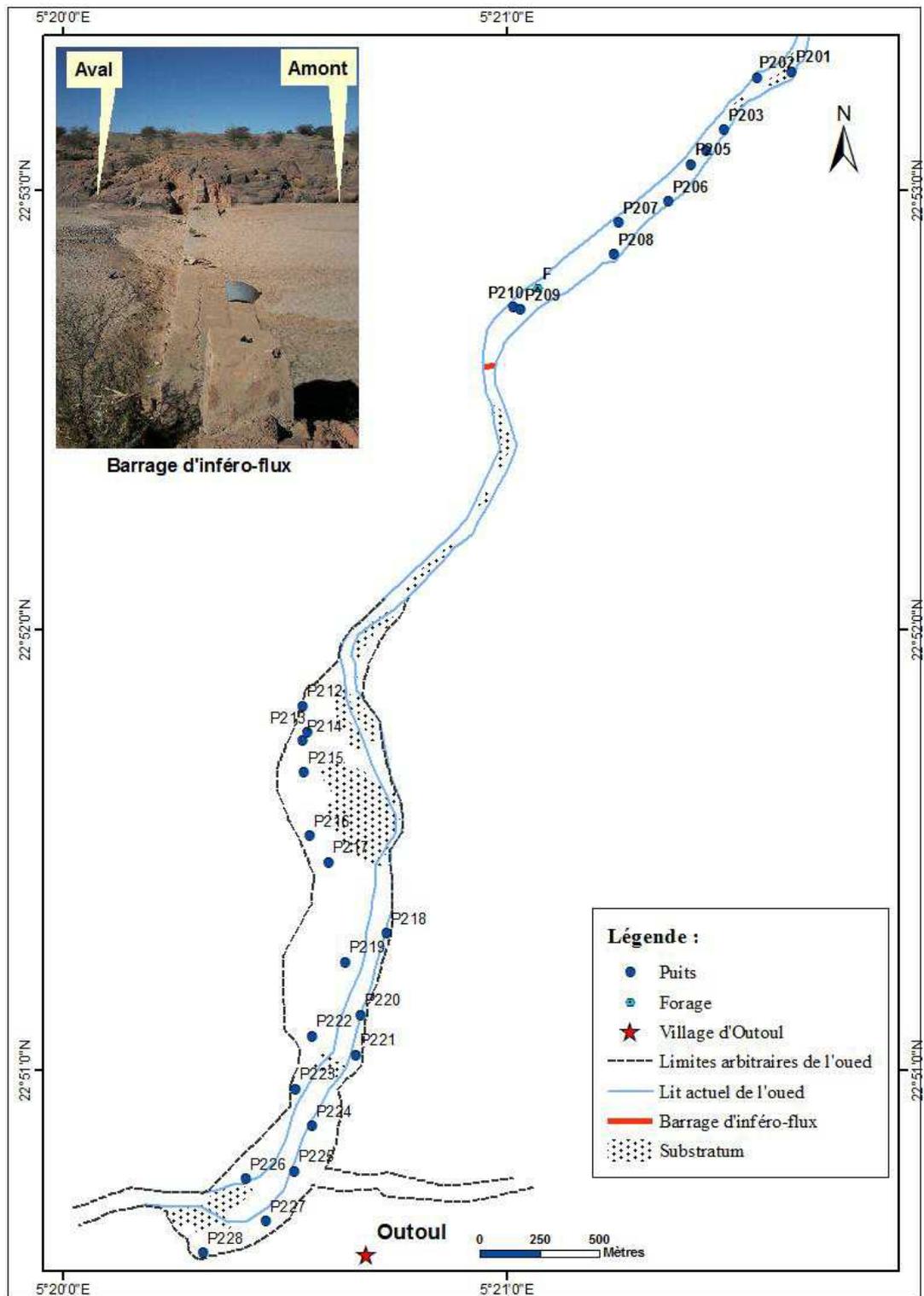


Figure 68. Inventaire des points d'eau de la nappe de l'Oued Outoul autour du site de BIF2.

III.2.2. Piézométrie de décembre 2015 :

La campagne piézométrique qui a ciblé le secteur le 21 et 22 décembre 2015 s'est basée sur la mesure du niveau piézométrique de 28 points d'eau.

L'allure de la surface piézométrique de la nappe de l'Oued Outoul (figures 69 & 70) fait apparaître, en amont du barrage, un exhaussement piézométrique atteignant la côte 1314 m, probablement due à une recharge localisée.

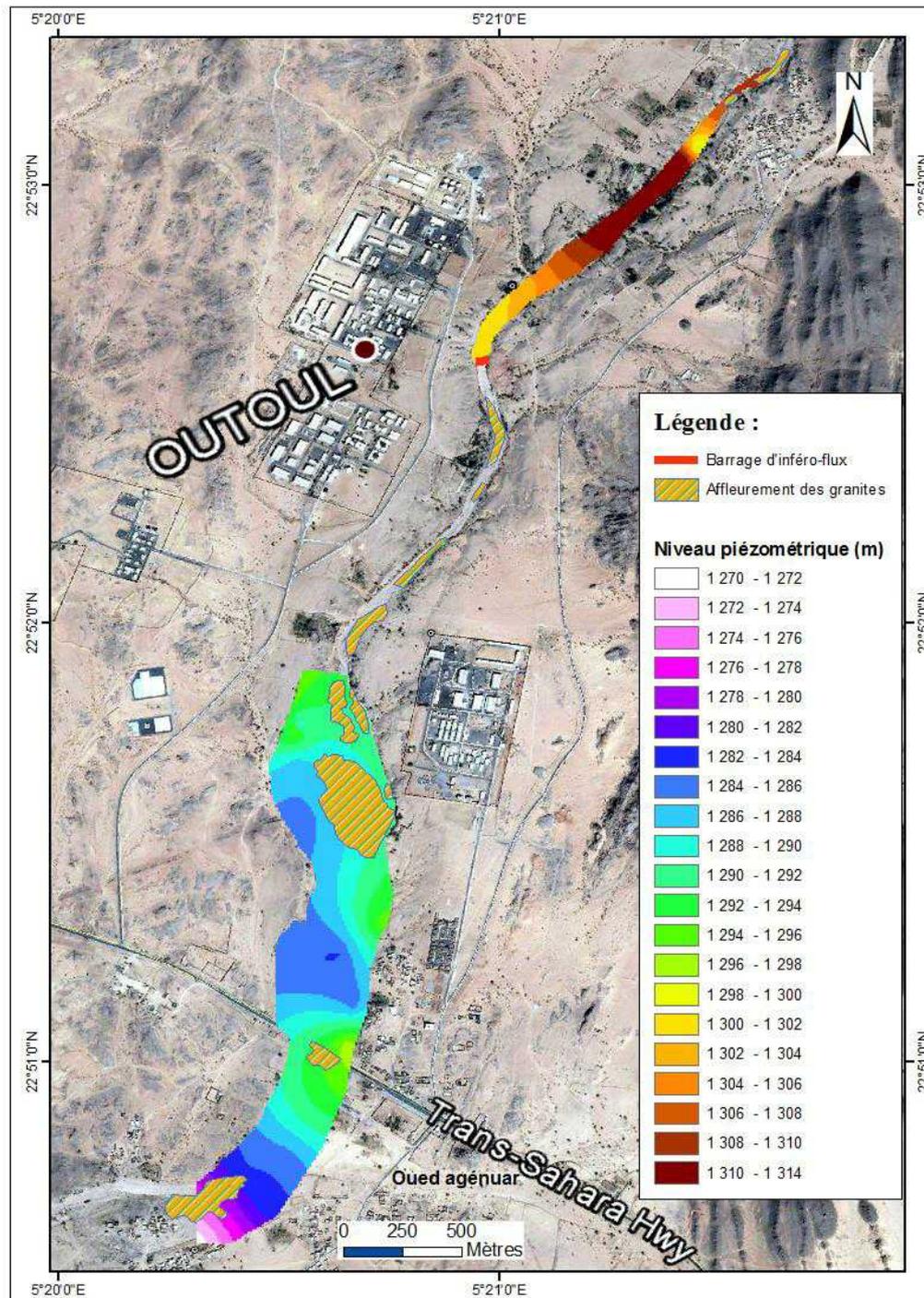


Figure 69. Carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique de la nappe de l'Oued Outoul autour du site BIF2 (21 -22 décembre 2015).

La dépression de la surface piézométrique au niveau de P204 semble causée par les pompages (Fig. 70.a).

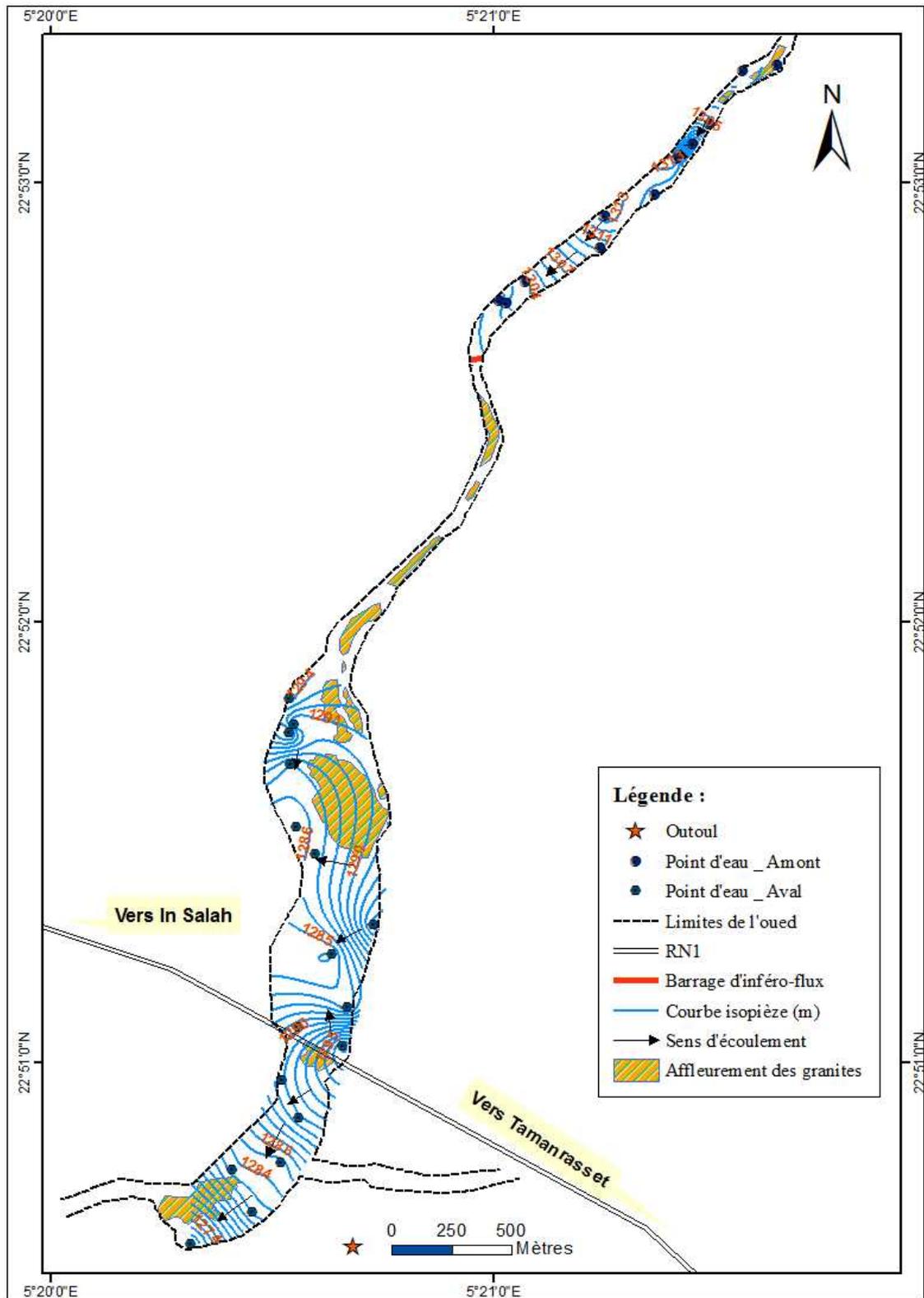
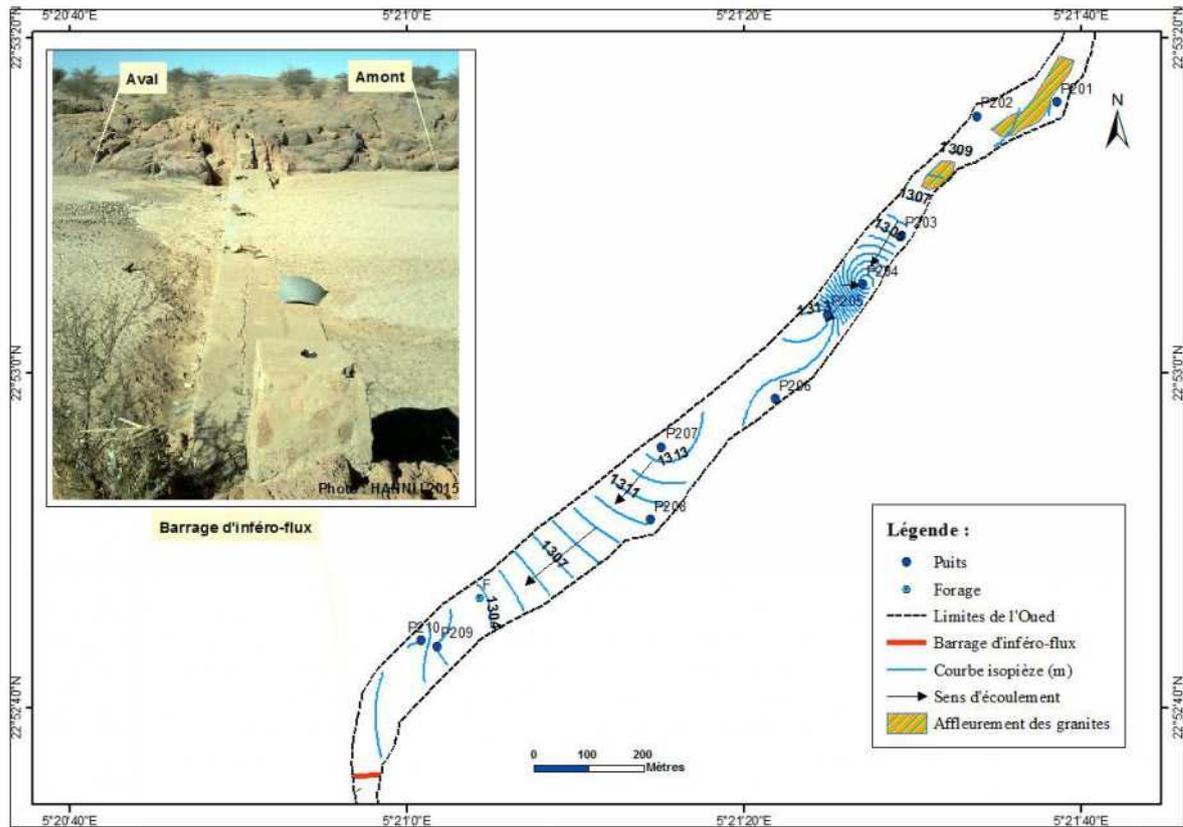


Figure 70. Carte des courbes isopièzes de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul (BIF2) (21-22 décembre 2015).



Dans la partie aval du barrage d'inféro-flux, la surface piézométrique de la nappe prend une forme déprimée, en amont de la route Transaharienne, entre deux seuils granitiques. A partir du seuil qui coïncide avec le passage de la route, la baisse du niveau piézométrique paraît régulière.

III.3.3. Piézométrie de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul-Ihelfene : site BIF3 :

Deux campagnes piézométriques, effectuées en novembre 2004 et décembre 2015, permettent de rendre compte de la piézométrie de cette nappe.

III.3.3.1. Inventaire des points d'eau :

La répartition des points d'eau pris en compte au cours des deux campagnes est présentée en figure 71.

III.3.3.2. Piézométrie de novembre 2004 (avant la construction du barrage) :

La piézométrie de la nappe autour du site BIF3 a été établie sur la base des données piézométriques de la campagne de novembre 2004, effectuée par l'ENHYD avant la construction du barrage d'inféro-flux. La campagne a été réalisée après un épisode de fortes précipitations et de crue de l'oued. La surface piézométrique présente une morphologie simple (figures 72 et 73).

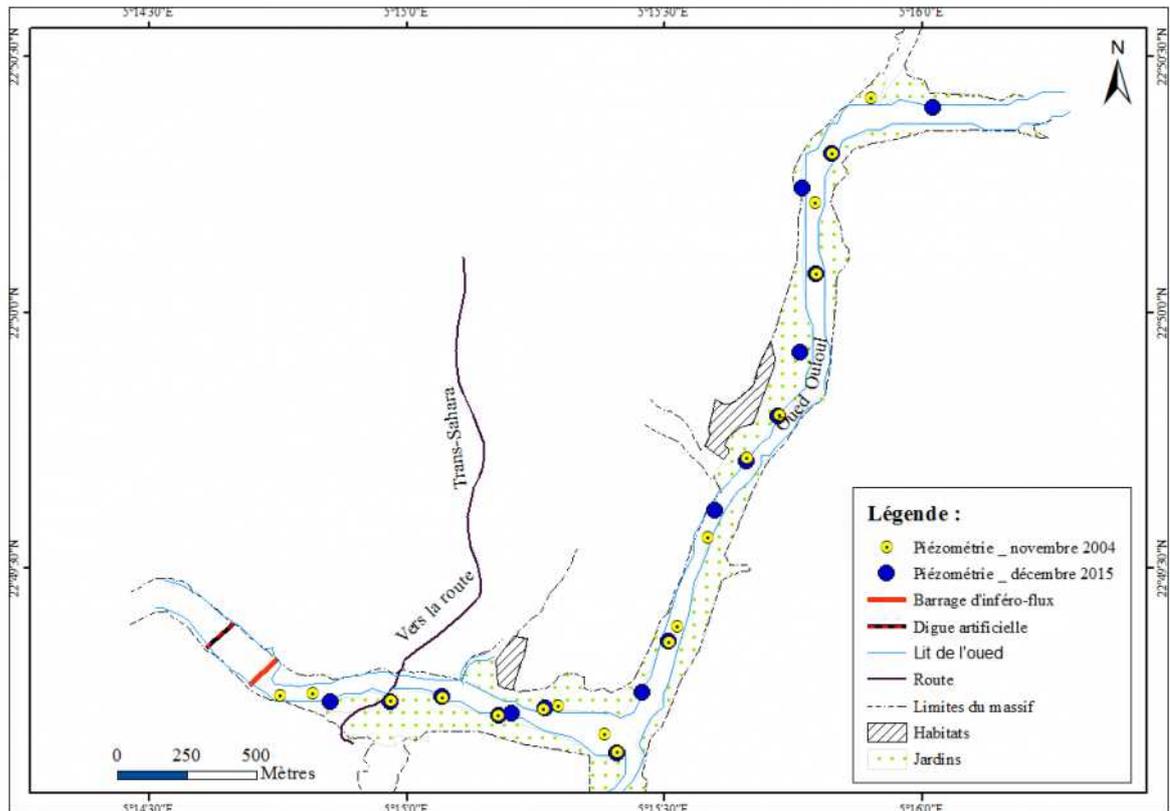


Figure 71. Inventaire des points d'eau de la nappe autour du site BIF3.

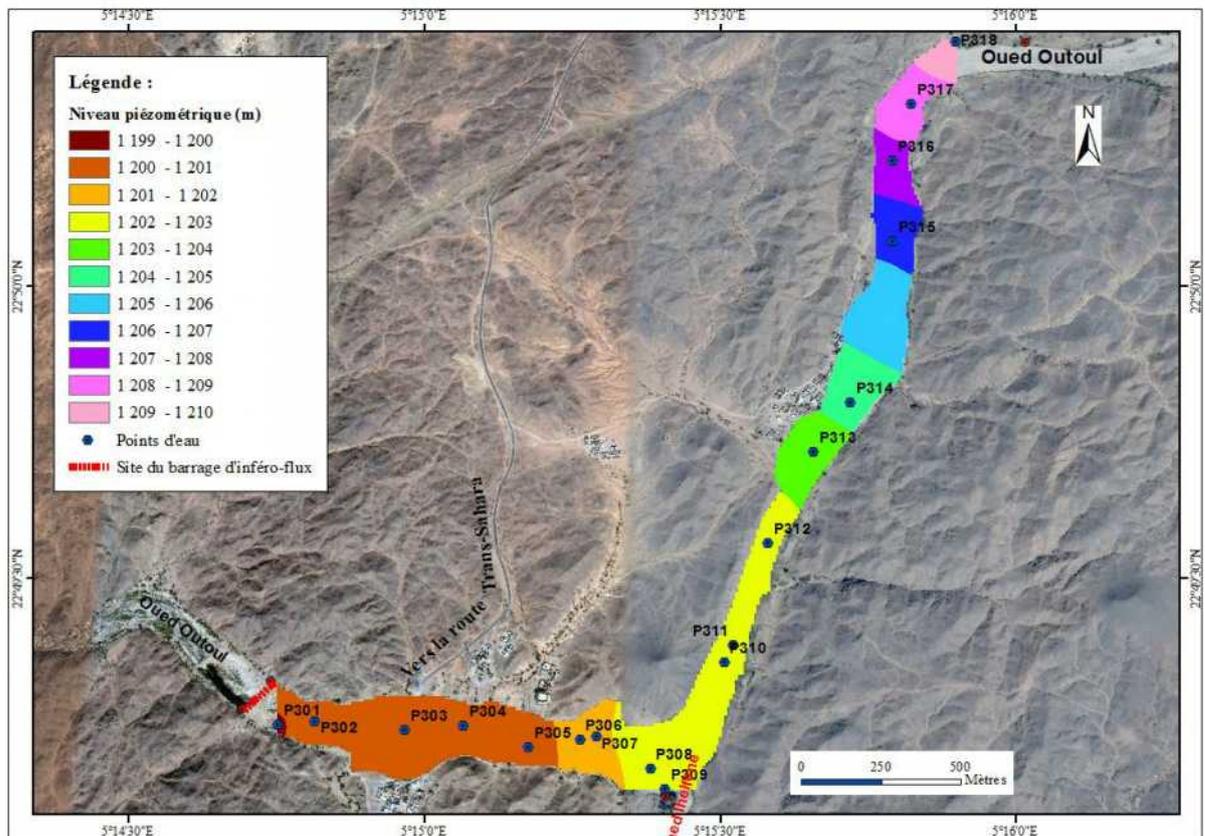


Figure 72. Carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique de la nappe infero-flux de l'Oued Outoul / site BIF3 ; novembre 2004 (données ENHYD).

Les hauteurs piézométriques décroissent d'amont vers l'aval de 1210 m à 1199 m. Le profil de la nappe est légèrement hyperbolique. Entre le puits P312 et la confluence de l'Oued Outoul avec Oued Ihelfene le gradient hydraulique est fort atténué. Il en est de même au-delà du puits P305.

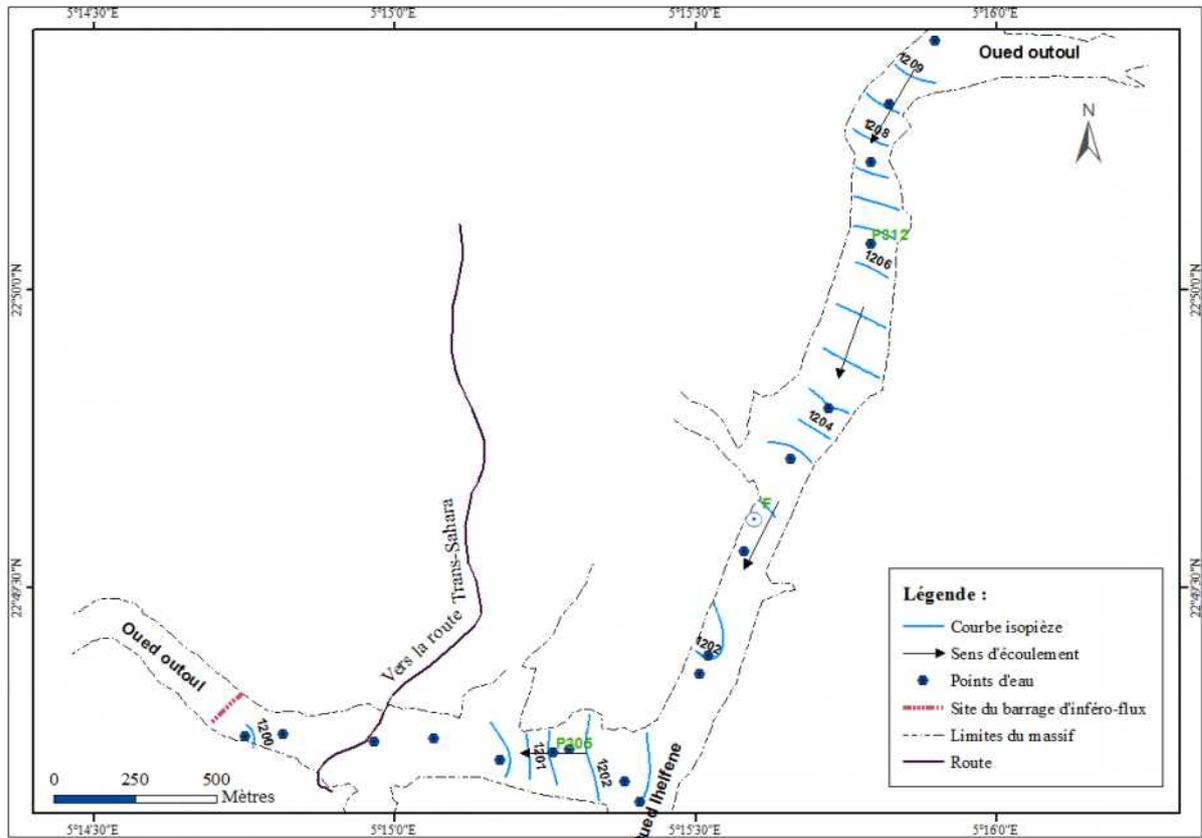


Figure 73. Carte des courbes isopièzes de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul / site BIF3; novembre 2004 (données ENHYD).

En amont du forage d'Ihelfene, les gradients hydrauliques sont réguliers. Ils varient entre 3.5 et 5.5 pour mille indiquant un écoulement uniforme de la nappe dans cette section de l'aquifère.

III.3.3.3. Piézométrie de 09 décembre 2015 :

Cette campagne a été réalisée dans le cadre de la réalisation de la présente étude. Elle a ciblé 18 points d'eau. Les figures 74 et 75 indiquent une morphologie très variable de la surface piézométrique. L'agencement des courbes isopièzes indique un sens multidirectionnel de l'écoulement convergeant vers plusieurs dépressions piézométriques. L'une centrée au niveau de P313, une autre autour de P309 et une dernière au niveau de P303 qui correspond à la hauteur minimale. Ces dépressions semblent être dues aux effets des pompes sauf autour du P313 où l'eau de la nappe apparaît à la surface (Abankour).

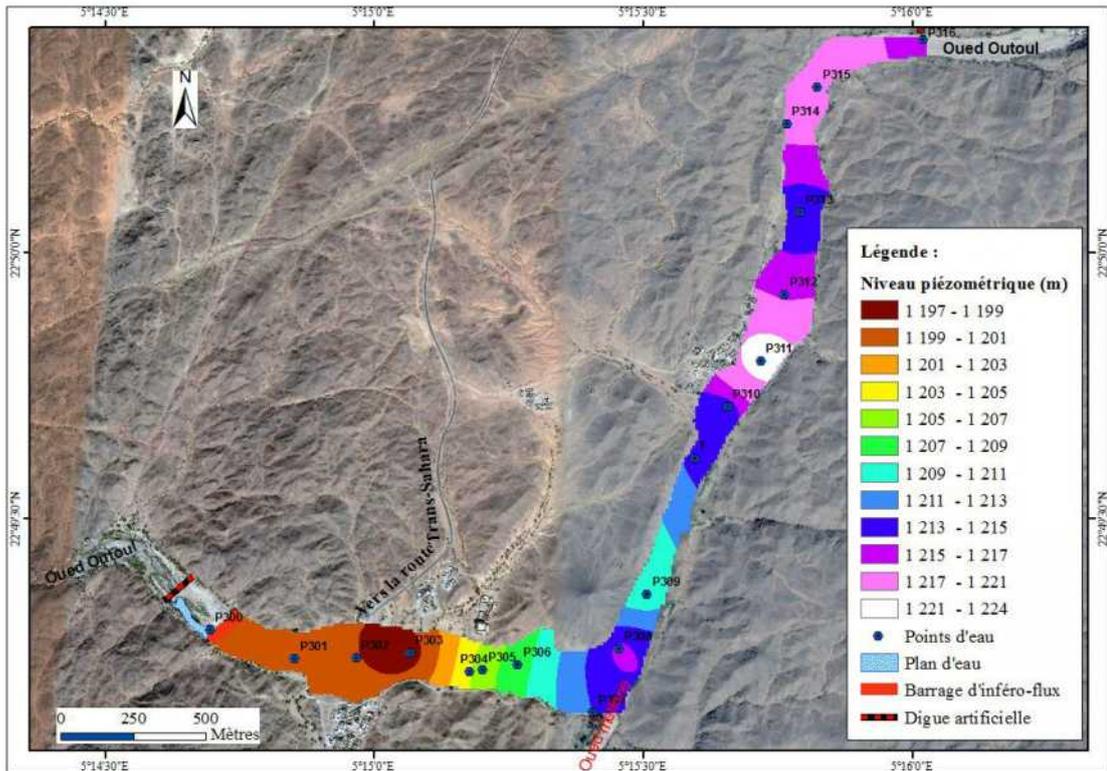


Figure 74. Carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique de la nappe d'inféro-flux du secteur BIF3 (09 décembre 2015).

Des dômes piézométriques sont également mis en évidence. L'un se localise autour de P311, l'autre au niveau de la confluence de l'Oued Outoul avec celui de l'Oued Ihelfene.

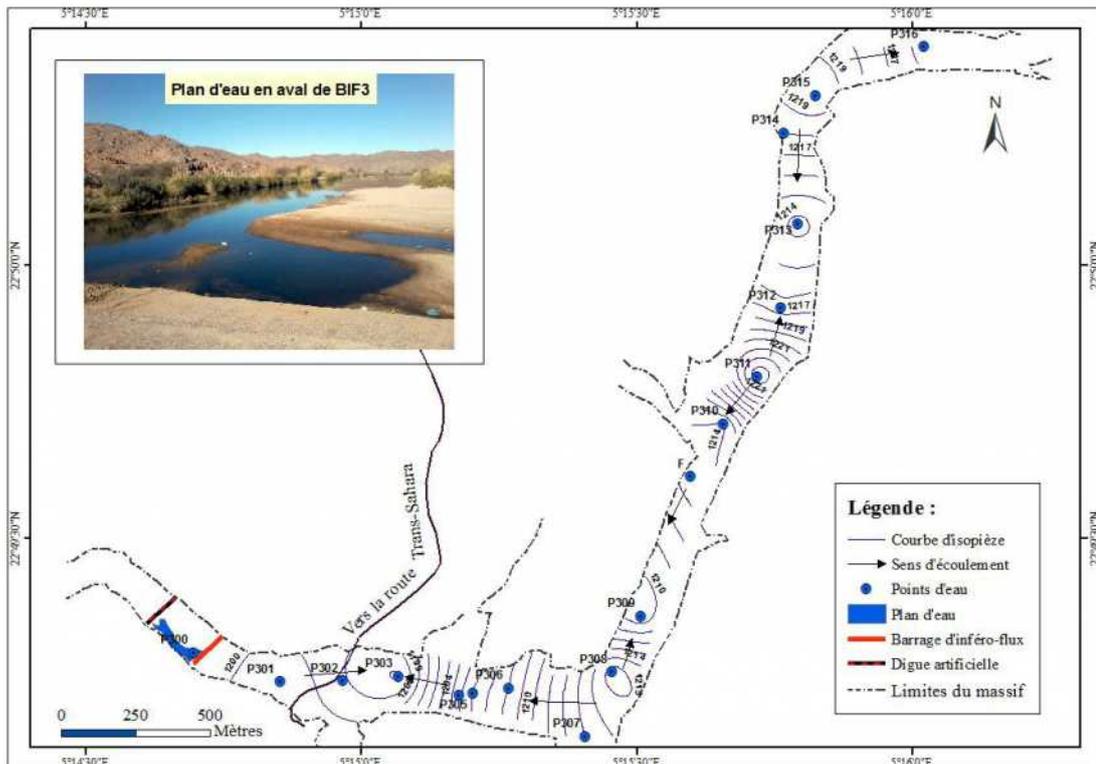


Figure 75. Carte des courbes isopièzes de la nappe du secteur BIF3 (09 décembre 2015).

Les gradients hydrauliques sont variables, 1% observés plus en amont de l'oued et quand on s'approche vers le barrage, 3.1% au niveau de la confluence des deux oueds, et un gradient plus prononcé (4.6%) correspond le sens d'écoulement qui est dirigé vers la dépression qui comporte le forage d'Ihelfene.

III.3.3.4. Discussion :

La comparaison de la surface piézométrique de la nappe alluviale de l'Oued Outoul basée sur les données piézométriques relevées en novembre 2004, avant la mise en place du barrage d'inféro-flux BIF3 avec celles relevées après sa mise en place, piézométrie de 09 décembre 2015 (Fig. 76), indique que :

- la nappe d'inféro-flux a subi une élévation de l'ordre de 7 m au niveau de l'Abankour, à environ 900 m en amont du forage d'Ihelfene et 12.5 m au niveau de la confluence de l'Oued Outoul avec l'Oued Ihelfene.

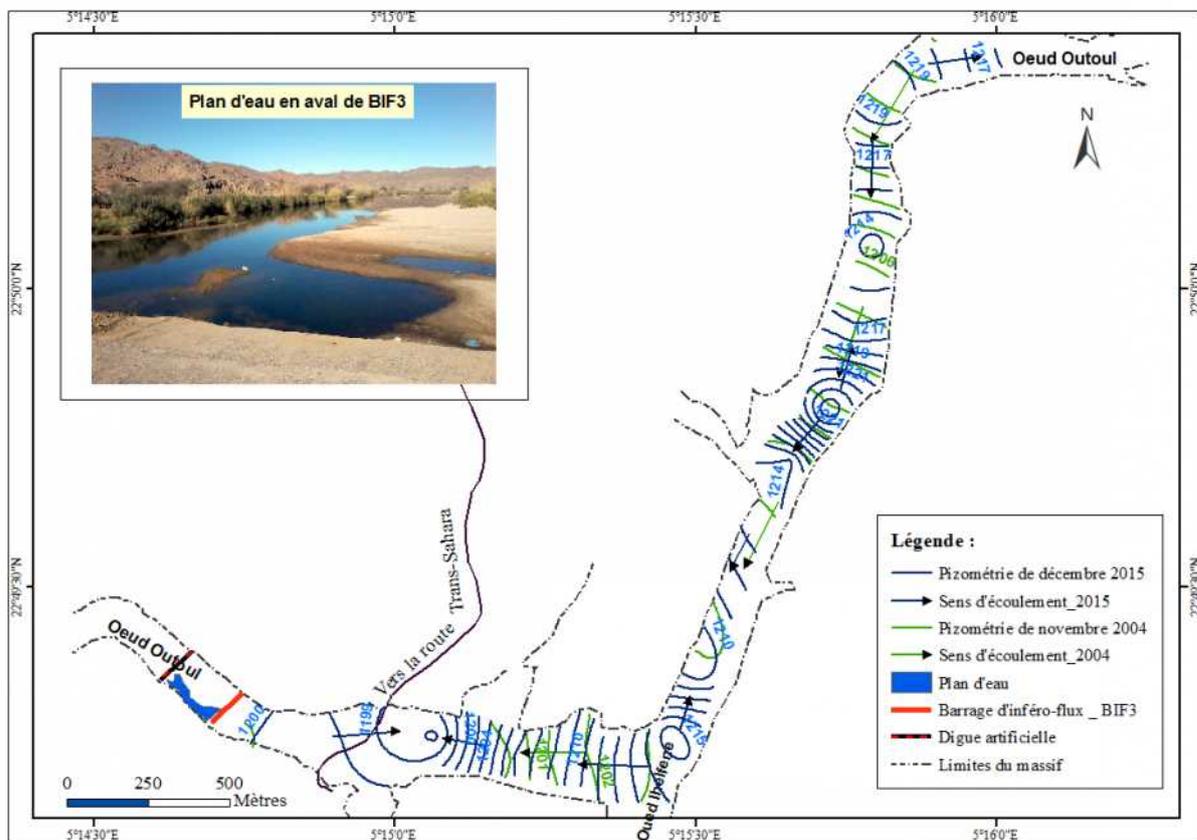


Figure 76. Variation de la surface piézométrique de la nappe d'inféro-flux autour du site du BIF3, avant et après la mise en place du barrage (piézométries de novembre 2004 et de 09 décembre 2015).

L'élévation généralisée de la surface piézométrique de cette nappe d'inféro-flux met en exergue l'impact positif de la présence de la limite étanche du barrage sur le système aquifère de ce secteur d'étude. En revanche, juste en amont du barrage, le niveau de la nappe reste invariable à la faveur de l'augmentation de l'épaisseur des alluvions de l'ordre de 1.2 m après l'aménagement de l'oued en 2009,

- dans les deux cas, la surface piézométrique de la nappe présente la même allure au niveau de la confluence de l'Oued Outoul avec celui d'Ihelfene. Ceci pourrait se

déduire de la présence d'un flux imposé, soit par la passage à ce niveau de la faille régionale, soit par une suralimentation de la nappe de l'Oued Outoul à partir de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Ihelfene,

- les gradients hydrauliques présentés par les cartes piézométriques montrent la distinction entre les valeurs déduites de la carte de novembre 2004 où les gradients sont faibles et celles déduites de la carte de décembre 2015 où les isopièzes se resserrent quand on s'approche vers les dépressions piézométriques. Les gradients hydrauliques deviennent plus prononcés.

III.3.4. Piézométrie de la nappe d'inféro-flux de l'Oued In Amguel - BIF4 :

La piézométrie de cette nappe peut être restituée à travers les résultats de trois campagnes effectuées en février 1982, avril 2015 et novembre 2015.

III.3.4.1. Inventaire des points d'eau :

La figure n° 77, présente la répartition des principaux points inventoriés et mesurés au cours de ces différentes campagnes.

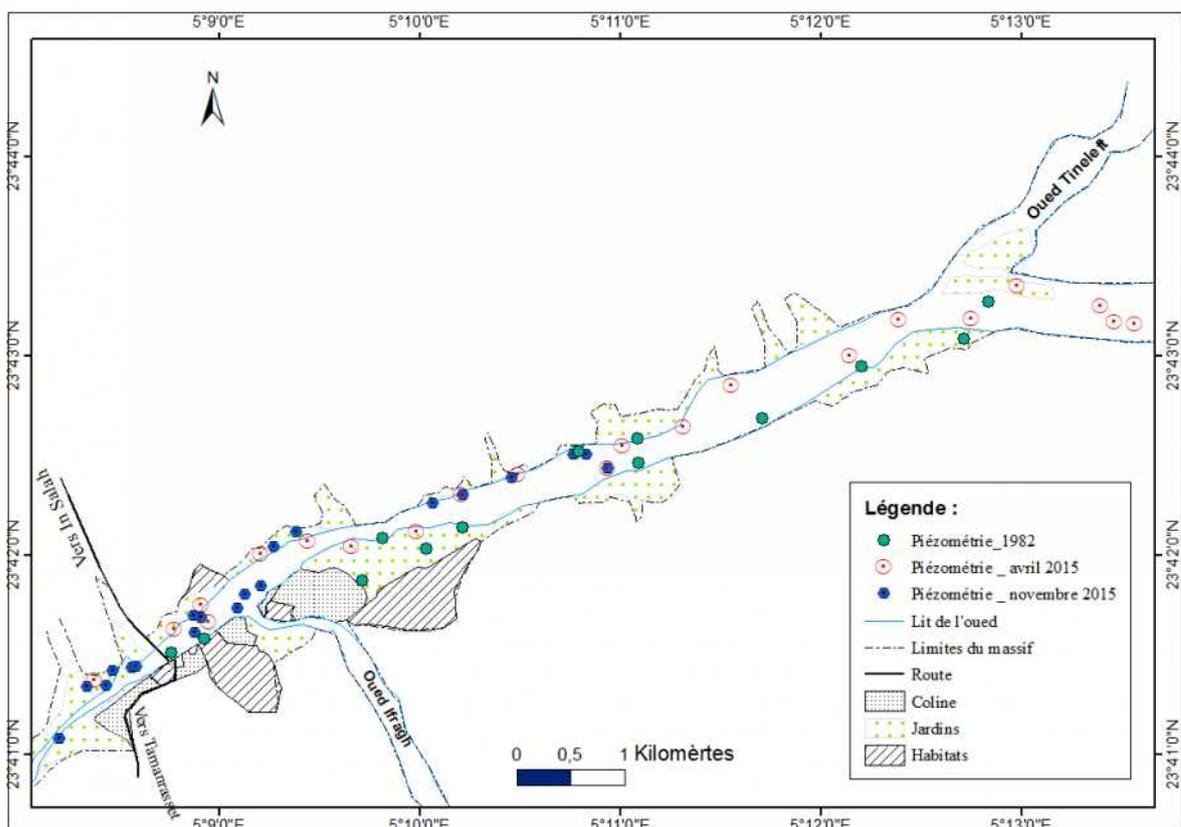


Figure 77. Inventaire des points d'eau de l'inféro-flux de l'Oued In Amguel - site BIF4.

III.3.4.2. Piézométrie de février 1982 : avant la construction du barrage :

La campagne piézométrique a été réalisée sous l'égide de la direction des ressources hydrauliques de la wilaya de Tamanrasset au cours de l'année de réalisation des forages F0 à F7 (Fig. 78).

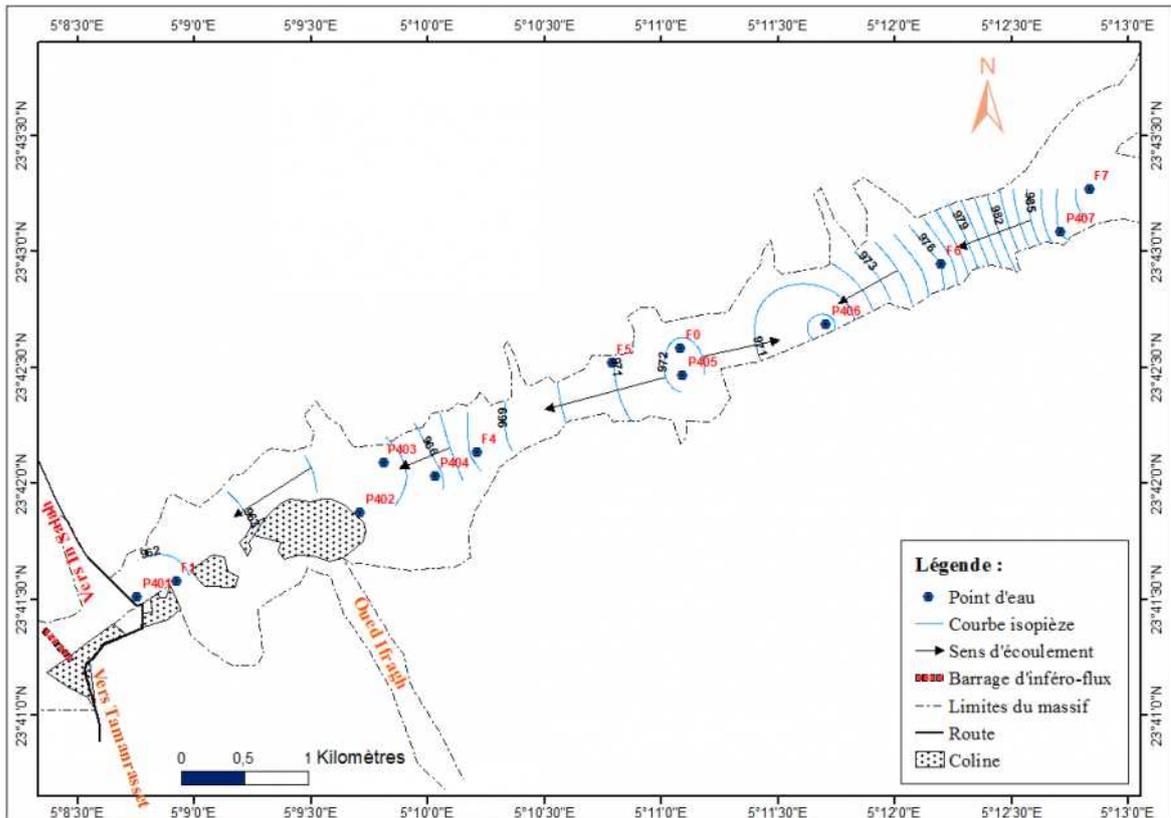


Figure 78. Carte des courbes isopièzes de la nappe d'inféro-flux de l'Oued In Amguel (DRE Tamanrasset, février 1982).

La carte en courbes isopièzes (Fig. 78) indique que l'écoulement général de la nappe est globalement dirigé vers l'aval avec des gradients hydrauliques variables. Néanmoins, l'écoulement général est perturbé par une dépression piézométrique marquée autour du puits P405. Plus en aval, la baisse est plus ou moins régulière jusqu'à se stabiliser vers 961 m au niveau de l'emplacement actuel du barrage BIF4 (non existant à l'époque).

III.3.4.3. Piézométrie d'avril 2015 (Draïbet, 2015) :

Les figures 79 et 80 visualisent la surface piézométrique de la nappe alluviale de l'Oued In Amguel. La carte piézométrique d'avril 2015 a été établie après 25 jours de crue de l'Oued In Amguel. Vingt et un points d'eau ont fait l'objet de cette campagne piézométrique.

Sur toute la portion de vallée étudiée, le niveau piézométrique paraît nettement exhaussé par rapport à celui de février 1982. En amont immédiat de la digue, le niveau se stabilise à 965 m. La progression des isopièzes est relativement régulière perturbée en partie centrale par deux dépressions centrées autour des puits P413 et P409, résultantes probablement par l'effet des pompes exercés sur la nappe.

Les gradients hydrauliques ne présentent pas une variation trop marquée.

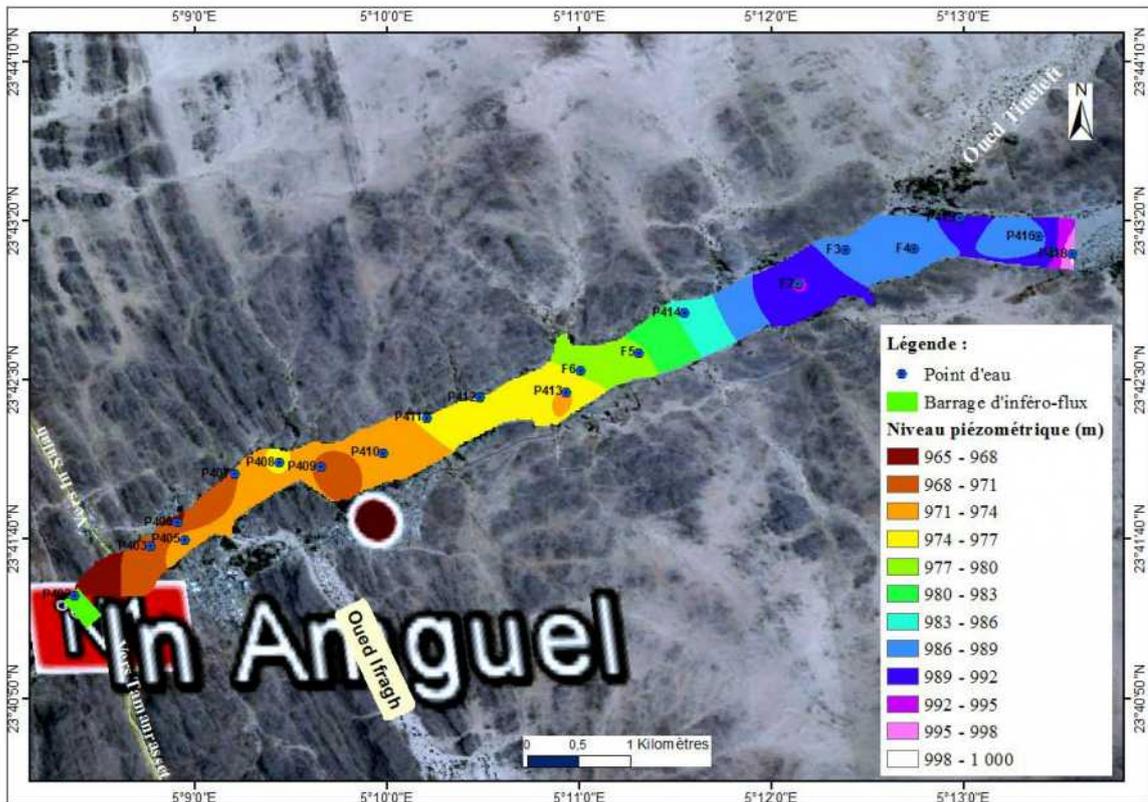


Figure 79. Carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique de la nappe d'infero-flux de l'Oued In Amguel (Draibat, avril 2015)

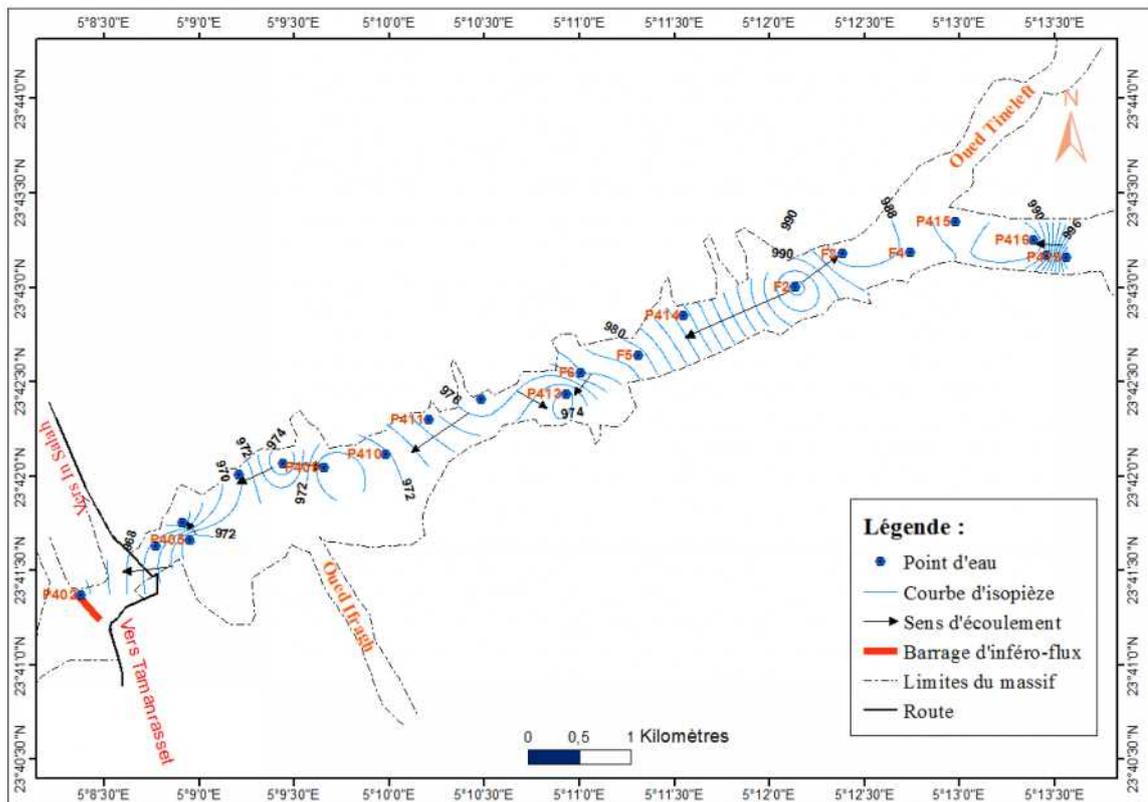


Figure 80. Carte des courbes isopièzes de la nappe d'infero-flux de l'Oued In Amguel (Draibat, avril 2015)

III.3.4.4. Piézométrie de 26 novembre 2015 :

La campagne piézométrique couplée à celle de l'échantillonnage des points d'eau a été réalisée dans le cadre de la préparation du présent travail. La campagne n'a concerné que le tronçon aval de la vallée à partir du puits P420. Elle a concerné la mesure de 20 points d'eau.

L'allure de la carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique (figures 81 & 82) fait ressortir qu'en amont, la hauteur piézométrique se stabilise à 977 m.

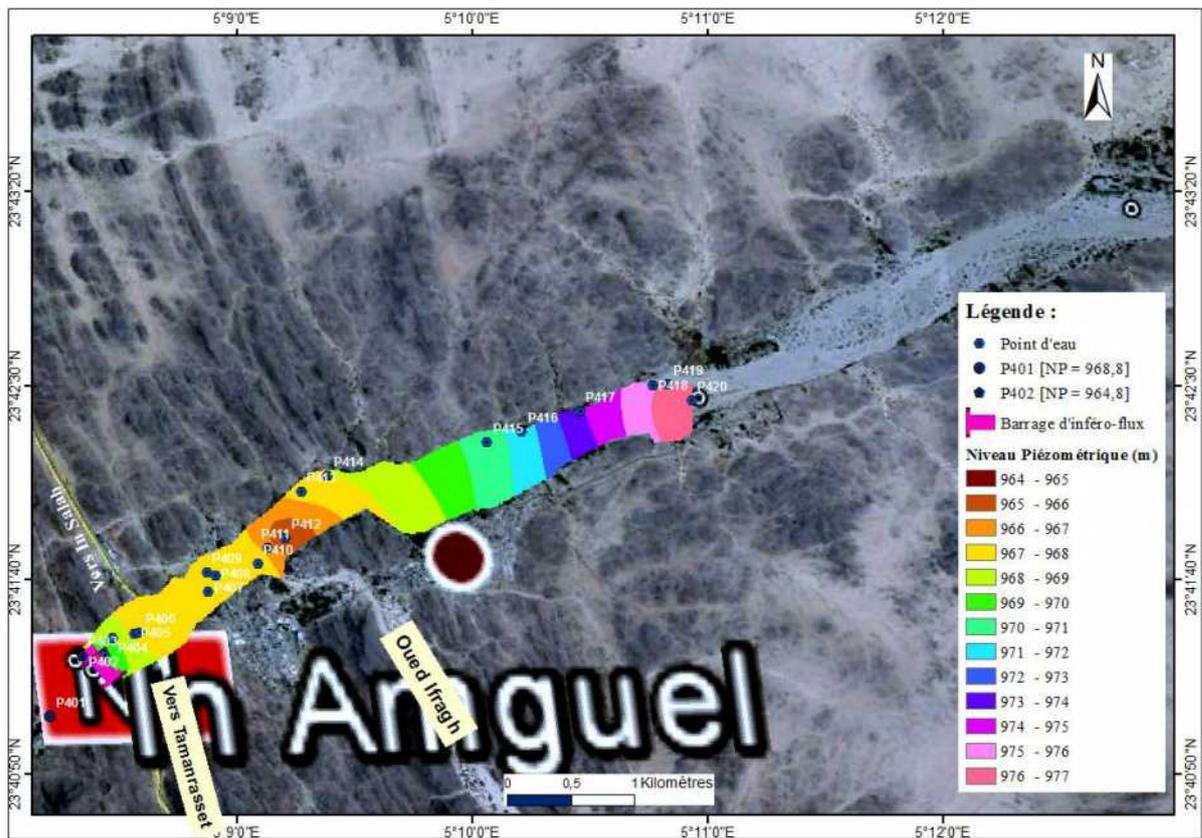


Figure 81. Carte de la répartition spatiale de la surface piézométrique de la nappe d'infero-flux de l'Oued In Amguel (26 novembre 2015)

Après une progression des isopiètes, à équidistance régulière, il est noté une dépression piézométrique autour du puits P411 (965 m).

Au niveau de la digue (amont), l'exhaussement du niveau piézométrique est net, stabilisé à 969 m.

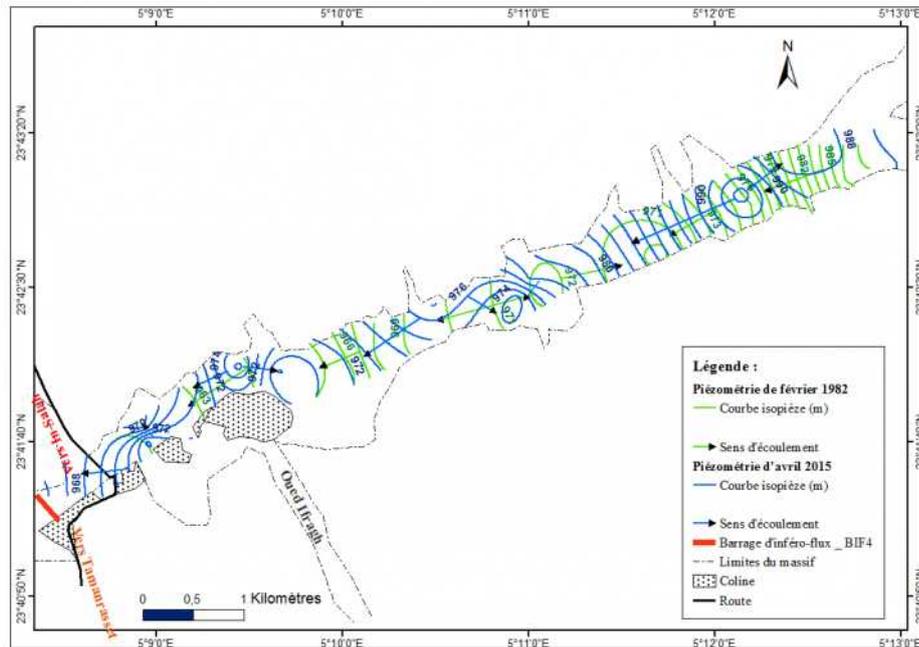


Figure 83. Variation de la surface piézométrique de la nappe d'inféro-flux de l'oued In Amguel, avant et après la mise en place du barrage (piézométries de février 1982 et d'avril 2015).

Globalement, la corrélation entre les cartes piézométriques réalisées et celle du toit de substratum (Fig. 85, et 86 en annexe) nous permet d'estimer que la nappe d'inféro-flux de l'Oued In Amguel est caractérisée par une épaisseur de la zone saturée variant entre 11 et 18 m antérieurement à la construction du barrage, et entre 16 et 29 m postérieurement à sa réalisation. Ces résultats confirment l'effet certain du barrage BIF4 sur l'exhaussement de la surface piézométrique de la nappe.

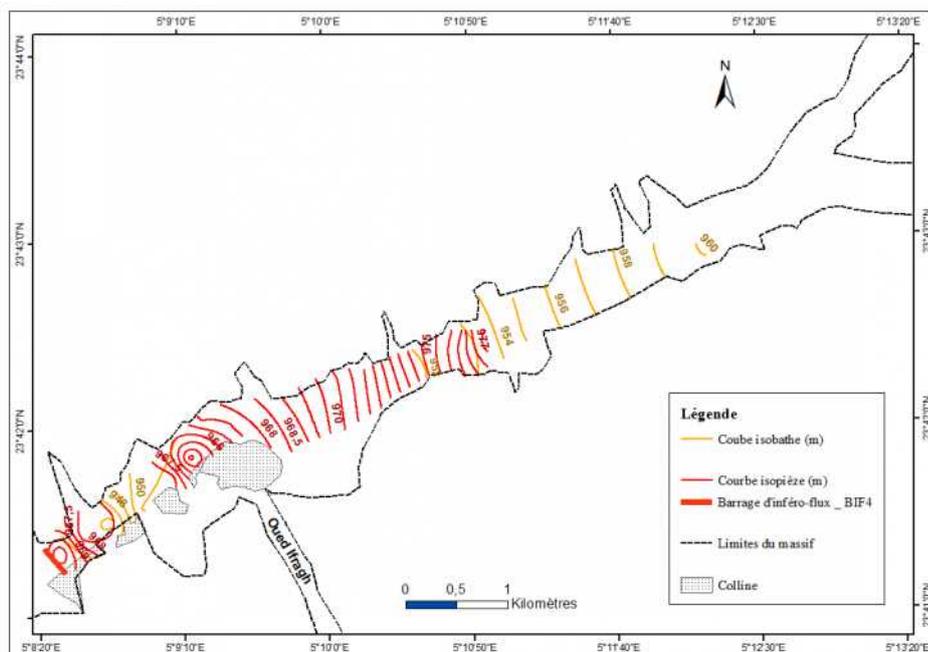


Figure 85. Corrélation de la carte en courbes isopéziées - piézométrie de novembre 2015- avec celle en courbes isobathes de l'aquifère alluvial de l'Oued In Amguel.

Conclusion :

L'étude hydrodynamique s'est basée, en grande partie, sur les données piézométriques acquises au cours du présent travail. La morphologie de la surface des nappes est essentiellement de type radiale à espacement variable des isopièzes. L'allongement des vallées et la répartition des puits présents ne permettent pas de bien identifier la divergence ou convergence des écoulements, sauf au niveau des zones fortement sollicités par les pompes ou on note des dépressions piézométriques. Le rôle de verrou joué par des remontées ou affleurement du substratum rocheux perturbe également de façon variable l'allure des isopièzes.

Par ailleurs, l'étude piézométrique montre que :

- la comparaison des cartes piézométriques établies après la construction des barrages d'inféro-flux et celles établies antérieurement a permis de déduire que les nappes d'inféro-flux de l'Oued Outoul (BIF3) et celle de l'inféro-flux de l'Oued In Amguel (BIF4) ont subi des exhaussements notables du niveau d'eau en amont des digues,
- les gradients hydrauliques ressortant dans les différentes cartes piézométriques établies avant et après la mise en place des barrages montrent des différenciations non négligeables,
- la nappe d'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset indique un dénivelé de 10 m entre l'amont et l'aval du barrage d'inféro-flux BIF1.

L'étude piézométrique a mis en évidence l'impact bénéfique des barrages d'inféro-flux sur la piézométrie en amont, plus ou moins immédiat, de chaque nappe étudiée. Toutefois un suivi à long terme des points de mesure, spatialement bien repartis et bien nivelés, sont indispensables pour confirmer et mieux valider l'efficacité, déjà identifiée ou à venir (effet du vieillissement des ouvrages), de ces barrages d'inféro-flux.

Chapitre IV :

***Etude hydrochimique des nappes
alluviales autour des sites d'étude***

Etude hydrochimique :

L'étude de la chimie des eaux souterraines est une méthode de prospection hydrogéologique qui permet en premier lieu la caractérisation des aquifères. En effet, la composition chimique des eaux souterraines dépend en grande partie du type de roche encaissante, des évolutions hydrodynamiques des écoulements de la nappe, de la profondeur de la circulation et de la zone climatique. L'étude de la chimie des eaux permet également de rendre compte des interactions avec le milieu anthropique et d'apprécier la qualité de ces eaux en tant que ressource pour les différents usages : alimentation humaine, eau verte, industrie, etc.

IV.1. Modalités de réalisation des campagnes hydrochimiques :

Dans le cadre de cette étude, parallèlement à la réalisation des campagnes piézométriques, nous avons échantillonné 43 points d'eau souterraine lors de la période s'étendant du 12 mai au 04 juin 2016.

Cet échantillonnage s'est effectué avant la période de crue des oueds qui survient épisodiquement lors la période humide : juin – septembre. Le but est d'obtenir des teneurs en éléments chimiques caractérisant au mieux les eaux s'écoulant en inféro-flux. La répartition des échantillons selon leur provenance est mentionnée dans le Tableau IV.1.

La caractérisation de ces eaux concerne essentiellement l'analyse des paramètres physico-chimiques de base (pH, température et conductivité) et les éléments majeurs.

Pour chaque échantillon, le pH, la conductivité électrique (CE) et la température (T) ont été mesurés directement sur le terrain.

L'analyse des teneurs en ions majeurs des échantillons prélevés a été effectuée au laboratoire régional d'analyses chimiques dépendant de l'ANRH d'Adrar. Les ions analysés sont : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^- .

L'analyse suivie de l'interprétation de ces informations permettra d'identifier les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines des nappes d'inféro-flux de la région d'étude, et de mieux comprendre l'effet des barrages d'inféro-flux sur l'hydrodynamisme et l'hydrochimisme des aquifères alluviaux.

Tableau IV.1 : répartition des échantillons prélevés selon les secteurs d'étude.

Aquifère alluvial	Date de prélèvement (2016)	Nombre d'échantillons	Période de réalisation de l'analyse (2016)
Oued Tamanrasset (BIF1)	14 et 15 mai	14	18 – 25 mai
Oued Outoul (BIF2)	12 et 13 mai	9	18 – 25 mai
Oued Outoul (BIF3)	12 mai	8	18 – 25 mai
Oued In Amguel (BIF4)	04 juin	12	/

IV.2. Caractérisation hydrochimique des eaux de l'ensemble des nappes étudiées :

IV.2.1. Caractérisation des points d'eau échantillonnés :

Les points d'eau échantillonnés lors de nos différentes campagnes hydrochimiques correspondent essentiellement à des puits. Lorsque ces points d'eau ne correspondaient à ceux retenus pour la campagne piézométrique, nous leur avons donné une nomenclature indépendante, appliquant le même mode de numérotation, c'est-à-dire, les puits sont numérotés en fonction de secteur dans lequel ils sont localisés. Le premier chiffre correspond au numéro de secteur, et les deux derniers chiffres représentent le numéro du point d'eau.

IV.2.2. Fiabilité des données acquises :

Le contrôle de la validité de nos résultats d'analyse chimique est établi à l'aide de la balance ionique e .

$$e = \frac{\sum r \text{ cations} - \sum r \text{ anions}}{\sum r \text{ cations} + \sum r \text{ anions}} * 100 \text{ en \%}.$$

avec : ($\sum r \text{ cations}$, $\sum r \text{ anions}$) en milliéquivalents par litre

L'analyse est déclarée :

- Très bonne, si $e \leq 2\%$
- Acceptable, si $2\% < e < 5\%$
- Des erreurs dans sa valeur, si $e \geq 5\%$.

Le tableau IV.2 présente les résultats des analyses chimiques ainsi que la balance ionique de toutes les eaux analysées.

Les résultats relatifs aux balances ioniques indiquent que l'ensemble des échantillons révèlent globalement une très bonne analyse ($e \leq 2$), à l'exception de trois échantillons caractérisés comme analyse acceptable.

Chapitre IV : Etude hydrochimique des nappes alluviales autour des sites d'étude

Tableau. IV.2 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux des différentes nappes alluviales (mg/l), (e en %).

Point d'eau	pH	T (°C)	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	NH4	NO2	PO4	MO	SiO2	e
P113	6,48	25,6	4100	247	149	400	1,6	606	1000	198	33	16,25	0,16	0,2	3,4	11	0,3
P112	6,85	26,9	950	40	30	90	0,9	140	117	109,8	21,613	0,022	0,048	0,212	0,1	11	-1,0
P111	6,88	26,5	1472	92	82,5	82,6	1,2	130	300	225,7	64,081	0,095	0,109	0,039	2,1	10	1,1
P110	6,86	25,8	1258	60	62,5	65	1,2	100	300	91,5	25,649	0,098	0,006	0,216	0,06	12	-0,1
P109	6,14	25,5	608	40	27,5	27,1	0,8	40	20	213,5	27,774	0	0,0072	0,059	0,2	11	-0,4
P108	6,77	27,6	1657	56	40	220	1,1	300	270	118,95	27,899	0,085	0,0006	0,203	7,7	11	-2,7
P107	7,17	25,1	446	40	12,5	24	0,9	15	12	192,15	9,208	0	0,0007	0,101	2,6	12	1,5
P106	6,58	25,5	796	28	32,5	80	1,4	50	20	311,1	30,93	0,019	0,0045	0,284	0,7	14	1,0
F12	5,77	26,8	936	40	50	68	3,1	23	26,11	472,75	10,575	0	0	0,083	0,9	17	0,2
P105	8,17	25,2	275	32	5	19,6	0,8	25	0,54	112,85	20,361	0,015	0,0004	0,272	0	11	-0,3
P104	7,41	27,1	554	40	27,5	35	1,1	53	45	192,15	25	0	0	0,073	0,9	11	-1,6
P103	6,91	26,4	317	36	2,5	22	0,7	18	4	128,1	20,264	0,011	0,0011	0,167	0,4	12	-0,7
P102	7,49	26,4	335	40	5	20,34	0,7	30	12,67	131,15	10,124	0,004	0	0,069	0,4	12	-1,8
P101	7,23	26	435	20	27,5	25,2	0,8	36	12,15	173,85	20,369	0,0506	0,0011	0,167	0,2	14	-0,9
P205	6,76	25,6	701	40	37,5	52	1,2	80	69,35	176,9	42,369	0	0	0,141	9	9	0,5
P206	6,87	25,5	379	40	5	29,6	1,1	44	15,6	128,1	15	0,035	0	0,242	0,3	8	-2,6
P207	6,6	25,1	1399	72	30	184,3	0,6	266	100,62	305	9,74	0,059	0	0,100	1,1	12	-2,5
P208	6,68	25,4	798	40	45	45,1	2	66	115,91	155,55	50,815	0,05	0	0,227	0,1	7	0,3
P209	6,9	25,7	596	32	27,5	48,6	1,5	71	40	189,1	21,018	0,033	0	0,120	0,1	9	-2,2
P202	6,72	27,2	325	40	10	11,8	1,1	18	38,45	122	13,625	0,089	0	0,246	0,3	8	-2,5
P201	6,81	27,3	407	40	12,5	15,4	1,8	22	40	122	16,061	0	0	0,266	0,5	9	0,3
P203	6,85	24,9	329	20	20	15,9	1,1	20	30,6	122	16,691	0,017	0	0,302	0,5	10	-1,6
P204	7,1	24,8	222	20	12,5	7	1,1	15	2,78	97,6	8,855	0,083	0,0006	0,276	0,6	8	2,9
P308	6,76	25,6	290	40	12,5	16,87	1,6	28,92	50	109,8	7,12	0	0,087	0,249	0,2	7	0,3
P307	6,48	25,5	253	16	15	10,5	1,2	15	22	85,4	15,96	0	0,042	0,460	0,3	9	0,0
P306	6,88	24,6	256	36	3	12,95	1,6	21	30	76,25	10,096	0	0	0,269	0,1	7	-0,1
P305	6,6	25,3	351	40	15	5	1,5	3	26,91	164,7	12,402	0	0,053	0,386	0,2	8	-0,8
P304	6,7	25,4	298	37	5	17,92	1,6	30	20	91,5	8,729	0	0,045	0,387	0,8	8	3,1
P303	7,06	23,1	345	41	10	16,22	2,5	25	26,125	131,15	14,764	0	0,0501	0,284	1	7	0,5
P302	6,72	23,9	415	33	23	12,58	1,9	20	30	155,55	4,905	0	0,091	0,101	0	7	4,1
P301	7,66	25,1	490	37	26	27,11	1,9	45	56,19	152,5	7,217	0,134	0,045	0,224	0,1	8	1,3
P404	7,11	26	950	68	25	83	2,9	96	97,09	275	0	0,227	0,001	0,307	0,2	13	-0,7
P401	7,23	24,3	922	44	40	85	2,5	70	44,24	366	7,0078	0,085	0,0022	0,120	1,5	13	1,2
P402	7,23	24,8	545	40	5	60	2,1	60	41,02	183	2,3377	0,0947	0,0131	0,330	1,2	13	-4,9
P403	7,13	24	1112	48	55	100	3	150	140	275	12,843	0,1078	0,0742	0,074	1,2	11	-2,4
P405	7,13	25,2	870	40	35	98	2,9	70	62,3	381	2,132	0,112	0,042	0,519	0,3	16	-1,9
P406	7,24	25,7	477	24	13	66	1,8	48	28,49	183	12,437	0,075	0,0169	0,519	0,3	16	0,2
P407	7	26	835	40	25	110	2,4	80	57,12	320	3,478	0,0571	0,0081	0,591	0,8	16	0,7
P408	7,03	25,6	620	40	18	80	2,2	50	43,46	256	25,603	0,0749	0,0044	0,265	1,4	17	0,5
P409	6,96	26,2	756	40	25	90	2,3	120	56,01	183	9,6258	0,142	0,0186	0,521	1,1	17	1,8
P410	7,1	26,8	613	20	35	57	1,9	60	34,1	229	12	0,099	0,0201	0,327	1,2	17	0,3
P411	7,08	26,6	715	40	33	56	2,1	80	46,65	238	10,81	0,1108	0,0146	0,506	2,7	18	-0,8
P412	6,62	26,2	457	28	18	45	1,9	45	12,05	183	23,238	0,062	0,0053	0,259	9,6	15	-0,2

L'autre argument qui vient appuyer la fiabilité des analyses chimiques est la corrélation linéaire entre la somme des ions et la conductivité électrique mesurée in situ (Fig. 87) qui est très bonne ($R^2=0,99$). On peut supposer que les procédures analytiques effectuées en laboratoire sont bonnes.

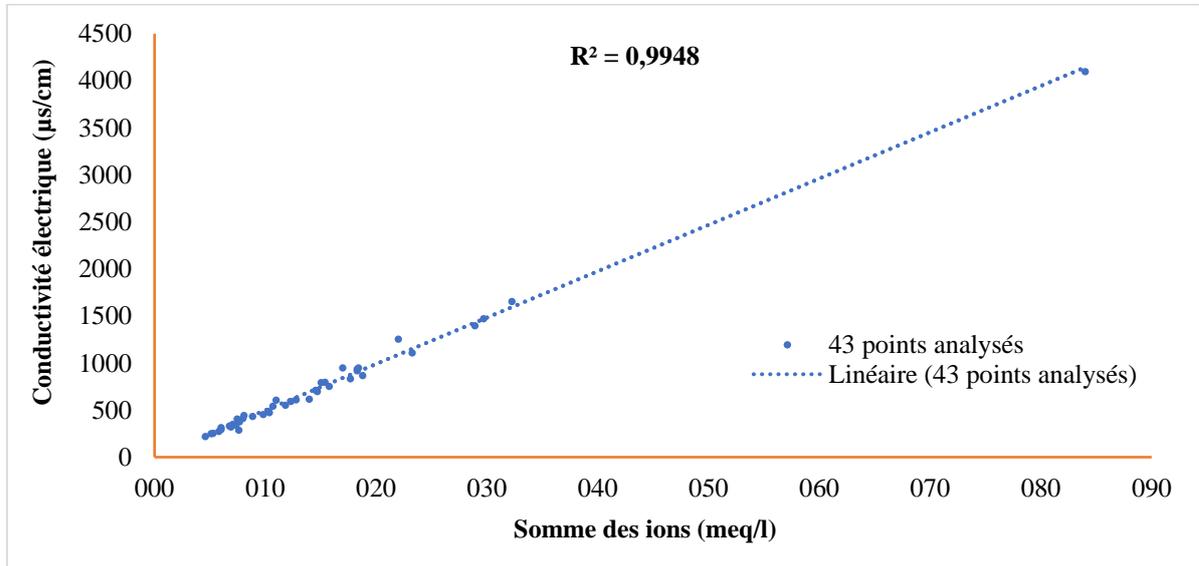


Figure 87. Corrélation entre les valeurs de la conductivité mesurée in situ et la somme des ions analysés en laboratoire.

IV.2.3. Etude des paramètres physico-chimiques :

Le tableau IV.3 présente les paramètres statistiques des données physico-chimiques de la totalité des points d'eau échantillonnés au niveau des quatre sites d'étude. Il s'agit des valeurs extrêmes, de la moyenne, de l'écart type et du coefficient de variation (Cv).

Tableau. IV.3 : Valeurs statistiques des paramètres physicochimiques analysés.

Paramètre	pH	T	CE	SI	Tac	THT
Minimum	5,8	23,1	222	164,9	6,3	10
Moyenne	6,9	25,7	637,3	448,8	15,5	19,8
Maximum	8,17	27,6	1657	1034	38,8	56
Ecart type	0,39	0,96	355,9	226,2	7,32	9,3
Cv	0,06	0,04	0,56	0,50	0,47	0,47

IV.2.3.1. Température :

La température joue un rôle très important dans l'augmentation de l'"activité" chimique d'une eau. Quant à l'évaporation, elle dépend de la température de l'air, de l'humidité relative de l'air, de la profondeur sous le sol, des conditions d'écoulement et de la structure des aquifères. Les anomalies de température des eaux sont contrôlées par les structures géologiques qui conditionnent la géométrie des aquifères et le type de la circulation souterraine des eaux (Faillat & Puradimaja, 1995).

Les températures mesurées in situ sur les eaux souterraines de nos quatre aquifères alluviaux sont assez homogènes et varient entre 23,1°C et 27,6°C. Ces valeurs reflètent globalement celles des températures atmosphériques moyennes mensuelles observées dans notre région d'étude (27,5 en mai & 29,7 en juin).

IV.2.3.2. La conductivité électrique :

La conductivité électrique est un paramètre important en hydrogéologie, sa variation est liée, à température constante, aux modifications de la minéralisation des eaux souterraines.

Concernant nos échantillons analysés, les eaux du puits P113 présentent une valeur extrême de 4100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La conductivité électrique présente une variation spatiale très importante, elle est dispersée, comme l'indique le Cv (0.56 Tableau IV.3). Ses valeurs sont comprises entre 222 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1657 $\mu\text{S}/\text{cm}$, rencontrées respectivement dans les puits P204 et P108, pour une moyenne globale de 637 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La figure n° 88 indique que les échantillons faiblement minéralisés ($\text{CE} < 500 \mu\text{S}/\text{cm}$) constituent 59,8% de l'ensemble. Les eaux ayant une conductivité comprise entre 500 et 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ représentent 40,5 %. Seulement 11,9% des échantillons présentent une minéralisation excessive ($\text{CE} > 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$).

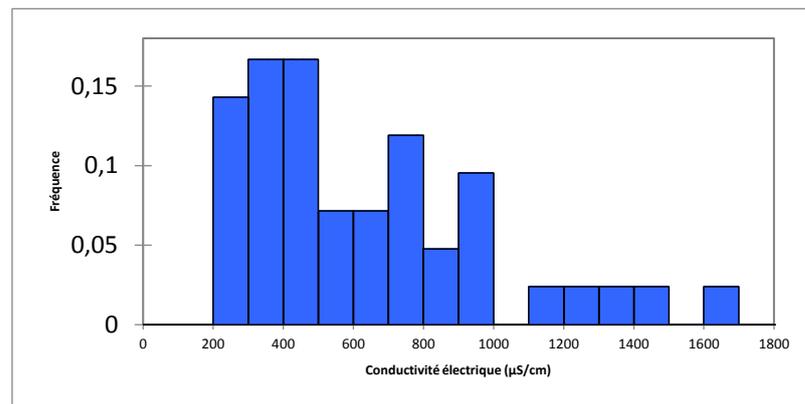


Figure 88. Histogramme de la conductivité électrique (CE) des eaux.

IV.2.3.3. pH :

En dehors des eaux du puits P101 présentant un pH de 8,17, les valeurs de ce paramètre au niveau des autres échantillons d'eau sont assez homogènes (tableau IV.3). La majorité des eaux des puits (85,7 %) présente un pH proche de la neutralité, entre 6,5 et 7,5. L'eau du puits P409 indique un maximum de pH à 6,96. Le pH le plus acide (5,77) correspond à l'eau du forage F12, captant plus profondément le socle cristallophyllien.

IV.2.4. Eléments chimiques :

Les résultats statistiques des éléments chimiques des 42 échantillons sont présentés dans le tableau IV.4. Nous avons exclu de ce traitement le puits P113 qui présente des valeurs anormalement élevées (ex. minéralisation égale à 2591 mg/l) par rapport aux autres points d'eau.

Tableau. IV.4 : Résultats statistiques des ions des eaux échantillonnées (mg/l).

Ions	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	SiO2
Minimum	16,2	2,5	5	0,6	3	0,54	76,3	0	6,57
Moyenne	39,5	24,8	53,3	1,6	63,8	59,9	188,8	16,9	11,45
Maximum	92	82,5	220	3,1	300	300	472,8	64,1	18,05
Ecart type	14,12	17,23	45,58	0,69	61,36	72,06	89,14	12,77	3,36
Cv	0,36	0,69	0,86	0,43	0,96	1,20	0,47	0,75	0,29

IV.2.4.1. Les teneurs en bicarbonates :

Les bicarbonates sont les plus abondants des anions, ils représentent 48.11 % de la quantité totale des anions dosés avec une distribution assez homogène (Cv égale 0,47). Leurs teneurs varient entre 76,3 mg/l et 472,8 mg/l avec une moyenne de 188,8 mg/l. La valeur la plus élevée est localisée au niveau du secteur BIF1 (F12), alors que la valeur la plus basse est observée au P306 (secteur BIF3).

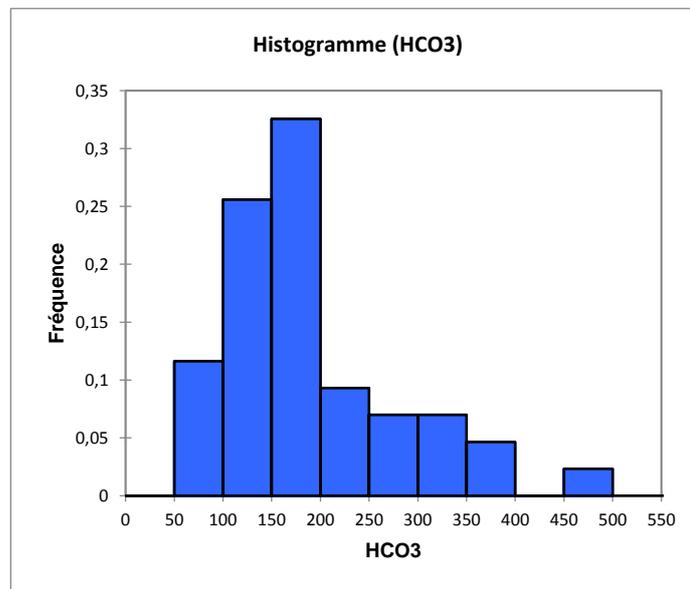


Figure 89. Histogramme des teneurs en bicarbonates.

IV.2.4.2. Les teneurs en chlorures :

Les chlorures représentent 28 % de la quantité totale des anions dosés. La distribution de ces teneurs n'est pas homogène et varie de 3 à 300 mg/l, avec une moyenne de 63,8 mg/l. Les fortes valeurs sont mesurées dans la partie en aval du barrage d'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset.

IV.2.4.3. Les teneurs en sulfates :

Les sulfates représentent 19,4 % des teneurs des anions dosés. Ils varient dans une large gamme de valeurs, comprise entre 0,54 mg/l et 300 mg/l, avec une moyenne de 59,9 mg/l. Les teneurs les plus fortes sont à nouveau observées dans la partie en aval du barrage d'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset.

IV.2.4.4. Les teneurs en nitrates :

Les nitrates ne représentent que 4,24 % des anions des eaux analysées. La distribution spatiale des teneurs n'est pas homogène, avec une valeur minimale de 0 mg/l observée au niveau du P404. Les valeurs les plus élevées 42,37 mg/l, 50,82 mg/l, 64,08 mg/l, sont mesurées respectivement au niveau des puits P308, P305 et P111. La valeur moyenne pour l'ensemble des échantillons est de 16,82 mg/l.

IV.2.4.5. Les teneurs en calcium :

Le calcium représente 31% de l'ensemble des cations des échantillons analysés. Cet élément est caractérisé par une distribution homogène comme le montre le Coefficient de variation. Les concentrations varient entre 16,16 mg/l et 92 mg/l pour une concentration moyenne de 39,6 mg/l. La plus faible teneur se localise au P307. La plus forte teneur est mesurée au P111.

IV.2.4.6. Les teneurs en magnésium :

Le magnésium présente une variabilité importante de ses valeurs ($C_v = 0,7$). Les concentrations varient de 2,5 mg/l au P103 à 82,5 mg/l au P111 avec une moyenne de 24,8mg/l.

IV.2.4.7. Les teneurs en sodium :

Les teneurs en sodium présentent une distribution non homogène. Ils varient dans une large gamme, entre 5 mg/l et 225 mg/l avec une teneur moyenne relativement faible de 53,3 mg/l.

IV.2.4.8. Les teneurs en potassium :

Les teneurs en potassium présentent des valeurs faibles. Les valeurs moyennes oscillent autour de 1,62 mg/l. Le maximum et le minimum sont respectivement de 3,1 mg/l (F12) et 0,6 mg/l (au P207). La distribution du potassium est assez régulière.

IV.3. Caractérisation hydrochimique par secteur étudié :

Afin de détailler les caractéristiques hydrochimiques de l'ensemble des eaux des quatre nappes d'inféro-flux de notre région d'étude, nous étudions dans ce qui suit les variations spatiales du chimisme des eaux pour chaque nappe d'inféro-flux, en prenant en considération l'existence des barrages d'inféro-flux.

IV.3.1. Nappe d'inféro-flux du secteur de l'Oued Tamanrasset autour de BIF1.

IV.3.1.1. Paramètres physico-chimiques :

L'analyse des paramètres physicochimique de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset permet de la caractériser par :

- des températures de l'eau variant entre 25°C et 27,6°C,
- un pH compris entre 5,77 et 8,17. Ces deux valeurs extrêmes sont mesurées dans la partie amont de la nappe, respectivement au forage F12 et puits P105. Les eaux de la partie aval de la nappe reflètent d'un pH moyen autour de 6,8,
- des valeurs de conductivité montrant des contrastes significatifs entre l'amont et l'aval du barrage d'inféro-flux. Elles varient entre 275 $\mu\text{S/cm}$ (P105) et 936 $\mu\text{S/cm}$ (F12), en amont, et entre 543 $\mu\text{S/cm}$ (P110) et 1576 $\mu\text{S/cm}$ (P108), en aval. (Fig. 90)

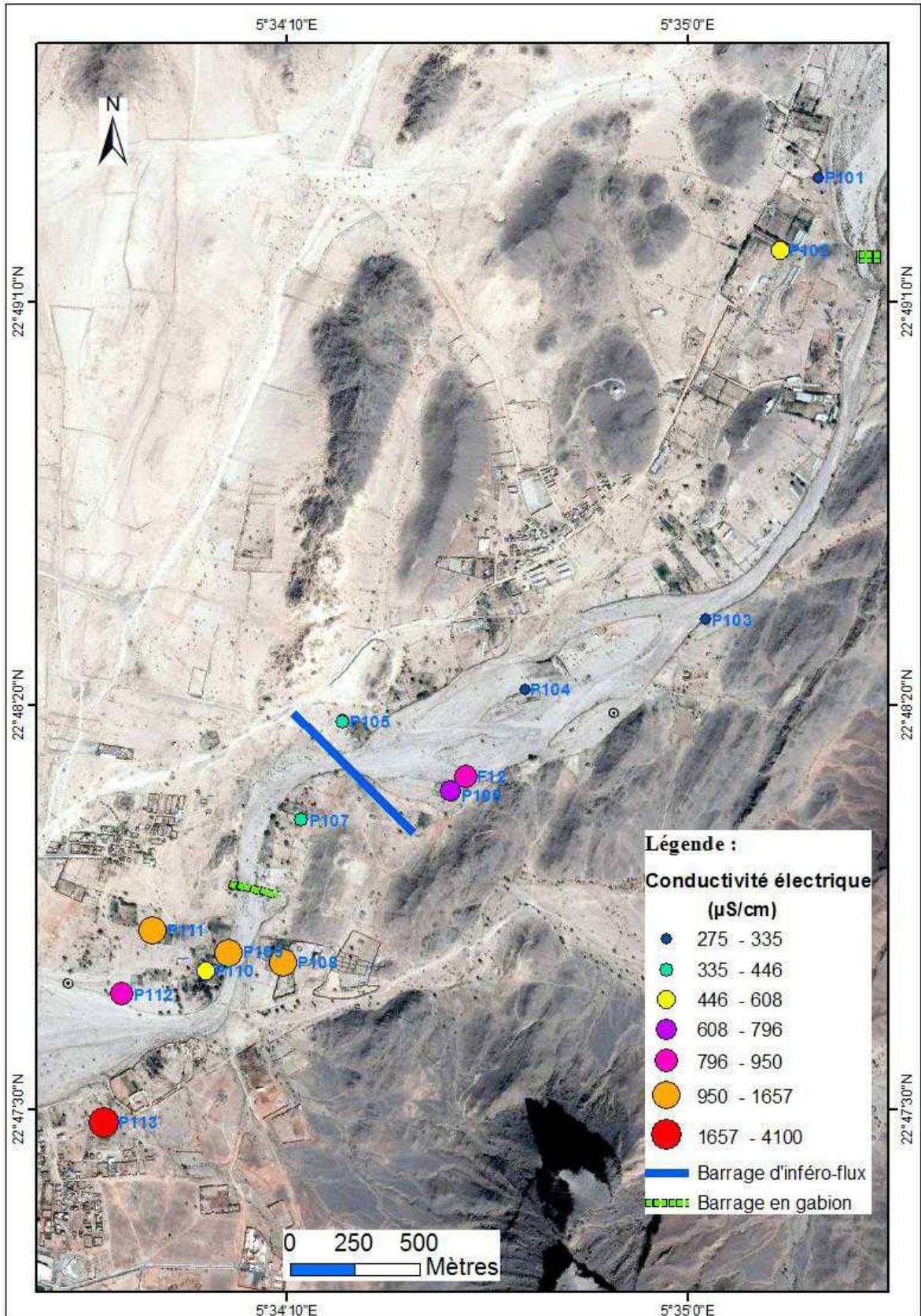


Figure 90. Répartition spatiale de la conductivité des eaux de la nappe de l'Oued Tamarrasset autour du site de BIF1 (14-15 mai 2016).

IV.3.1.2. Ions majeurs :

La carte de la répartition spatiale des teneurs des éléments chimiques montre que ces dernières présentent des contrastes entre l'amont et l'aval du barrage d'inféro-flux.

La figure n° 91 montre que :

- la concentration en bicarbonates varie entre 91,5 mg/l (P109) et 472,75 mg/l (F12). Elle domine largement tous les anions des eaux situées à l'amont du barrage, ainsi que les eaux de P107 et P109 des puits de l'aval. En ce qui concerne les sulfates et les chlorures, les valeurs minimales et maximales sont respectivement de 0,54 mg/l à 300 mg/l pour les sulfates et de 15 mg/l à 300 mg/l pour les chlorures. Les faibles concentrations de ces deux éléments (< 45mg/l) sont également rencontrées en amont ainsi que dans les puits P107 et P109, en aval. Les concentrations en nitrates varient entre 9,21 mg/l et 64,08 mg/l avec une moyenne de 24,14 mg/l. Ces nitrates montrent une variation non homogène (Cv) pour l'ensemble de la nappe dénotant une origine essentiellement anthropique,
- les concentrations en calcium sont comprises entre 20 mg/l (P101) et 92 mg/l (P 111 mg/l) avec une moyenne de 43,4 mg/l. Elles atteignent les valeurs élevées de 92 mg/l, 60 mg/l, 56 mg/l dans respectivement les puits P111, P109 et P108 qui se situent tous en aval du barrage. Par contre, les faibles concentrations en calcium ayant des valeurs sous ou proches de la moyenne sont rencontrées dans les puits du reste de la nappe,
- le magnésium présente des teneurs variant entre 2,5 mg/l et 82,5 mg/l avec une moyenne de 31,15 mg/l. Les teneurs élevées sont généralement observées dans les puits échantillonnés sur les deux rives de l'oued. Les puits localisés dans le lit actif de l'oued présentent les plus faibles teneurs,
- les concentrations en sodium sont comprises entre 19,6 mg/l et 220 mg/l. Les faibles concentrations sont rencontrées en amont du barrage et les fortes concentrations se retrouvent en aval avec une valeur maximale de 220 mg/l au puits P108,
- A l'exception du forage F12 qui se caractérise par une valeur relativement élevée (3,1 mg/l), les concentrations du potassium sont faibles dans la nappe d'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset.

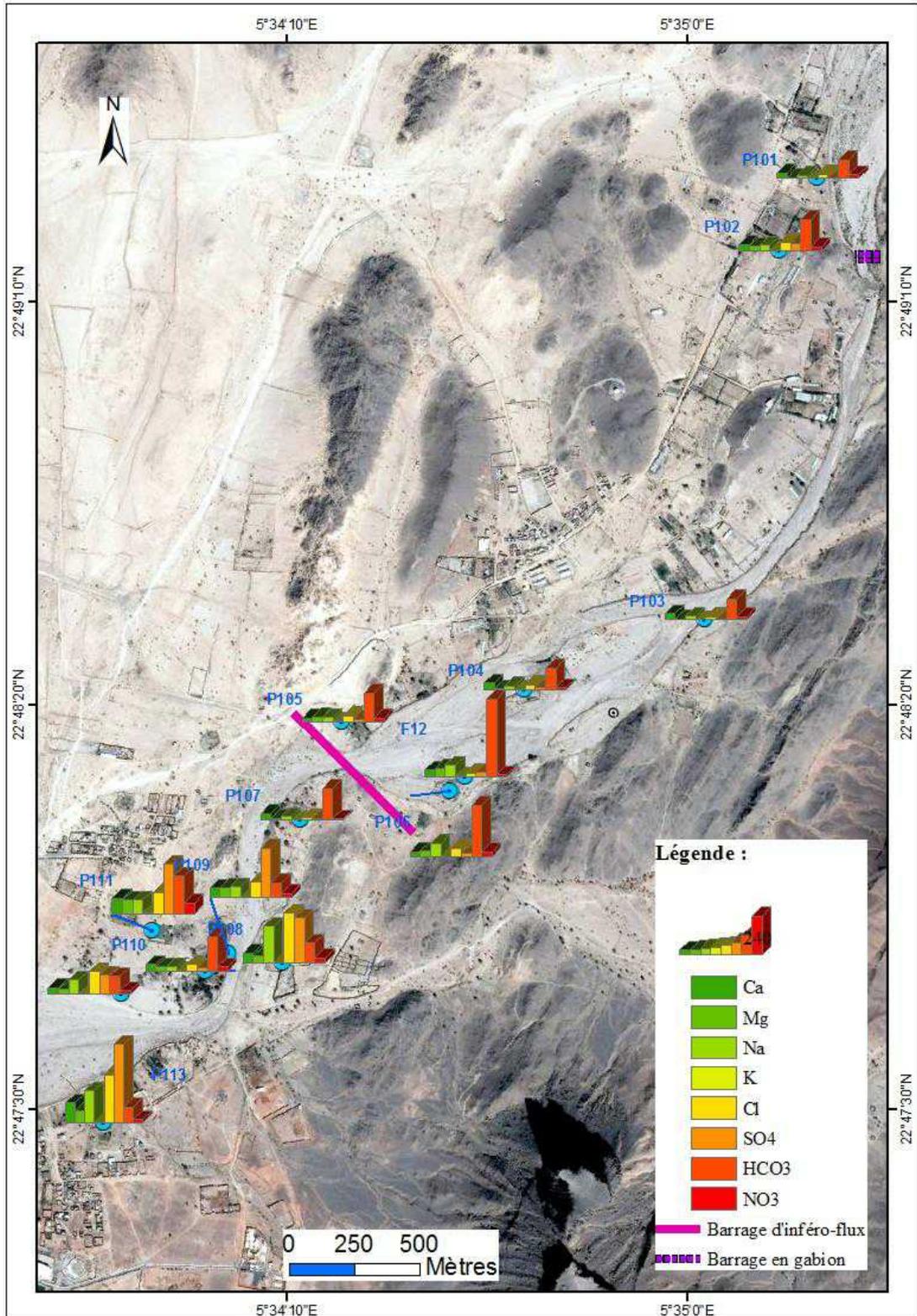


Figure 91. Répartition spatiale des teneurs en éléments majeurs des eaux de la nappe de l'Oued Tamanrasset autour du site BIF1 (14-15 mai 2016).

IV.3.1.3. Faciès hydrochimique :

Les formules caractéristiques des différents échantillons d'eau permettent de définir dans le secteur, les faciès et sous-faciès hydrochimiques suivants (tableau IV.5) :

Tableau. IV.5 : *Faciès hydrochimique et formules caractéristiques des eaux (site BIF1).*

Faciès	Sous faciès	Echantillons
Bicarbonaté calcique	$Ca^{++} > Na^{+} > Mg^{++} > K^{+}$ $HCO_3^{-} > Cl^{-} > SO_4^{-} > NO_3^{-}$	P102 – P107
	$Ca^{++} > Na^{+} > Mg^{++} > K^{+}$ $HCO_3^{-} > Cl^{-} > NO_3^{-} > SO_4^{-}$	P103 – P105
Bicarbonaté magnésien	$Mg^{++} > Ca^{++} > Na^{+} > K^{+}$ $HCO_3^{-} > Cl^{-} > SO_4^{-} > NO_3^{-}$	P109 – P104
	$Mg^{++} > Na^{+} > Ca^{++} > K^{+}$ $HCO_3^{-} > Cl^{-} > SO_4^{-} > NO_3^{-}$	F12
	$Mg^{++} > Na^{+} > Ca^{++} > K^{+}$ $HCO_3^{-} > Cl^{-} > NO_3^{-} > SO_4^{-}$	P101
Bicarbonaté sodique	$Na^{+} > Mg^{++} > Ca^{++} > K^{+}$ $HCO_3^{-} > Cl^{-} > NO_3^{-} > SO_4^{-}$	P106
Chloruré sodique	$Na^{+} > Mg^{++} > Ca^{++} > K^{+}$ $Cl^{-} > SO_4^{-} > HCO_3^{-} > NO_3^{-}$	P112 – P108
Sulfaté magnésien	$Mg^{++} > Ca^{++} > Na^{+} > K^{+}$ $SO_4^{-} > Cl^{-} > HCO_3^{-} > NO_3^{-}$	P111 – P110
Sulfaté sodique	$Na^{+} > Ca^{++} > Mg^{++} > K^{+}$ $SO_4^{-} > Cl^{-} > HCO_3^{-} > NO_3^{-}$	P113

Les eaux analysées présentent une diversité importante des faciès hydrochimiques avec prédominance du faciès bicarbonaté calcique et du faciès bicarbonaté magnésien (huit échantillons). Le faciès bicarbonaté calcique correspond aux eaux les moins minéralisées (entre 175 et 305 mg/l), suivi du faciès bicarbonaté magnésien (<394 mg/l). Toutes les eaux situées en amont de BIF1 se présentent sous ces deux faciès, à l'exception des eaux du puits P106 qui présentent un faciès bicarbonaté sodique. Le faciès sulfaté sodique est représentatif de l'échantillon d'eau (P113) le plus minéralisé (2591 mg/l). Les autres faciès de transition correspondent à des eaux de minéralisation intermédiaire.

IV.3.1.4. Eléments indicateurs de la pollution organique :

Les teneurs des quatre éléments d'indicateurs de la pollution analysés : NH₄, NO₂, PO₄ et MO indiquent une distribution spatiale variable (Fig. 92) avec des valeurs inférieures aux normes de l'O.M.S.

Les eaux de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset présentent des teneurs en matière organique prédominantes par rapport aux autres éléments de pollution, à l'exception des trois points P101, P110 et P112 où ce sont les teneurs en phosphates qui prédominent. Les teneurs en matière organique varient entre 0 et 7,7 mg/l. La plus forte valeur est observée au P108. Elle est supérieure aux normes de l'O.M.S (5 mg/l).

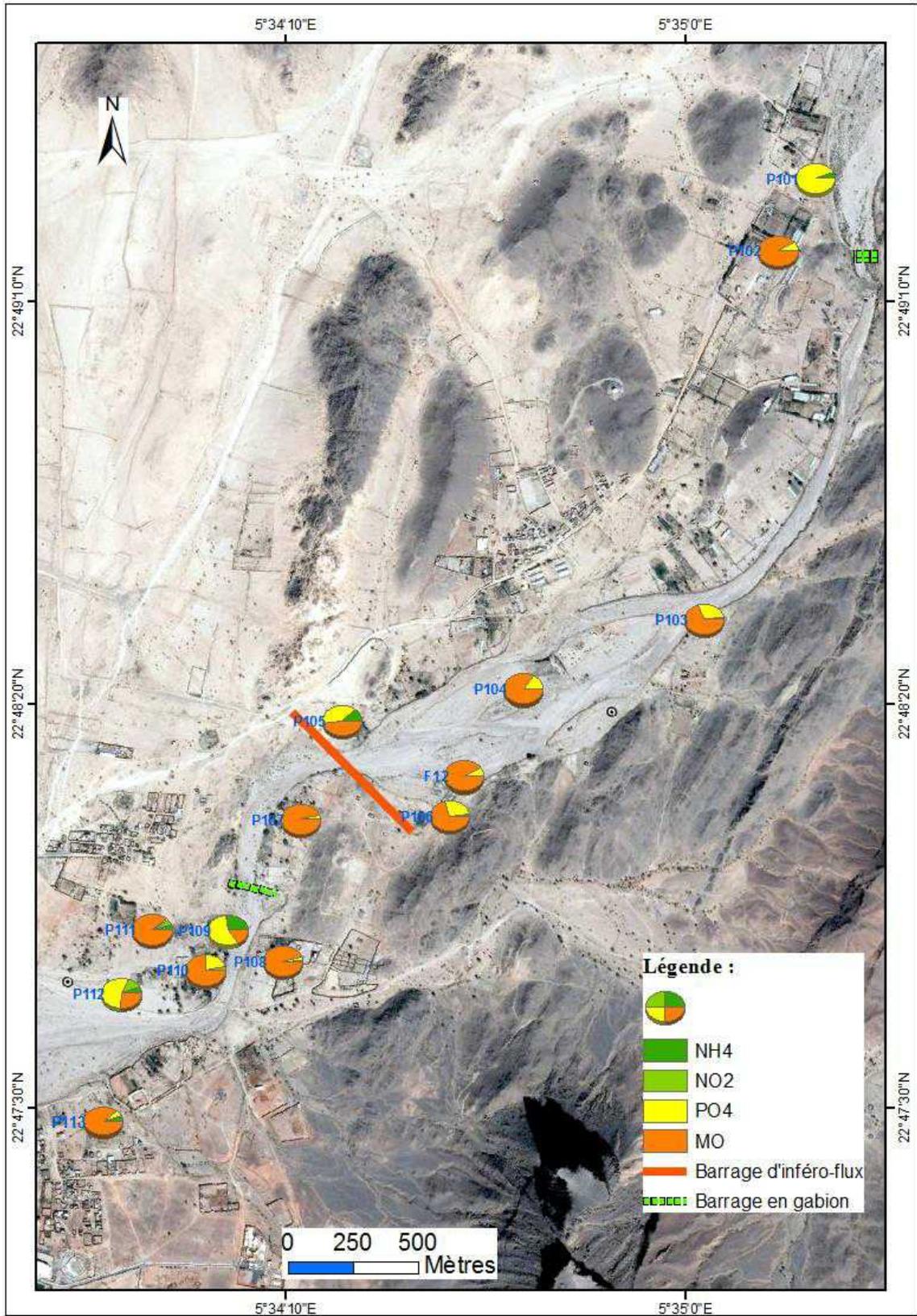


Figure 92. Carte de la répartition des teneurs des éléments indicateurs de la pollution organique des eaux de la nappe de l'Oued Tamanrasset autour du site du BIF1 (14-15 mai 2016).

Les teneurs en phosphates s'échelonnent entre 0,04 mg/l (P111) et 0,28 (P101 et P106).

Les teneurs en ammonium varient entre 0 et 0,16 mg/l pour la majorité des eaux. Une valeur remarquable en cet élément est observée en aval du barrage.

Les teneurs des nitrites sont également rencontrées uniquement en aval du BIF1 et dans deux puits localisés sur la rive droite de l'oued (P111 et P112).

IV.3.2. Nappe d'inféro-flux du secteur de l'Oued Outoul autour du site BIF2 :

IV.3.2.1. Paramètres physicochimiques :

Dans ce secteur :

- Les températures de l'eau varient entre 24,8°C et 27,3°C.
- Le pH est proche de la neutralité, varié entre 6,6 et 7,1.
- Les valeurs de la conductivité électrique sont comprises entre 222 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1399 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux de faible minéralisation se trouvent en amont du barrage d'inféro-flux et dans le puits P206 en son aval. Elles présentent une conductivité inférieure à 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En aval, à l'exception du P207, les eaux présentent une conductivité comprise entre 500 et 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 93).

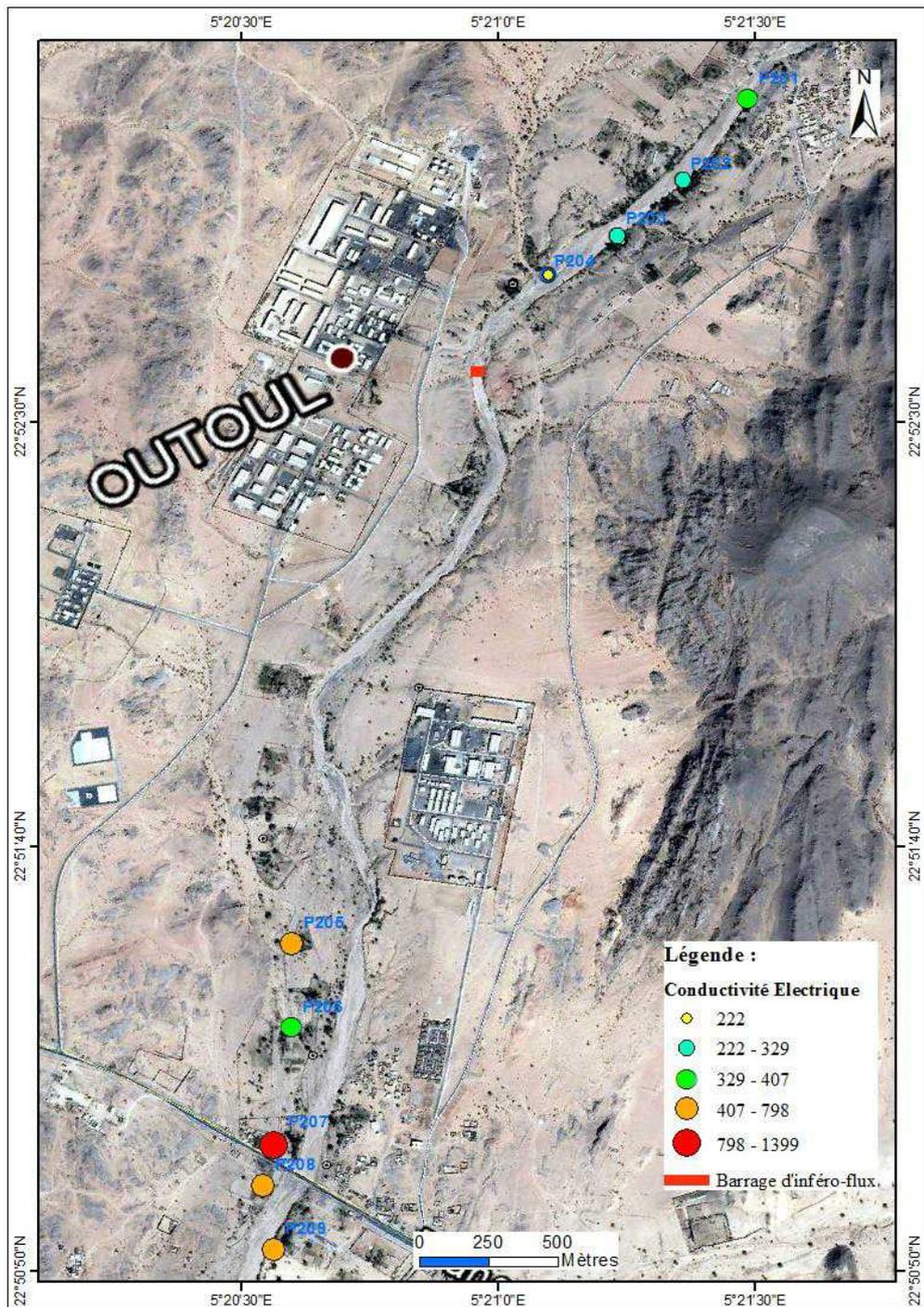
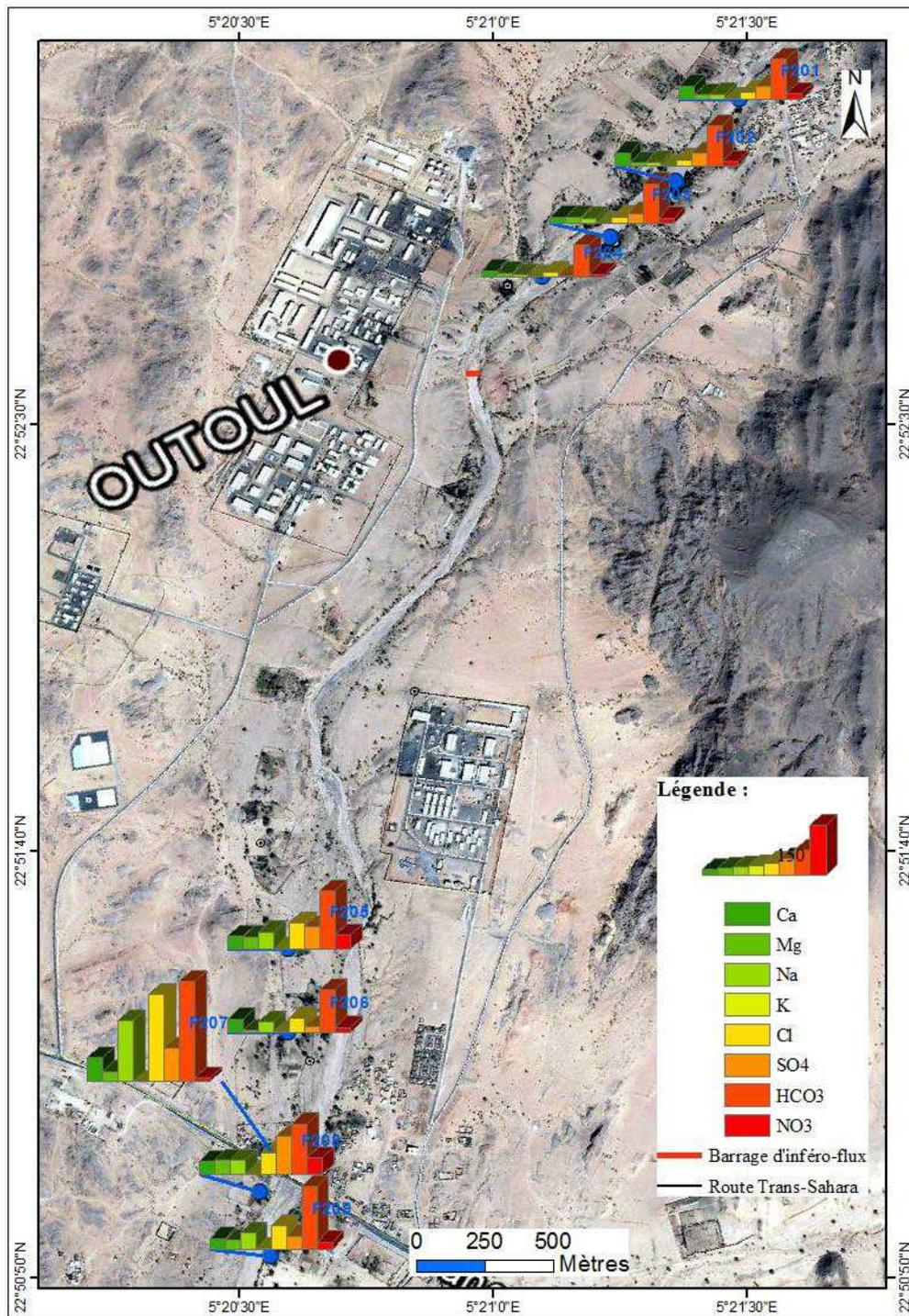


Figure 93. Répartition spatiale de la conductivité des eaux de la nappe de l'Oued Outoul autour du site du BIF2 (12-13 mai 2016).

IV.3.2.2. Ions majeurs :

La comparaison des analyses chimiques des eaux de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul entre l'amont et l'aval du barrage montre que les teneurs des ions majeurs présentent un contraste entre l'amont et l'aval. Les valeurs minimales sont rencontrées dans les puits en amont du barrage d'inféro-flux et dans le puits P206 en aval, les valeurs maximales caractérisant les autres échantillons (Fig. 94).



Figure

94. Répartition spatiale des teneurs en éléments majeurs des eaux de la nappe de l'Oued Outoul autour du site du BIF2 (12-13 mai 2016).

En ce qui concerne les puits localisés en amont du BIF2, les teneurs des cations ne dépassent guère 40 mg/l pour Ca, 20 mg/l pour Mg, 15,9 mg/l pour Na et 1,8 pour K. Les teneurs en anions, HCO₃, SO₄, Cl, NO₃ sont respectivement inférieures à 122 mg/l, 40mg/l, 22 mg/l, 16,69 mg/l.

Dans les puits situés en aval du BIF2, les teneurs minimales en cations : Ca, Mg, Na, K sont de respectivement 32 mg/l (P209), 5 mg/l (P206), 29,6 mg/l (P206) et 0,6 mg/l (P208), alors que les teneurs maximales sont de respectivement 72 mg/l, 45 mg/l, 184 mg/l et 2 mg/l.

IV.3.2.3. Faciès hydrochimique :

Les formules caractéristiques des différents échantillons d'eau permettent de définir dans le secteur, trois faciès hydrochimiques (tableau IV.6) :

Tableau. IV.6 : *Faciès hydrochimique et formules caractéristiques des eaux de la nappe de l'Oued Outoul autour du site BIF2.*

Faciès	Sous faciès	Echantillons
Bicarbonaté calcique	$Ca^{++} > Mg^{++} > Na^+ > K^+$ $HCO_3^- > SO_4^{--} > Cl^- > NO_3^-$	P201 – P202
	$Ca^{++} > Na^+ > Mg^{++} > K^+$ $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{--} > NO_3^-$	P206
Bicarbonaté magnésien	$Mg^{++} > Ca^{++} > Na^+ > K^+$ $HCO_3^- > SO_4^{--} > Cl^- > NO_3^-$	P203 – P208
	$Mg^{++} > Ca^{++} > Na^+ > K^+$ $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{--} > NO_3^-$	P204 – P205
	$Mg^{++} > Na^+ > Ca^{++} > K^+$ $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{--} > NO_3^-$	P209
Chloruré sodique	$Na^+ > Ca^{++} > Mg^{++} > K^+$ $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{--} > NO_3^-$	P207

A l'exception de l'échantillon P207 qui se caractérise par un faciès chloruré sodique, les autres échantillons prélevés se caractérisent par un faciès bicarbonaté calcique ou magnésien.

IV.3.2.4. Eléments indicateurs de la pollution organique :

L'allure de la figure n° 95 nous permet de constater que les concentrations en matière organique et en phosphate sont abondantes par rapport aux deux autres éléments indicateurs de pollution. Ses concentrations variées respectivement entre 0,1 mg/l et 9 mg/l pour MO, et entre 0,1 mg/l et 0,3 mg/l pour PO4.

Les concentrations en ammonium oscillent entre 0 et 0,09 mg/l où les concentrations relativement élevées sont trouvées en amont du BIF, 0,08 et 0,09 respectivement au P204 et P202. Les nitrates sont absents dans l'ensemble des eaux échantillonnées.

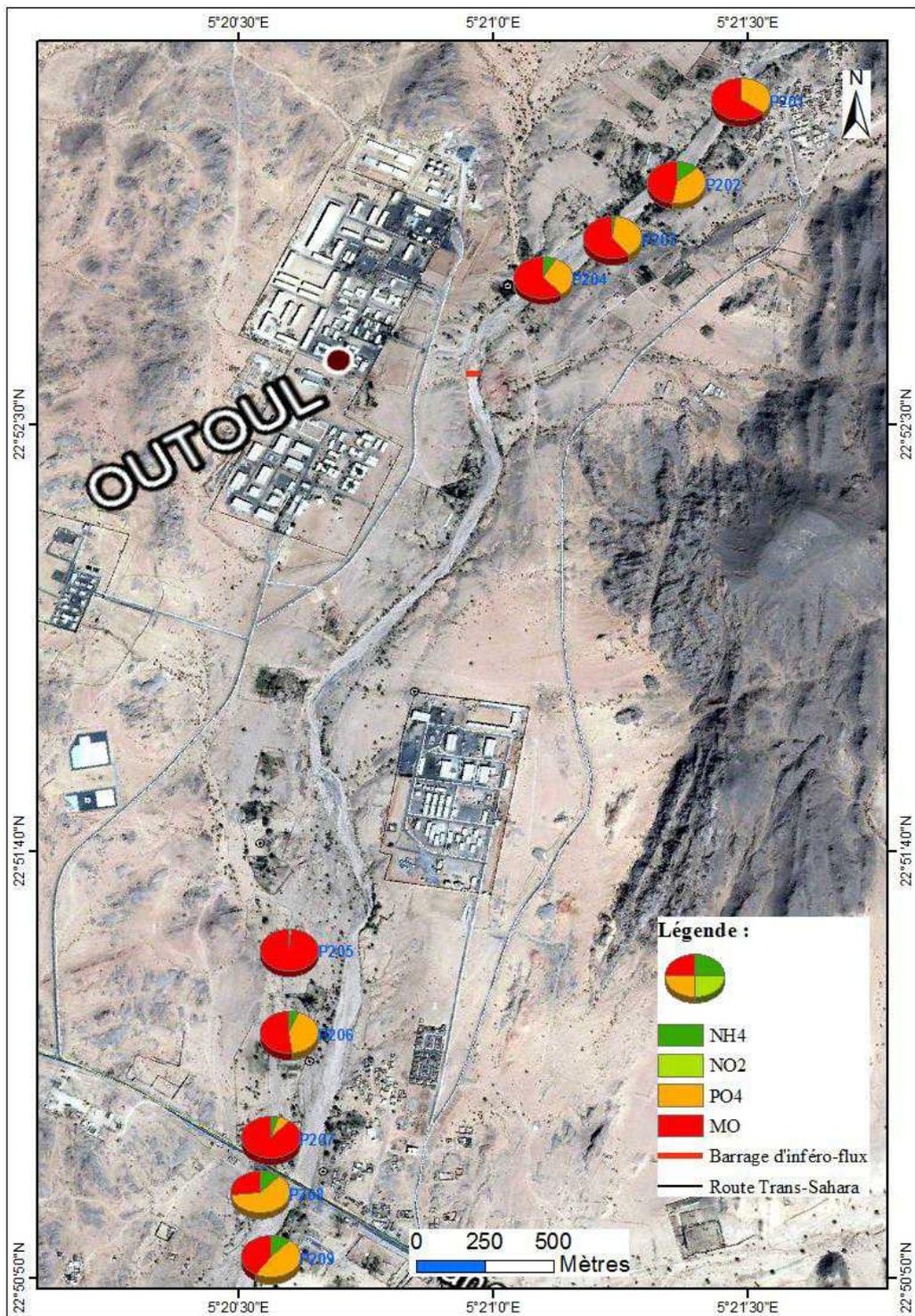


Figure 95. Carte de la répartition des teneurs des éléments indicateurs de la pollution organique des eaux de la nappe de l'Oued Outoul autour du site du BIF2 (12-13 mai, 2016).

Les teneurs des quatre éléments indicateurs de la pollution organique sont inférieures aux normes de l'O.M.S à l'exception du P205 (9 mg/l) qui est caractérisé par une teneur en matière organique dépassant largement les normes de potabilité de l'O.M.S.

IV.3.3. Nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul autour du site du BIF3 :

IV.3.3.1. Paramètres physicochimiques :

- Les températures de l'eau de la nappe sont comprises entre 23,1°C et 25,6°C.
- Le pH varie entre 6,48 et 7,66.
- Les conductivités mesurées sont généralement faibles, variant entre 253 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 490 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 337,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs dénotent d'une minéralisation faible (Fig. 96). La plus forte conductivité électrique a été mesurée au puits P301 situé en aval du barrage d'inféro-flux (plan d'eau libre).

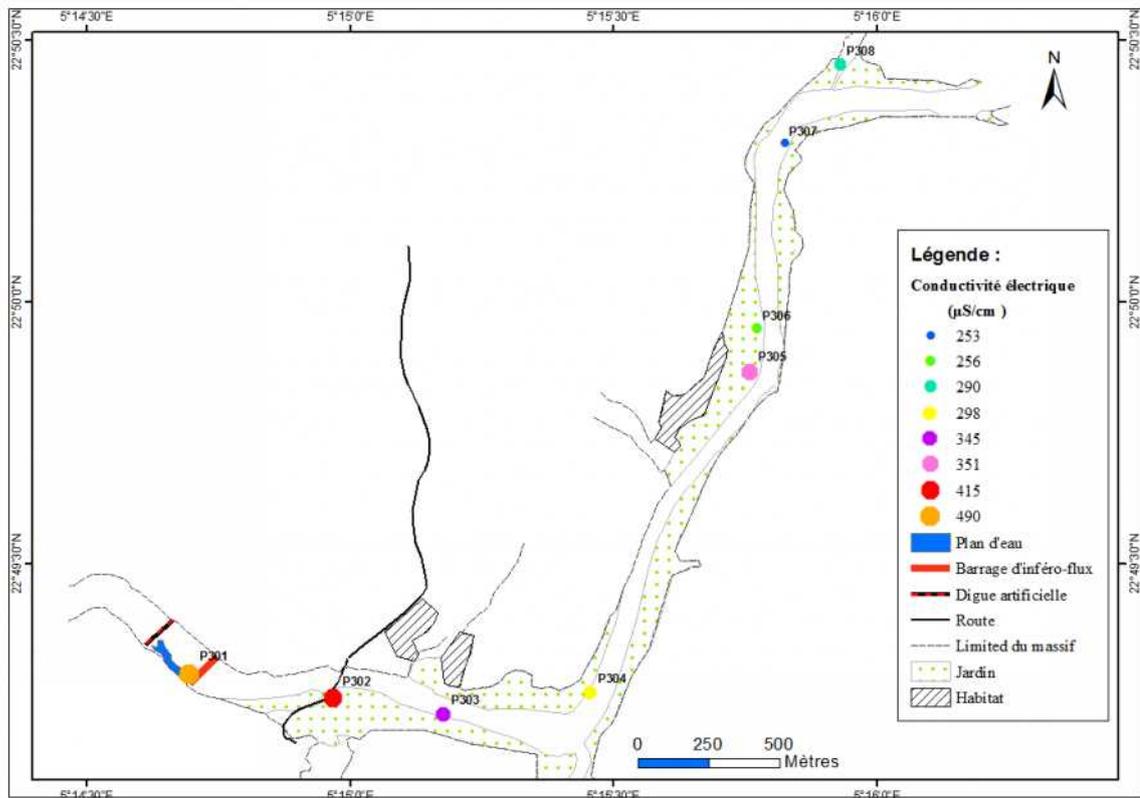


Figure 96. Répartition spatiale de la conductivité des eaux de la nappe de l'Oued Outoul autour du site du BIF3 (12 mai 2016).

IV.3.3.2. Ions majeurs :

L'allure de la carte de la répartition des teneurs des éléments majeurs montre que la nappe de l'Oued Outoul au niveau de la localité d'Ihelfene se caractérise par de très faibles concentrations (Fig. 97).

Le bicarbonate est l'anion dominant pour l'ensemble des eaux, il varie entre 164 mg/l (P305) et 76,25 mg/l (P305). Les bicarbonates augmentent de l'amont à l'aval de l'oued à partir de P305. Les teneurs en sulfates et en chlorure sont variables, les faibles teneurs sont observées respectivement aux P304 (20 mg/l) et P 305 (3 mg/l). Les teneurs fortes atteignent 50 mg/l de sulfates au (P308) et 30 mg/l de chlorures au (P304).

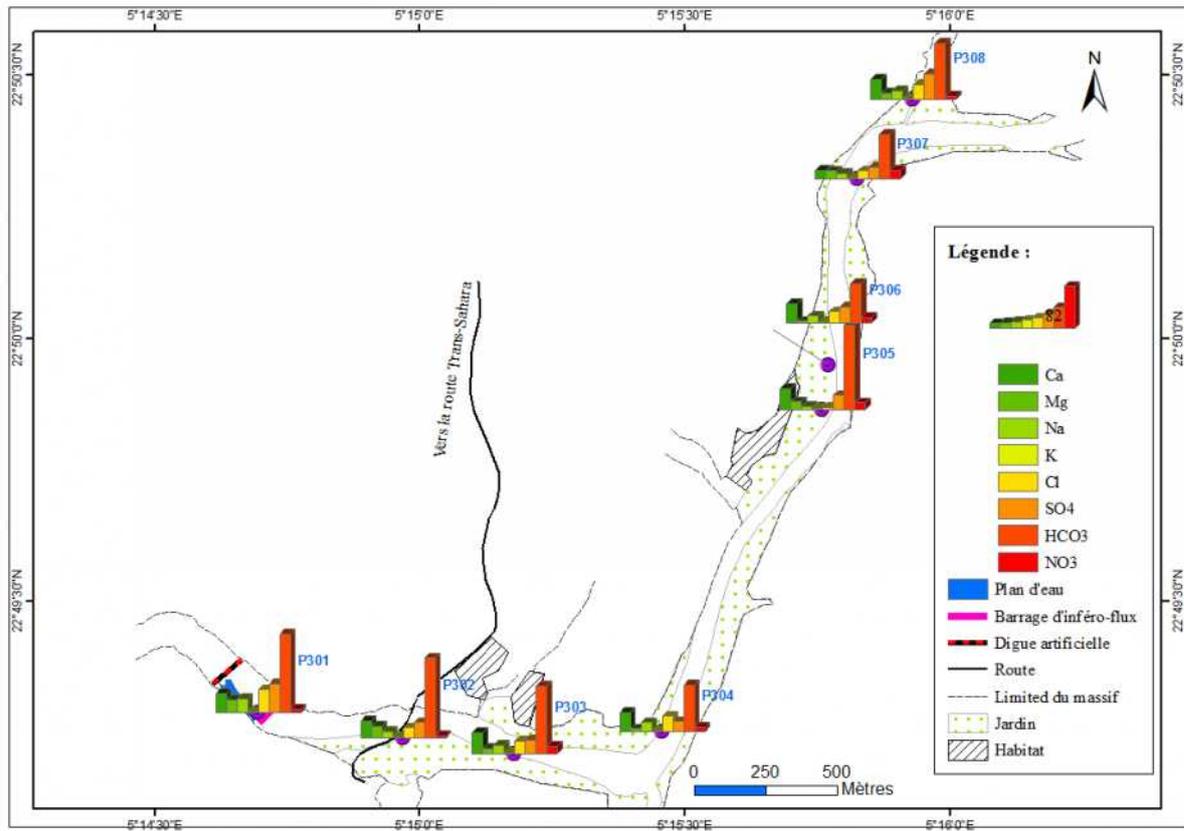


Figure 97. Répartition spatiale des teneurs en éléments majeurs des eaux la nappe de l'Oued Outoul autour du site du BIF3 (12 mai, 2016).

Les nitrates présentent des teneurs généralement faibles comprises entre 4,91 mg/l (P302) et 16 mg/l (P305).

Les cations Ca, Mg, Na et K présentent une distribution homogène. Les concentrations minimales sont rencontrées respectivement dans les puits P307 pour le calcium, P306 pour le magnésium (2,53 mg/l) et P305 pour le sodium (5 mg/l). Les concentrations maximales se présentent aux puits P303 pour le calcium (41 mg/l), P302 pour le magnésium (33 mg/l) et P304 pour le sodium (17,92 mg/l) (Fig. 97).

L'eau du plan d'eau libre se caractérise par un faciès bicarbonaté magnésien où la concentration des anions décroît suivant cet ordre : HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- . La concentration des cations suit l'ordre de décroissance : Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ .

On constate aussi que les concentrations des ions majeurs du plan d'eau libre sont assez élevées par rapport aux eaux de la nappe d'inféro-flux.

IV.3.3.3. Faciès hydrochimique :

Les formules caractéristiques des différents échantillons d'eau dégagent un faciès unique bicarbonaté calcique se décomposant en quatre sous faciès (tableau IV.7) :

Tableau. IV.7 : *Faciès hydrochimique et formules caractéristiques des eaux autour du site BIF3.*

Faciès chimique	Sous faciès	Echantillons
Bicarbonaté calcique	Ca ⁺⁺ > Na ⁺ > Mg ⁺⁺ > K ⁺ HCO ₃ ⁻ > SO ₄ ⁻ > Cl ⁻ > NO ₃	P301- P303- P306- P308
	Ca ⁺⁺ > Na ⁺ > Mg ⁺⁺ > K ⁺ HCO ₃ ⁻ > Cl ⁻ > SO ₄ ⁻ > NO ₃ ⁻	P304
	Ca ⁺⁺ > Mg ⁺⁺ > Na ⁺ > K ⁺ HCO ₃ ⁻ > SO ₄ ⁻ > NO ₃ > Cl ⁻	P305- P307
	Ca ⁺⁺ > Mg ⁺⁺ > Na ⁺ > K ⁺ HCO ₃ ⁻ > SO ₄ ⁻ > Cl ⁻ > NO ₃	P302

IV.3.3.4. Eléments indicateurs de la pollution organique :

L'allure la figure n° 98 permet de constater que la répartition spatiale des teneurs des quatre éléments indicateurs de la pollution est hétérogène.

Les teneurs de la matière organique s'échelonnent entre 0 et 1 mg/l. La valeur nulle est observée au P302 et la valeur maximale est rencontrée au P303.

Les phosphates présentent des concentrations variant entre 0,1 et 0,46 mg/l. Ses teneurs restent inférieurs aux normes de potabilité de l'O.M.S (0,4 mg/l) à l'exception du P307 qui se caractérise par une concentration de 0,46 mg/l.

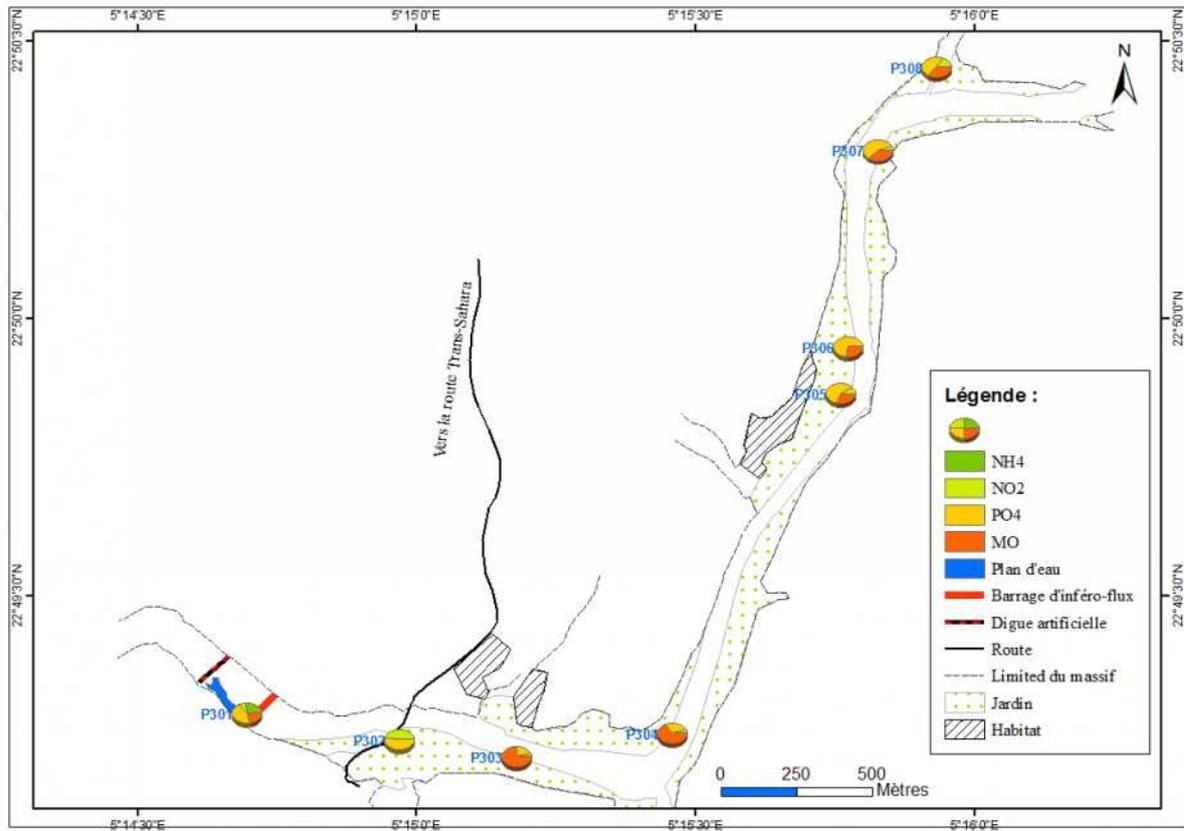


Figure 98. Carte de la répartition des teneurs des éléments indicateurs de la pollution organique des eaux la nappe de l'Oued Outoul autour du site du BIF3 (12 mai, 2016).

L'ammonium est absent dans toutes les eaux de la nappe. En dehors du P306 qui est caractérisé par une valeur nulle en nitrites, ces dernières présentent des concentrations faibles, variant entre 0 et 0,09 mg/l.

IV.3.4. Nappe d'inféro-flux de la nappe de l'Oued In Amguel autour du site du BIF4 :

IV.3.4.1. Paramètres physicochimiques :

- Les températures de l'eau varient entre 24°C et 26,8°C.
- Le pH varie entre 6,62 et 7,24.
- Les valeurs de la conductivité électrique sont comprises entre 457 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1112 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux de faible minéralisation se trouvent en amont du barrage d'inféro-flux et dans le puits P402 en aval. Elles ont une conductivité oscillante entre 457 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 950 $\mu\text{S}/\text{cm}$ alors que les trois autres points d'eau situés en aval ont une conductivité comprise entre 922 et 1112 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 99).

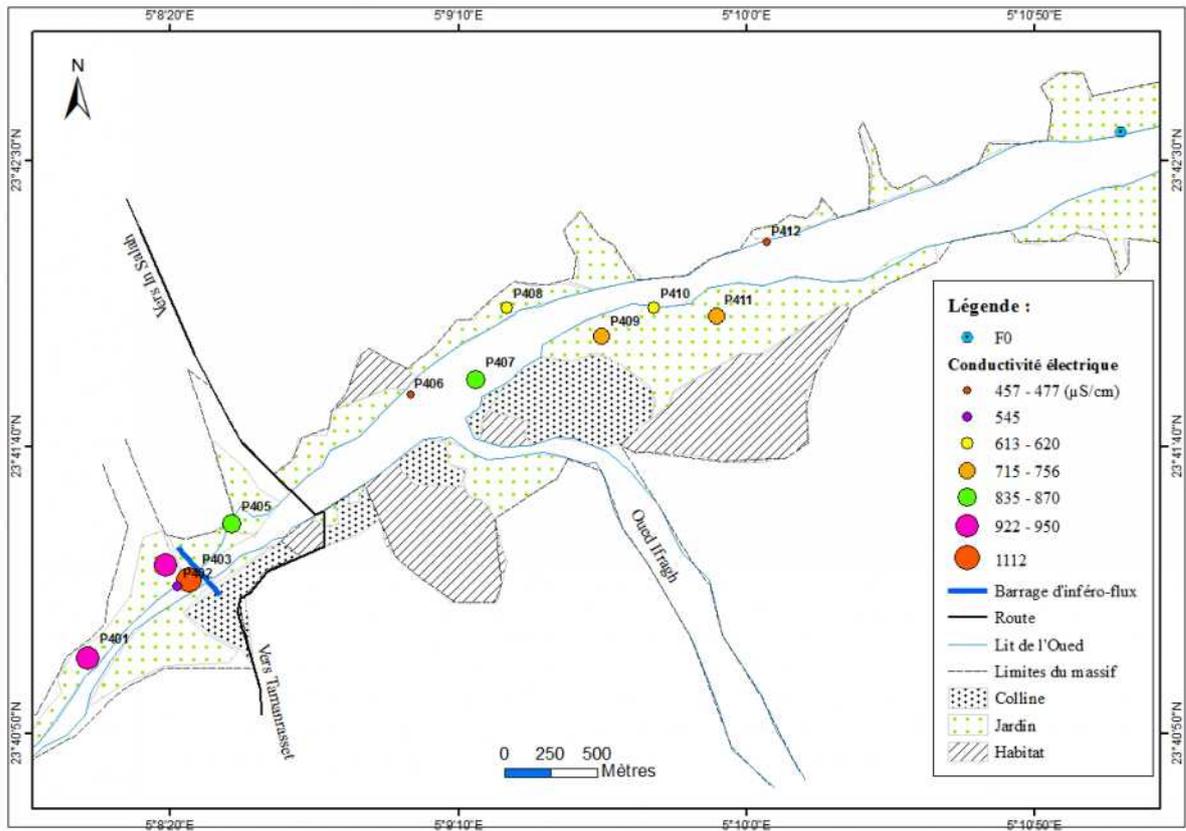


Figure 99. Répartition spatiale de la conductivité des eaux la nappe de l'Oued In Amguel autour du site du BIF4 (04 juin 2016).

IV.3.4.2. Ions majeurs :

La carte de la répartition spatiale des teneurs en éléments chimiques (Fig. 100) montre que :

- Les bicarbonates présentent une variation homogène. Leurs concentrations varient entre 138 mg/l (P402, P412) et 381 mg/l (P405). Les teneurs en sulfates s'échelonnent entre 12 mg/l (P412) et 104 mg/l (P403), ces teneurs ne dépassent pas 62 mg/l en amont du BIF4, alors qu'elles atteignent 140 mg/l en aval. En ce qui concerne les chlorures, leurs concentrations minimales et maximales sont respectivement de 45 mg/l (P412) et 150 mg/l (P403). Pour la majorité des eaux analysées, les teneurs en chlorure ne dépassent pas 96 mg/l, à l'exception de deux points d'eau P409 et P403 qui présentent respectivement les valeurs 120 mg/l et 150mg/l. Les concentrations en nitrates varient entre 0 (P404) et 25 mg/l (P408).

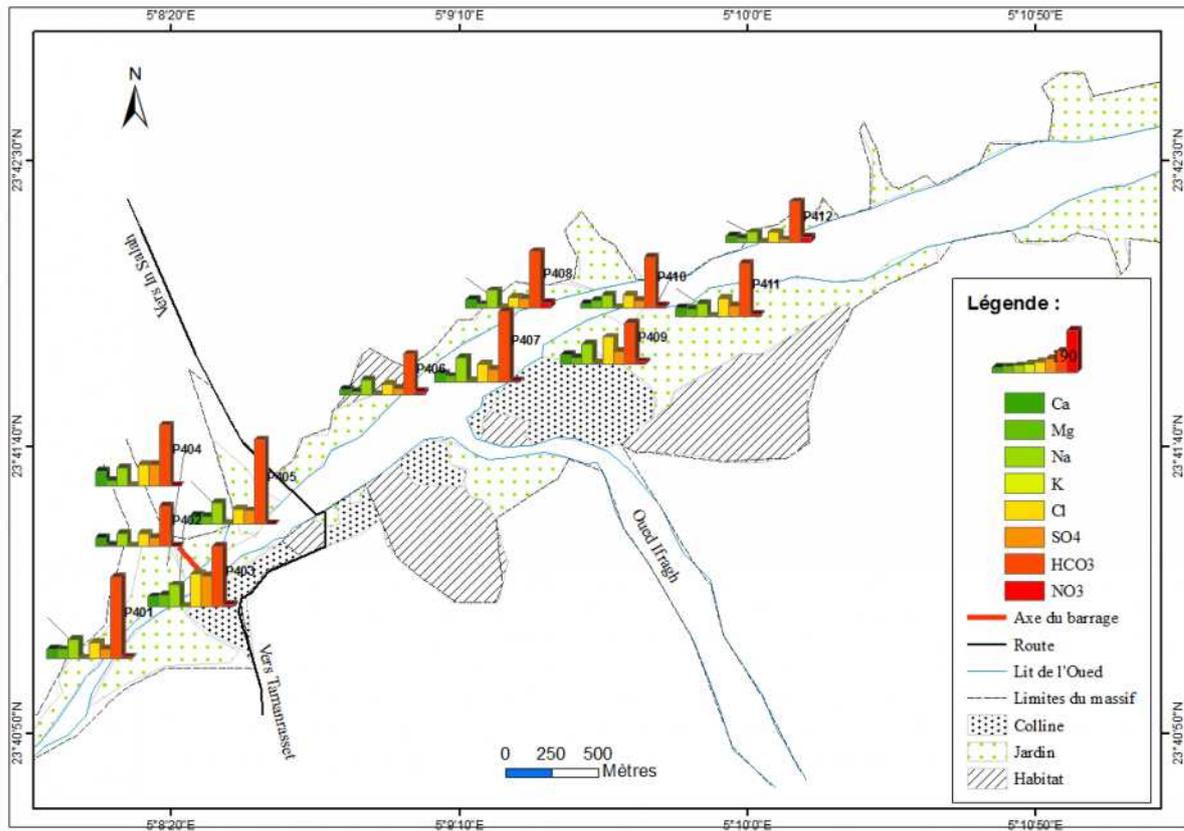


Figure 100. Répartition spatiale des teneurs des éléments majeurs des eaux la nappe de l'Oued In Amguel autour du site du BIF4 (04 juin 2016).

- Les concentrations en calcium sont comprises entre 20 mg/l (P410) et 68 mg/l (P 404 mg/l) avec une moyenne de 39 mg/l. Elles présentent une distribution très homogène ($C_v = 0.3$). Le magnésium présente des teneurs variant entre 5 mg/l (P402) et 55 mg/l (P403). Toutes les eaux qui se trouvent en amont du BIF4 ont des teneurs en magnésium inférieures à 35 mg/l. Les concentrations en sodium sont comprises entre 45 mg/l (P412) et 110 mg/l (P407). Elles présentent une distribution homogène ($C_v = 0,26$). Le potassium présente des concentrations comprises entre 1,9 mg/l (P410 & P412) et 3 mg/l (P403).

IV.3.4.3. Faciès hydrochimique :

Les formules caractéristiques des différents échantillons d'eau permettent de définir dans le secteur d'In Amguel, deux faciès hydrochimiques (tableau IV.8) :

Tableau. IV.8 : *Faciès hydrochimique et formules caractéristiques des eaux autour du site BIF4.*

Faciès	Sous faciès	Echantillons
Bicarbonaté sodique	$Na^+ > Ca^{++} > Mg^{++} > K^+$ $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{--} > NO_3^-$	P402 – P404 – P406 – P408
	$Na^+ > Mg^{++} > Ca^{++} > K^+$ $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{--} > NO_3^-$	P401 – P407 – P409 – P412
Bicarbonaté magnésien	$Mg^{++} > Na^+ Ca^{++} > > K^+$ $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{--} > NO_3^-$	P403 – P405 – P410 – P411

La majorité des eaux se caractérisent par un faciès bicarbonaté sodique. Le faciès bicarbonaté magnésien caractérise un seul point d'eau (P403) localisé en aval du BIF4. Les trois autres points d'eau caractérisés par ce faciès sont situés en amont de l'ouvrage.

IV.3.4.4. Eléments indicateurs de la pollution organique :

La figure n° 101 montre que la matière organique est présente dans la majorité des échantillons analysés. Ses concentrations s'échelonnent entre 0,2 mg/l et 9,6 mg/l.

Les concentrations en ammonium, en phosphate et en matière organique sont généralement inférieures aux normes de potabilité de l'O.M.S à l'exception de l'échantillon P412 qui présente une concentration en matière organique dépasse largement les normes.

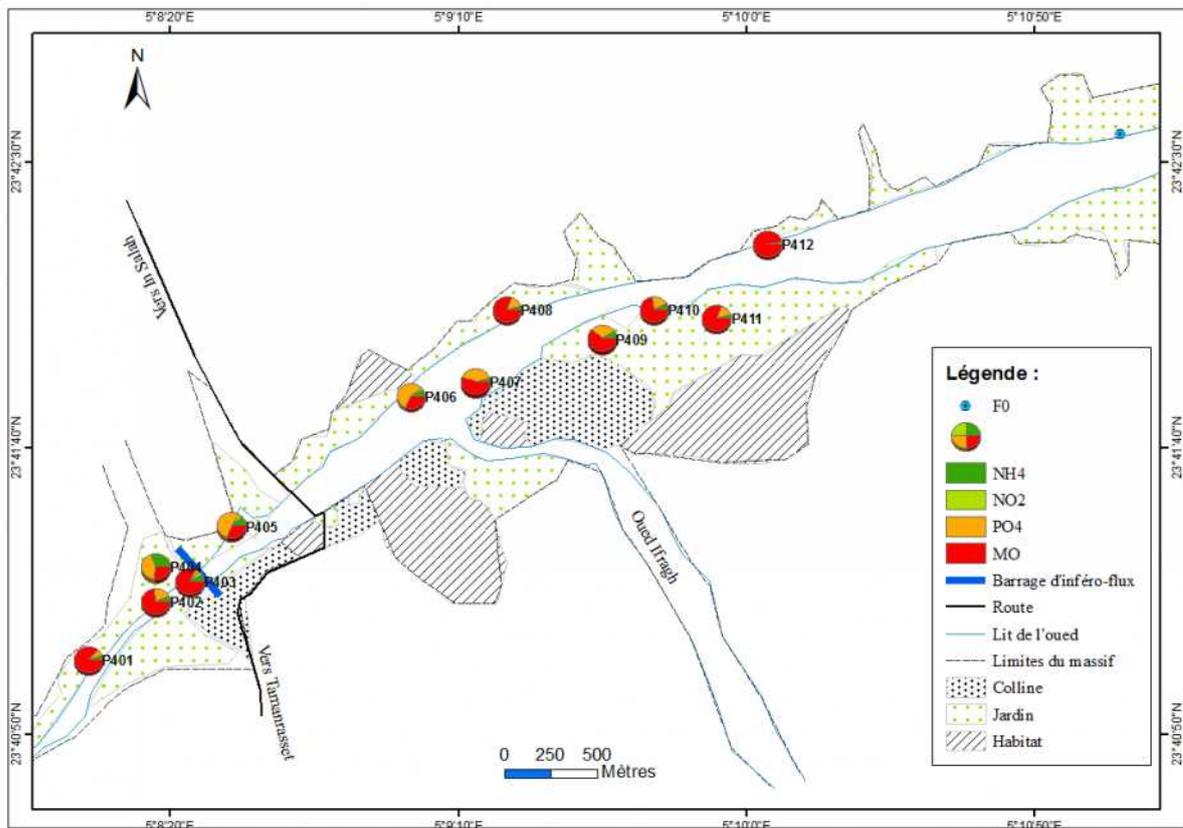


Figure 101. Carte de la répartition des teneurs en éléments indicateurs de la pollution organique des eaux la nappe de l'Oued In Amguel autour du site du BIF4 (04 juin 2016).

Les teneurs en ammonium varient entre 0,07 mg/l (P408) et 0,23 mg/l (P404) et les phosphates entre 0,07 mg/l (P403) et 0,59 mg/l (P407). Les nitrites présentent des concentrations comprises entre 0,001mg/l et 0,074 mg/l.

A l'exception des puits P408, P410 et P412, la majorité des eaux en amont du BIF4 ont des teneurs des phosphates dépassent la norme de l'O.M.S (0,5 mg/l), cependant en aval de l'ouvrage elles sont caractérisés par des teneurs inférieurs à 0,33 mg/l et restent conformes aux normes de potabilité de l'O.M.S.

IV.4. Représentation graphique des faciès chimiques des eaux de l'ensemble des nappes étudiées.

Les faciès hydrochimique des eaux présentes sur l'ensemble des quatre secteurs d'étude, sont synthétisés ici par représentation graphique des méthodes de Schoeller-Berkaloff et de Piper.

IV.4.1. Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Le positionnement des teneurs des ions majeurs sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Fig. 102) permet d'identifier six faciès hydrochimiques pour l'ensemble des eaux analysées dans la région d'étude.

Le faciès bicarbonaté calciques, magnésiens ou sodiques est le faciès dominant soit pour 74% des échantillons.

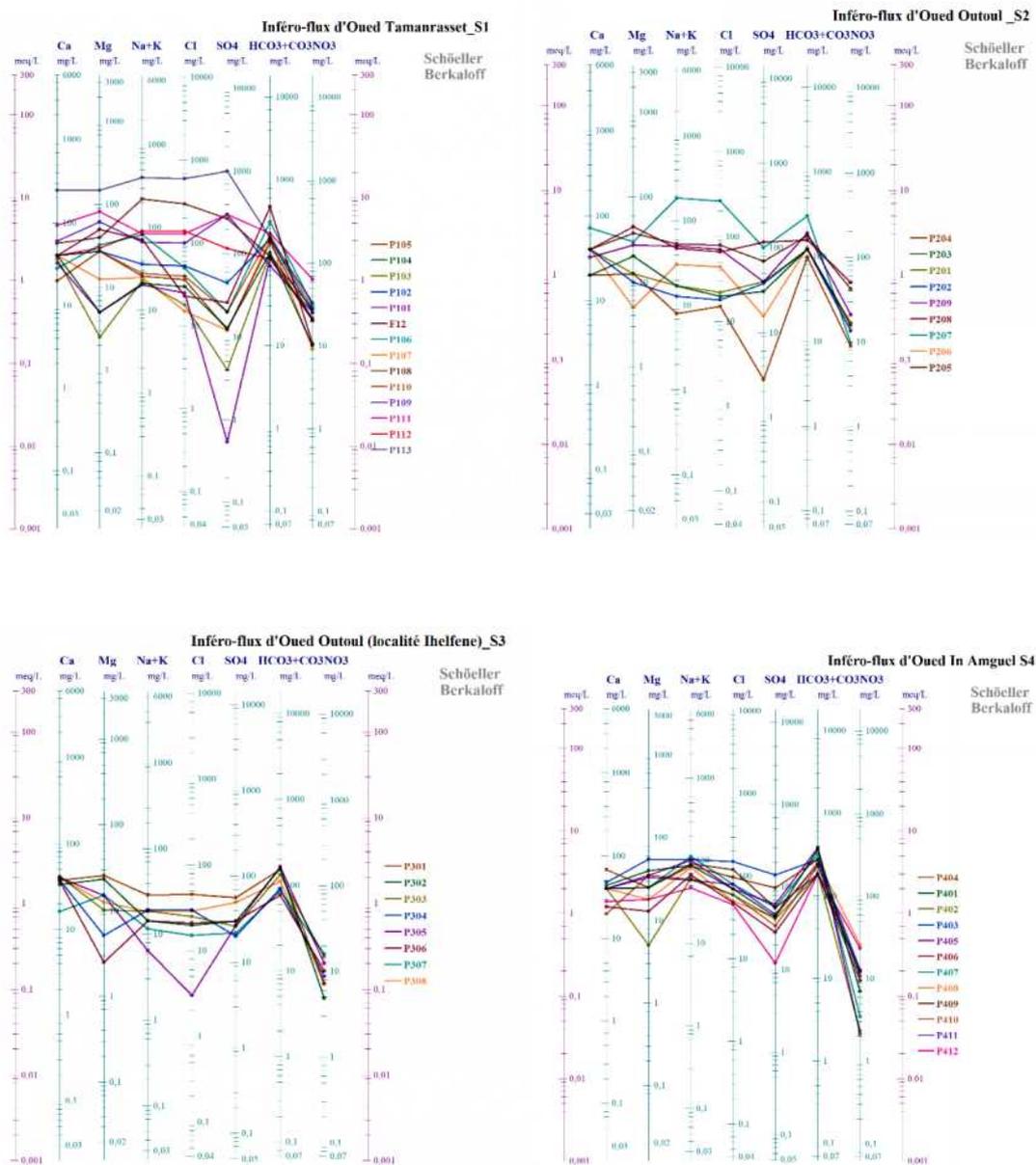


Figure 102. Représentation sur diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux échantillonnées aux niveaux des quatre secteurs étudiés.

IV.4.2. Diagramme de Piper :

Le diagramme de Piper permet également de caractériser, classer et comparer les eaux suivant leurs faciès hydrochimiques.

La projection des résultats des analyses chimiques dans ce diagramme (Fig. 103) fait apparaître clairement la diversité des faciès et sous-faciès hydrochimiques présents dans le secteur d'étude. Les points d'eau se répartissent sur les quatre portions du losange. Les points d'eau se répartissent pour

- 65 % pôle bicarbonaté calcique et magnésien
- 9 % pôle bicarbonaté sodique et potassique
- 22 % pôle chloruré et sulfaté calcique et magnésien
- 4 % chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique.

Le diagramme de Piper des échantillons d'eau des quatre nappes d'inféro-flux confirme les résultats précédents. Pour 74 % des échantillons, l'ion HCO_3^- est l'anion dominant.

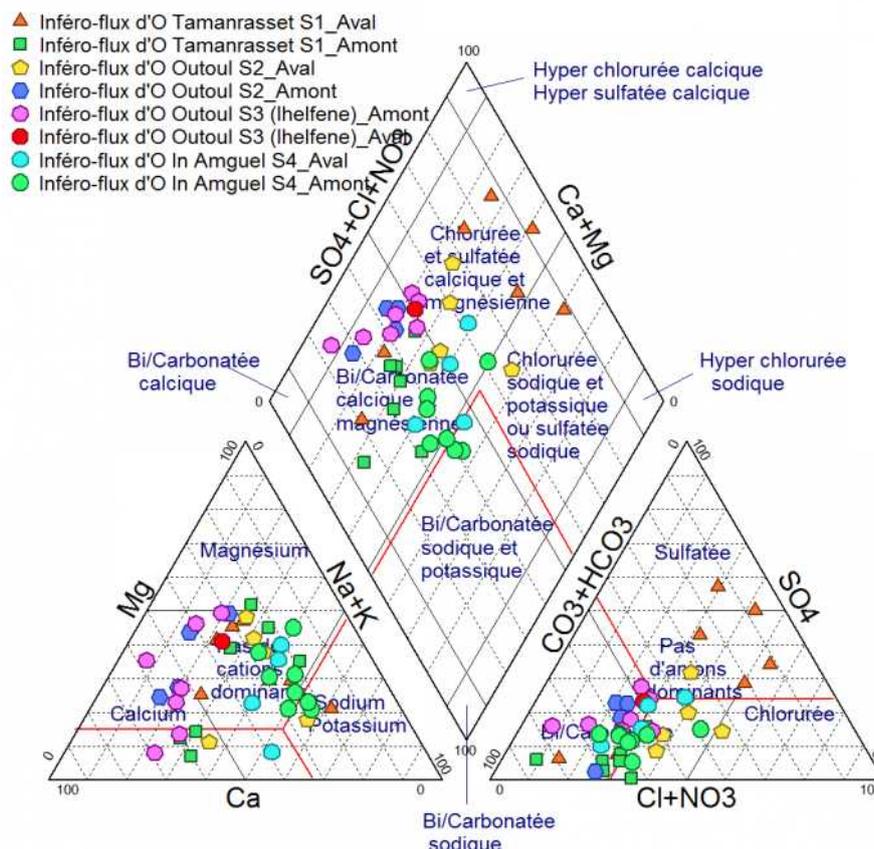


Figure 103. Représentation des eaux échantillonnées sur le diagramme de Piper.

Les deux faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien & chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique sont, en général rencontrés dans les eaux en aval des barrages d'inféro-flux, et représentent 26 % de l'ensemble des eaux analysées.

IV.5. Etude de l'indice de saturation des eaux de l'ensemble des nappes étudiées.

L'indice de saturation (IS) vis-à-vis d'un minéral donné permet d'évaluer la saturation de l'eau vis-à-vis de ce minéral. Il est défini par le logarithme du rapport d'activité ionique (PAI) sur le produit de solubilité (Ks) :

$$IS = \text{Log}\left(\frac{PAI}{Ks}\right)$$

- IS = 0, la solution est saturée vis-à-vis du minéral considéré ;
- IS < 0, la solution est sous-saturée vis-à-vis du minéral considéré, une dissolution du minéral est possible jusqu'à ce que PAI = Ks ;
- IS > 0, la solution est sur-saturée et une précipitation est possible.

Les résultats des indices de saturation vis-à-vis de la calcite, de la dolomie, de l'aragonite, de l'anhydrite et du gypse sont portés dans le tableau IV.9 (en annexe).

La caractérisation des eaux par l'étude du **système calco-carbonique** fait recours au diagramme "Indice de Saturation de la Dolomite" (ISD) versus "Indice de Saturation de la Calcite" (ISC) et au diagramme "pH réel" versus "pH équilibre". Le diagramme ISD/ISC donne des informations sur l'âge relatif des eaux (temps de séjour), la perméabilité des aquifères et la vitesse de circulation de l'eau (Oga et al., 2009).

Le diagramme ISC versus ISD montre qu'à l'exception de trois échantillons analysés, les eaux des quatre nappes d'inféro-flux présentent une sous-saturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomite (Fig. 104).

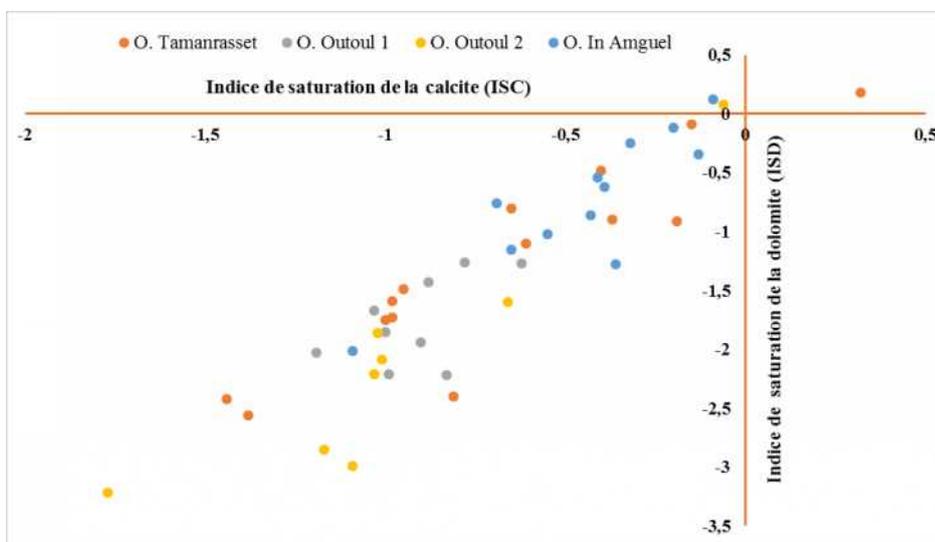


Figure 104. Indice de saturation (IS) des échantillons d'eau à la calcite et à la dolomite.

Concernant les trois échantillons sursaturés, l'échantillon P113 (BIF1) est sursaturé en deux minéraux : calcite et dolomite. Les deux échantillons P301 (BIF3) et P401 (BIF4) le sont uniquement vis-à-vis de la dolomite.

Il est à noter que la sous-saturation est plus prononcée dans les eaux ayant des teneurs en bicarbonates assez faible et des pH inférieur à 7, tels que les eaux de la nappe d'Outoul BIF3 et celles à l'amont du BIF2 d'Outoul ainsi que les eaux de l'échantillon P109 (BIF1).

Sur l'ensemble de la région d'étude, il apparait clairement que la sous-saturation des eaux par rapport aux minéraux, calcite et dolomite, renseigne sur le faible de temps de séjour des eaux souterraines (infiltration des eaux de crue) et du contexte géologique de cette région à substratum cristallin et cristallophyllien.

IV.6. Analyse en composantes principales des paramètres physico-chimiques :

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse statistique de données multidimensionnelles. Cette méthode consiste à exprimer un ensemble de variables en un ensemble de combinaisons linéaires de facteurs non corrélés entre eux, ces facteurs rendant compte d'une fraction de plus en plus faible de la variabilité des données. L'analyse en composantes principales permet de représenter les données originelles (individus et variables) dans un espace de dimension inférieure à l'espace originel, tout en limitant au maximum la perte d'information. La représentation des données dans des espaces de faible dimension en facilite considérablement l'analyse.

L'objectif de l'application de cette analyse dans ce travail étant de décrire ou de classer les données pour permettre l'interprétation du fonctionnement hydrochimique des nappes d'inféro-flux étudiées.

Une analyse en composantes principales a été réalisée dans le but d'orienter l'étude hydrochimique. En effet, l'étude des ressemblances entre les différents échantillons et les liaisons entre les variables permettent de mettre en évidence les associations existantes entre les différentes variables et l'existence éventuelle de sous populations.

Dans notre étude, l'analyse en composantes principales a été réalisée en prenant compte de 10 paramètres physico-chimiques provenant de l'analyse d'eaux échantillonnées pour l'ensemble des nappes d'inféro-flux, à savoir les paramètres : CE, pH, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻.

✓ Corrélations entre les éléments

Une matrice de corrélation de 10 paramètres présente des corrélations fortes et positives très intéressantes.

Tableau. IV.9 : Matrice de corrélation de 10 paramètres pour les eaux analysées.

Variables	pH	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	1									
CE	-0,18	1								
Ca	-0,07	0,73	1							
Mg	-0,22	0,81	0,53	1						
Na	-0,09	0,88	0,52	0,49	1					
K	-0,06	0,18	0,07	0,24	0,18	1				
Cl	-0,05	0,86	0,60	0,50	0,92	-0,02	1			
SO4	-0,08	0,82	0,73	0,75	0,58	-0,004	0,69	1		
HCO3	-0,20	0,47	0,23	0,46	0,47	0,58	0,20	-0,01	1	
NO3	-0,18	0,36	0,29	0,53	0,09	-0,34	0,19	0,49	-0,13	1

L'analyse de la matrice de corrélation permet de retenir les éléments corrélés deux à deux avec un coefficient de corrélation significatif. On remarque que :

La conductivité électrique est bien corrélée au sodium, aux chlorures, aux sulfates et au magnésium, pour des coefficients de corrélation respectifs de 0,88; 0,86; 0,82 et 0,81. Cette corrélation montre que les variations des charges ioniques dissoutes sont entièrement ou en partie liées aux variations des teneurs de ces différents ions. Ceci indique également que ces différents paramètres ont tendance à évoluer concomitamment, soit par concentration sous l'effet de l'évaporation, soit par des apports d'ions issus de sources communes. Les chlorures sont corrélés au sodium (0,92), au calcium (0,60).

La figure n° 105 montre que le premier cercle de corrélation ; axe factoriel F1 (48,56%) x axe factoriel F2 (18,53%) ; représente 67% de la variance totale. Le deuxième cercle de corrélation ; axe factoriel F1 (48,56%) x axe factoriel F3 (11,99%) ; représente 60% de la variance totale.

De l'avis de certains auteurs tels que Biemi (1986), Faillat (1986), l'analyse en composantes principales n'est valable, que lorsque les plans factoriels étudiés représentent au moins 70% de la distribution de la variance totale du nuage de points. En dessous de cette limite, il est admis que l'analyse ne tient pas compte d'une grande quantité d'informations.

Dans notre étude, la distribution de la variance totale du nuage de points reste à la limite du niveau significatif pour faire la classification et étudier les tendances et les corrélations qui peuvent exister entre les paramètres pour mieux en déduire les mécanismes d'acquisition de la minéralisation.

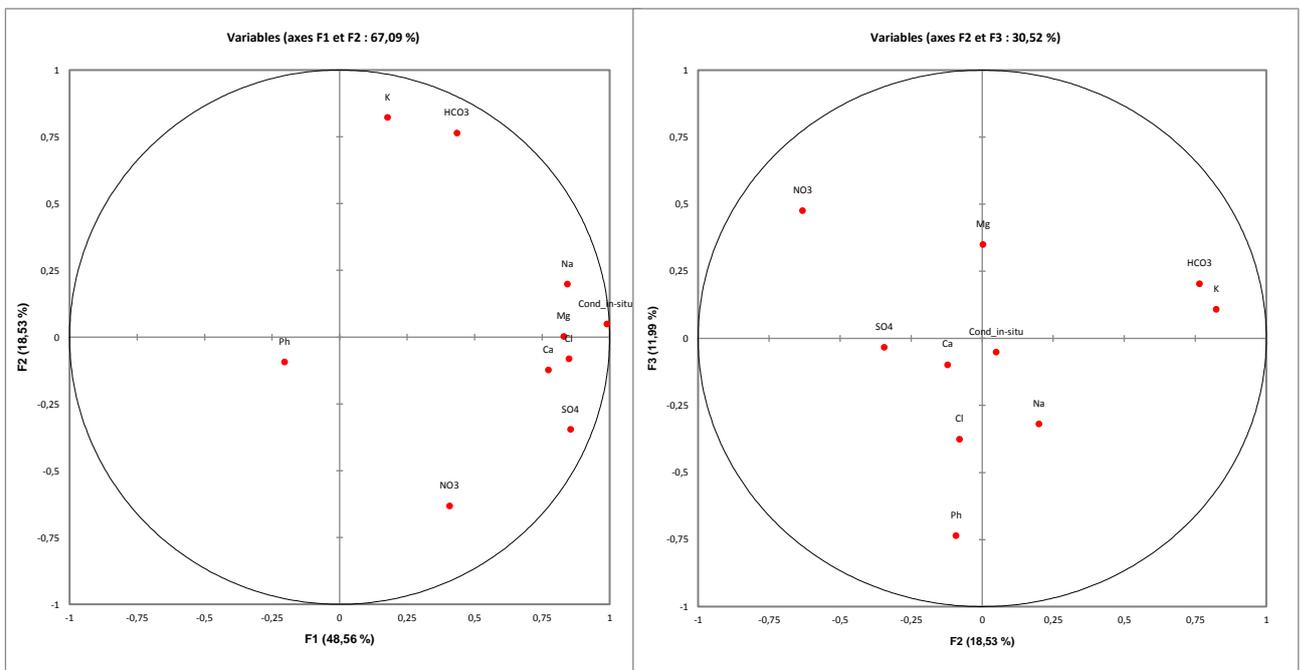


Figure 105. Projection des variables sur les plans factoriels F1 x F2 & F2 x F3.

L'analyse de la figure n° 105 de la projection des variables sur le plan factoriel (1x2) révèle que l'axe 1 regroupe la quasi-totalité des éléments dans le pôle positif à l'exception du pH.

Cet axe factoriel F1 montre qu'il exprime la source principale de minéralisation de l'eau dans les différentes nappes et rend compte aussi de la présence d'autres sources complémentaires de minéralisation des eaux. Nous pouvons constater la présence de deux sous groupes qui font ressortir l'affinité des ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) et (HCO_3^- , K^+). Le premier sous-groupe montre que les variations de la minéralisation sont entièrement ou en partie liées aux variations des teneurs de ses différents ions. L'ion Na^+ apparaît à l'intermédiaire des sous groupes et proche du premier. Il contribue également à la minéralisation.

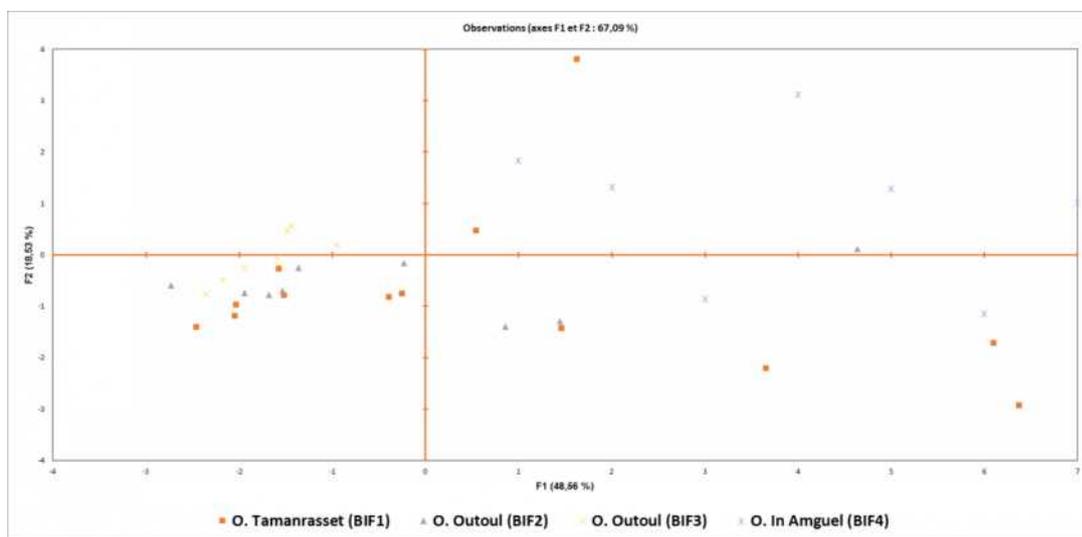
L'ion NO_3^- apparaît indépendamment des groupes précédents et cela peut s'expliquer par son origine anthropique caractéristique.

L'axe F2 qui contrôle 18,53% de l'inertie totale, discrimine la source principale de la minéralisation. Il est corrélé en positif avec K^+ (0,82) et HCO_3^- (0,76), et en négatif avec NO_3^- (-0,63)

L'axe F3 qui exprime 12% de l'information met en évidence que le pH est mieux exprimé sur cet axe (-0,73). Les ions HCO_3^- , K^+ , Mg^{2+} et NO_3^- sont définis en positif sur l'axe F3, et Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} et Na^+ en négatif sur cet axe.

Les ions Na^+ et NO_3^- apparaissent indépendamment des deux sous groupes détectés sur l'axe F1. ceci confirme leur comportement indépendant des autres variables.

L'analyse de la figure 106 de la projection des individus sur le plan factoriel (F1xF2) révèle que la répartition des échantillons se fait selon la minéralisation et les teneurs en sulfates et en sodium.



Figure

106. Projection des individus sur les plans factoriels F1 x F2.

Les eaux ayant de faibles minéralisations se placent sur la partie négative de l'axe F1 et les eaux de fortes minéralisations se placent sur la partie positive. De la même manière, les eaux les plus riches en sodium se retrouvent dans la partie positive de l'axe F2 (groupe 2) et les eaux riches en sulfates se retrouvent dans sa partie négative et forment le troisième groupe des échantillons.

7. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) :

Le but des méthodes de classification est de construire une partition en classes ou une suite de partitions emboîtées, d'un ensemble d'objets dont on connaît les distances deux à deux. Les classes formées doivent être aussi homogènes que possible. La classification hiérarchique consiste à l'agglomération progressive, de façon ascendante deux à deux des éléments les plus proches (Lebart et al, 2006).

Elle se représente sous forme d'un dendrogramme ou arbre de classification. Cet arbre est obtenu dans la plupart des méthodes de manière ascendante : on regroupe d'abord les deux individus les plus proches qui forment un "sommet", il ne reste plus que $n-1$ objets et on itère le processus jusqu'à regroupement complet. Un des problèmes consiste à définir une mesure de dissimilarité entre parties.

La méthode de Ward utilise les distances euclidiennes. Elle consiste à agréger les individus qui font le moins varier l'inertie intra-classe. En d'autres termes, on cherche à obtenir à chaque pas un minimum local de l'inertie intra-classe ou un maximum de l'inertie interclasse.

L'indice de dissimilarité entre deux classes (ou niveau d'agrégation de ces deux classes) est alors égal à la perte d'inertie intra-classe résultant de leur regroupement. Cette perte d'inertie se calcule à l'aide de la formule de Lance et Williams (1967) généralisée par Jambu (1978).

On notera que la somme des niveaux d'agrégation des différents noeuds de l'arbre doit être égale à l'inertie totale du nuage puisque la somme des pertes d'inertie est égale à l'inertie totale.

La classification ascendante hiérarchique de nos données physico-chimiques, 42 analyses traitées, a été réalisée à partir des 9 paramètres présentent des corrélations significatives. Cette classification montre trois grandes classes représentant quatre sous-classes. On distingue (Fig. 107) :

- La classe 1 représente 12 échantillons qui se caractérisent par de fortes minéralisations avec des teneurs en sodium élevées.
- La classe 2 avec quatre échantillons présente une forte minéralisation liée principalement aux sulfates. Ces échantillons spécifiques sont localisés dans la partie aval de l'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset.
- La classe 3 est composée par la moitié des échantillons analysés. Cette classe regroupe les échantillons de faible minéralisation.

Tableau. IV.10 : Répartition des échantillons selon leurs classes (méthode CAH).

Classe	Echantillons											
Classe 1	P112	P106	F12	P205	P208	P404	P401	P403	P405	P407	P409	P411
Classe 2	P111	P110	P108	P207								
Classe 3	P109	P107	P105	P104	P103	P102	P101	P206	P209	P202	P201	
		P203	P204	P308	P307	P306	P305	P304	P303	P302	P301	
		P402	P406	P408	P410	P412						

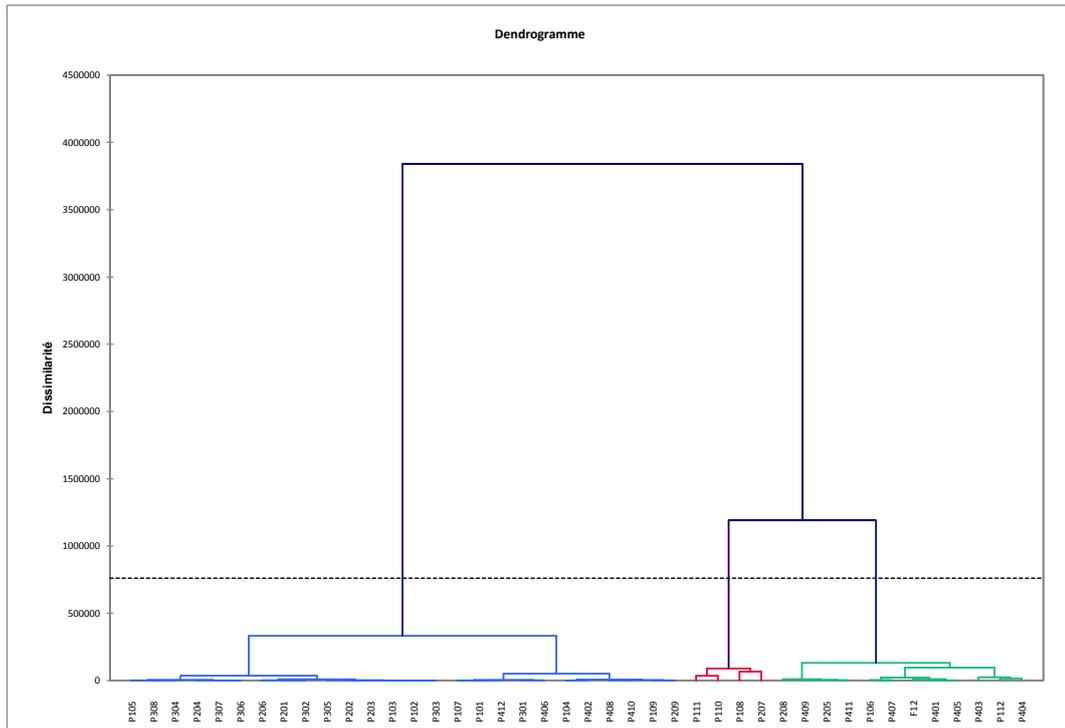


Figure 107. Dendrogramme des individus.

Les classes obtenues par cette analyse sont relativement les mêmes que ceux obtenus par l'ACP. Ceci nous permet de considérer les différents classes ou groupes qui se dégagent de ces deux analyses comme globalement cohérentes. Outre leur caractère systématique, ces deux analyses fournissent des résultats pertinents. Prenant en compte la plupart des informations fournies, à savoir les paramètres physico-chimiques, elles permettent d'identifier et de caractériser les différents faciès d'eaux souterraines.

Conclusion :

L'étude des caractéristiques physico-chimiques a concerné 43 échantillons prélevés au sein des différentes nappes étudiées. Leur interprétation fait ressortir les principales observations suivantes :

- les températures des eaux prélevées varient de 23,1 à 27,6°C pour l'ensemble de l'eau des nappes, soit sous fort contrôle de la température de l'air ambiant,
- la valeur moyenne de la conductivité électrique est de 637 $\mu\text{S}/\text{cm}$, à l'exception d'un seul point d'eau atteignant une valeur de 4100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, rencontrée au niveau de la nappe de l'Oued Tamanrasset,
- l'ordre d'abondance des cations est en cas général $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{K}$. Celui des anions est : $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{NO}_3$.

La caractérisation spatiale de la composition chimique des eaux de chaque nappe étudiée montre que :

- les valeurs de la conductivité présentent des contrastes entre l'amont et l'aval des aquifères, telles autour des sites BIF1, BIF2 et BIF4,
- les eaux de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul (site BIF3) sont relativement moins minéralisées comparativement aux autres nappes.

Concernant les faciès hydrochimiques :

- les eaux de l'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset se caractérisent par la présence de six types de faciès, allant du pôle bicarbonaté calcique (moins minéralisé) au pôle sulfaté sodique (fortement minéralisé),
- à l'exception d'un seul point d'eau qui se caractérise par un faciès chloruré sodique, les eaux de l'inféro-flux de l'Oued Outoul (site BIF2) se caractérisent par les faciès bicarbonaté magnésien et bicarbonaté calcique,
- au niveau de l'inféro-flux de l'Oued Outoul (localité d'Ihelfene), la quasi-totalité des échantillons examinés sont de faciès bicarbonaté calcique,
- le faciès le plus représentatif de l'inféro-flux de l'Oued In Amguel est le bicarbonaté sodique. On note également la présence d'eaux de type bicarbonaté magnésien.

Les faciès hydrochimiques ont été présentées graphiquement par diagrammes de Piper et de Schoeller-Berkaloff.

Les méthodes statistiques multivariées : ACP et CHA, ont été utilisées pour déterminer les sources de la minéralisation des différents aquifères. La minéralisation des eaux souterraines est entièrement ou en partie influencée par la variation des teneurs suivantes : Ca, Mg, Cl, SO_4 et Na. La dissolution des minéraux silicatés et des carbonates, les échanges ioniques, les mélanges entre eaux des formations différentes et les apports extérieurs (atmosphériques et anthropiques) sont les facteurs influençant la minéralisation des eaux.

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'étude des effets des quatre barrages d'inféro-flux, objet du présent travail, sur le comportement des nappes alluviales concernées s'est basée sur une double approche : hydrodynamique et hydrochimique.

La première approche s'est basée sur l'exploitation d'une part de données piézométriques anciennes et d'autre part de données piézométriques collectées au cours de la réalisation du présent travail.

La deuxième approche a ciblé l'étude du contexte hydrochimique, en amont et en aval, des sites des barrages étudiés. Cette étude s'est basée sur l'interprétation des données recueillies exclusivement au cours de campagnes de prélèvement d'eau réalisées au cours de la réalisation du présent travail.

Préalablement, cela a nécessité l'étude en premier chapitre des caractéristiques hydro-physiographiques des quatre bassins versants concernés ainsi que les contextes : climatologique, géologique et hydrogéologique, de l'ensemble de la région d'étude. Il apparaît que la physiographie des trois bassins versant des oueds étudiés se caractérise par des formes globalement allongées avec des coefficients de Gravelius compris entre 1.71 et 1.92. Une faible densité de drainage caractérise le réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Tamanrasset (secteur étudié) et celle de l'Oued Outoul cependant que le bassin de l'Oued In Amguel est marqué par un réseau hydrographique plus dense.

La climatologie de la région du Hoggar se caractérise par des précipitations annuelles tombant essentiellement pendant les mois de juillet et août, et restant notables en septembre. Dans ce cadre climatique, l'irrégularité de la pluie, à l'échelle spatiale et temporelle, est un caractère prépondérant. Le régime des précipitations est hétérogène. Le rôle des reliefs et du facteur altimétrique jouent un rôle très important dans la répartition des précipitations. Ainsi, le module interannuel moyen de ces dernières est de 123 mm à la station de l'Assekrem située à 2710 m d'altitude alors que la station de Tamanrasset située à 1372 m d'altitude présente un module de presque de moitié : 58 mm. Le rôle des reliefs influence également les autres paramètres du climat : températures, radiation solaire, vents, etc. La température moyenne annuelle indique ainsi un différentiel de près de dix degrés Celsius entre les deux stations précitées.

Géologiquement, la région d'étude est située dans la partie centrale du socle cristallin précambrien du bouclier targui. Les formations géologiques du Hoggar sont représentées essentiellement soit par des gneiss et des micaschistes, soit par des granites, d'âge protérozoïque ou paléozoïque soit encore par des formations volcaniques du Tertiaire et du Quaternaire. Le tout recouvert localement au niveau des vallées d'oueds par des formations alluvionnaires.

Le contexte géologique prédétermine le contexte hydrogéologique de la région essentiellement du fait induit de la faible extension et d'épaisseur, voire l'inexistence, de grands ensembles sédimentaires. Le socle précambrien du massif du Hoggar se caractérise en lui-même par sa faible perméabilité. Les basaltes ou formations volcaniques d'âge Tertiaire présentent une porosité d'interstice ainsi que quelques fissures de moindre importance. Leur épaisseur est d'une centaine de mètres au maximum. Les seuls niveaux perméables correspondent de fait aux dépôts quaternaires essentiellement localisés dans les vallées des oueds, au-dessus de 1000-1200 m d'altitude, à faible extension transversale drainant parfois les systèmes fracturés du

socle encaissant au-dessus de 1000 m. Elles sont alimentées presque exclusivement à la faveur des crues des différents oueds tributaires.

Le deuxième chapitre du mémoire a détaillé les spécifications géotechniques de chaque barrage étudié ainsi que les caractéristiques géologiques, géophysiques et hydrogéologiques autour de chaque site. Les digues des barrages étudiés se caractérisent par des hauteurs qui correspondent globalement à l'épaisseur des alluvions, variant entre 4 m et 15 m, et se prolongeant pour certains dans le substratum soit gneissique ou granitique, sur des profondeurs variables : 11 m pour le cas du BIF4 sur l'Oued In Amguel et 6.8 m pour le cas du BIF1 sur l'Oued Tamanrasset. La longueur des digues varie entre 30 m (BIF2) et 350 m (BIF1). Les quatre barrages présentent des capacités de stockage variant entre 0.05 Hm³ et 4 Hm³.

Les forages et sondages mécaniques exécutés sur les différents secteurs montrent la prédominance du contexte de présence de formations suggariennes gneissiques et/ou pharusiennes granitiques surmontée au niveau des vallées d'oued, et constituant le substratum des formations alluviales. Les études géophysiques montrent la présence d'un modèle de trois terrains. Les dépôts quaternaires combrent des cuvettes allongées, parfois étroites. Ils reposent sur un socle fissuré passant progressivement à la roche saine. L'épaisseur de ces dépôts alluvionnaires peut atteindre 30 m.

Les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères alluviaux des oueds autour des quatre sites étudiés indiquent des valeurs de perméabilité variables. Si l'aquifère alluvial de l'Oued Tamanrasset présente de faibles valeurs de perméabilité, les trois autres aquifères présentent de bonnes perméabilités qui oscillent généralement autour de 10⁻³ m/s. La discrimination de ces valeurs est due à l'hétérogénéité des alluvions et de la gamme granulométrique qu'ils présentent au niveau de chaque portion d'aquifère. Par ailleurs, le niveau altéré du socle sous-jacent est également aquifère, mais ses caractéristiques hydrodynamiques restent moins bien connues.

Le troisième chapitre a abordé les caractéristiques hydrodynamiques de chaque nappe d'inféro-flux, en amont et en aval, des barrages. Cette étude s'est basée essentiellement sur l'étude des données piézométriques acquises au cours du présent travail. La morphologie de la surface des nappes est essentiellement de type radiale à espacement variable des isopièzes. L'allongement des vallées et la répartition des puits présents ne permettent pas de bien identifier la divergence ou convergence des écoulements, sauf au niveau des zones fortement sollicitées par les pompes ou on note des dépressions piézométriques. Le rôle de verrou joué par des remontées ou affleurement du substratum rocheux perturbe également de façon variable l'allure des isopièzes. Par ailleurs, la comparaison des cartes piézométriques établies après la construction des barrages d'inféro-flux et celles établies antérieurement a permis de déduire que les nappes d'inféro-flux de l'Oued Outoul (BIF3) et celle de l'inféro-flux de l'Oued In Amguel (BIF4) ont subi des exhaussements notables du niveau d'eau en amont des digues. Pour exemple, autour du BIF1 établi sur l'Oued Tamanrasset, la piézométrie de la nappe indique un dénivelé de 10 m entre l'amont et l'aval du barrage.

L'étude piézométrique a mis en évidence l'impact bénéfique variable des barrages d'inféro-flux dans la partie amont, plus ou moins immédiate, de chaque nappe étudiée. Un suivi à long terme des points de mesure, spatialement bien répartis et bien nivelés, sont indispensables pour

confirmer et mieux valider l'efficacité, déjà identifiée ou à venir (effet du vieillissement des ouvrages), de ces barrages d'inféro-flux.

La dernière partie du mémoire a traité les caractéristiques hydrochimiques des eaux de nappe en amont et en aval de chaque site de barrage. La minéralisation des eaux étant étroitement liée à la nature pétrographique de l'encaissant, l'interprétation de la composition chimique des eaux souterraines constitue une méthode d'investigation complémentaire dans la compréhension du fonctionnement hydrodynamique des nappes étudiées.

L'étude hydrochimique a fait ressortir que les températures de l'eau des différentes nappes varient entre 23,1 à 27,6°C, soit sous fort contrôle de la température de l'air ambiant. Les valeurs du pH sont en général proches de la neutralité. La valeur moyenne de la conductivité électrique est de 637 $\mu\text{S}/\text{cm}$, à l'exception d'un seul point d'eau atteignant une valeur de 4100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, rencontrée au niveau de la nappe de l'Oued Tamanrasset.

La caractérisation spatiale de la composition chimique des eaux de chaque nappe étudié a montré que les valeurs de la conductivité présentent des contrastes entre l'amont et l'aval des aquifères, telles autour des sites BIF1, BIF2 et BIF4. D'autre part, les eaux de la nappe d'inféro-flux de l'Oued Outoul (site BIF3) sont relativement moins minéralisées comparativement aux autres nappes.

Concernant les faciès hydrochimiques, les eaux de l'inféro-flux de l'Oued Tamanrasset se caractérisent par la présence de six types de faciès, allant du pôle bicarbonaté calcique (moins minéralisé) au pôle sulfaté sodique (fortement minéralisé). A l'exception d'un seul point d'eau qui se caractérise par un faciès chloruré sodique, les eaux de l'inféro-flux de l'Oued Outoul (site BIF2) se caractérisent par les faciès bicarbonaté magnésien et bicarbonaté calcique. Au niveau de l'inféro-flux de l'Oued Outoul (localité d'Ihelfene), la quasi-totalité des échantillons examinés sont de faciès bicarbonaté calcique. Au niveau de l'Oued In Amguel, le faciès le plus représentatif est le bicarbonaté sodique. On y note également la présence d'eaux de type bicarbonaté magnésien.

Les méthodes statistiques multivariées : ACP et CHA, ont été utilisées pour déterminer les sources de la minéralisation des différents aquifères. La minéralisation des eaux souterraines est entièrement ou en partie influencée par la variation des teneurs suivantes : Ca, Mg, Cl, SO₄ et Na. La dissolution des minéraux silicatés et des carbonates, les échanges ioniques, les mélanges entre eaux des formations différentes et les apports extérieurs (atmosphériques et anthropiques) sont les facteurs influençant la minéralisation des eaux.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- Abdou Babaye M S. (2013).** Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger). Thèse de doctorat, Univ Abdou Moumouni, 229 p.
- Achor M. (2014).** Vulnérabilité et protection des eaux souterraines en zone aride : cas de la vallée du M'Zab (Ghardaia, Algérie). Mémoire de Magister, Univ. Oran, 126 p.
- Allégre C.J., Caby R. (1972).** Chronologie absolue du Précambrien de l'Ahaggar occidental. C.R. Acad. Sci., Paris, D, 275, 2095-2098. Acad. Sci., Paris, D, 275, 2095-2098.
- A.N.R.H. (1990).** Notice explicative de la carte hydrogéologique du Hoggar et des Tassilis.
- Barkhordari J. (2015).** The pre-selection of suitable sites for small underground dams in arid areas using GIS (A case study in Yazd_Ardakan watershed). International Geoinformatics Research and Development Journal
- Bendaoud A., Ouzegane K., Godard G., Liégeois J.P., Kienast J.R., Bruguier O., Drareni A. (2008).** Geochronology and metamorphic P-T-X evolution of Eburnean granulite- facies métapelites of Tidjenouine (central Hoggar, Algeria): witness of the LATEA metacratonic evolution. In: Ennih, N., Liégeois, J.P. (Eds.), the boundaries of west Africa Craton: Geological Society of London Special Publication, 297, pp. 111-146.
- Bertrand J.M.L., Boissonnas J., Caby R., Gravelle M., Lelubre M. (1966).** Existence d'une discordance dans l'antécambrien du "fossé" pharusien de l'Ahaggar occidental (Sahara central). C. R. Acad. Sc. Paris, 262, D, 2197-2200.
- Bertrand J.M. (1974).** Evolution polycyclique des gneiss précambriens de l'Aleksod (Hoggar central, Sahara Algérien). Aspect structuraux, pétrologiques, géochimiques et géochronologiques. Thèse, Montpellier, CNRS, CRZA, Serv. Geol., 19, 370 p.
- Bertrand J.M., Lasserre M. (1976).** Pan-African and pre-Pan-African history of the Hoggar Algerian Sahara in the light of new geochronological data from the Aleksod area Precamb. Res., 3, pp343-362.
- Bertrand J.M.L., Caby R. (1978).** Geodynamic evolution of the Pan-African orogenic belt: a new interpretation of the Hoggar Shield (Algerian Sahara). Geological Rundschau 67, 2, pp. 357-388.
- Bertrand J.M. L., Caby R., Ducroit J., Lancelot., Saadallah A. (1978).** The late pan-African intracontinental linear fold belt of the eastern Hoggar (Central Sahara, Algeria): Geology, structural development, U/Pb geochronology, tectonic implications for the Hoggar shield, Precambrian Research 7: 349-376.
- BERTRAND J.M., MICHARD A., DAUTEL D., PILLOT M. (1984).** Ages U/Pb éburnéens et pan-africains au Hoggar central (Algérie). Conséquences géodynamiques, CR.Acad.Sci., Paris, D 298: 643-646.
- Bertrand J.M., Michard A., Boullier A.M., Dautel D., (1986).** Structure and U/Pb geochronology of Central Hoggar (Algeria): a reappraisal of its Pan-African evolution. Tectonics 5, 955-972.
- Bitat B. (2010).** L'eau à Tamanrasset : gestion d'une pénurie. Mémoire de Magister, Univ. Constantine 1, 194 p.
- Black R. (1978).** Propos sur le Pan-africain. Bull. Soc. Géol. Fr., XX,843-850.

- Black R., Caby R., Moussin-Ponchkine A., Bayer R., Bertrand J.M., Boullier A.M., Faber J., Lesquer A. (1979).** Evidence for late Precambrian plate. Tectonics in West Africa. *Nature*. 278. 223-227.
- Black R., Latouche L., Liégeois J.P., Caby R., Bertrand J.M. (1994).** Pan-African displaced terranes in the Tuareg shield (central Sahara). *Geology* 22, pp 641-644.
- Blaise J. (1967).** Le Précambrien du Tazat. Sa place dans les structures du Hoggar oriental. C.N.R.S., Ser. Geol., 7, 197p.
- Boubakar Hassane A. (2010).** Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER). Thèse de doctorat, Univ Abdou Moumouni de Niamey, 187 p.
- Boulahbal S. (2012).** Etude des écoulements souterrains dans les gneiss schisteux fissurés du précambrien de la région de Tamanrasset (Algérie). Mémoire de Magister, Univ. HADJ LAKHDAR, BATNA, 134 p.
- Boullier A.M. (1991).** The Pan-African Trans-Saharan belt in the Hoggar shield (Algeria, Mali, Niger): a review, In: R.D, Dallmeyer and J.P, Lécorché, The West African Orogens and Circum-Atlantic Correlatives Springer-Verlag, Berlin, pp, 85-105,
- Boullier A.M., Bertrand J.M. (1981).** Tectonique tangentielle profonde et couloirs mylonitiques dans le Hoggar central polycyclique (Algérie). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 7, XXXIII. n° 1, pp. 17-22.
- Bouguebrin J. (2009).** Etude des inclusions fluides associées aux gisements à W-Sn du Hoggar Central. Thèse de Magister, Univ. BADJI MOKHTAR- ANNABA, 131 p.
- Bouguern A., Baker H. (2007).** Méthodes géophysiques appliquées à la recherche d'eau souterraine dans l'Oued In Amguel (Tamanrasset, Algérie). *GEOFCAN* (6). Bondy, France, pp. 119-122.
- Bournas N. (1998).** Etude structurale du bassin sédimentaire de TIN-SIRIRINE par les méthodes géophysiques. Thèse de Magister, Univ. USTHB, 113 p.
- Braquaval R. (1957).** Études d'écoulement en régime désertique. Massif de l'Ennedi et région nord de Mortcha. ORSTOM, Paris, 92 p.
- Briedj M (1993).** Etude géologique de la région de TAHIFET (Hoggar central, Algérie) : Implications géodynamiques. Thèse de doctorat, Univ. Nancy 1, 189 p.
- Caby R. (1968).** Une zone de décrochements à l'échelle de l'Afrique dans le Précambrien de l'Ahaggar occidental. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7) X, pp 577-587.
- Caby R. (1970).** La chaîne Pharusienne dans le Nord-Ouest de l'Ahaggar (Sahara central, Algérie) ; sa place dans l'orogénèse du Précambrien supérieur en Afrique. Thèse Etat Univ. Montpellier, 336p.
- Caby R. (1972).** Evolution préorogénique, site et agencement de la chaîne pharusienne dans le NW de l'Ahaggar (Sahara algérien) : Sa place dans l'orogénèse pan-africaine en Afrique occidentale. Notes et mem. Serv. Géol. Maroc, n° 236, pp 65-80.
- Caby R., Bertrand J.M., Black R. (1981).** Pan-African closure and continental collision in the Hoggar-Iforas segment, Central Sahara. In "Precambrian Plate Tectonics, Kroner A., Elsevier, Amsterdam, pp 407-434.
- Caby R., Andreopoulos-Renaud U. (1987).** Le Hoggar oriental, bloc cratonisé à 730 Ma dans la chaîne Pan-Africaine du nord du continent africain. *Precamb. Res.* 36, pp 335-344.

Cahen L., Snelleing N.J., Delhal J., Vail J.R., Bonhomme M., Ledent D. (1984). The geochronology and Evolution of Africa. Clarendon Press. Oxford, 508p.

Charleux-Demergne J. (2001). Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie application à la caractérisation du régime de ruées des bassins versants. Thèse, Univ de MARNE-LA-VALLÉ, 257 p.

Chemlal N. (1983). Etude paléomorphologique et hydrogéologique de la vallée du bas Isser (Algérie). Thèse de 3^e cycle, Univ. Grenoble, 213 p.

Chenafi A. (1984). Contribution à l'étude hydrogéologique des remplissages alluviaux dans les principaux oueds de la région de Tamanrasset (Hoggar central). Mémoire d'Ingénieur, Univ. Oran, 126 p.

Cho M., Ha K.M., Choi Y.S., Kee W-S., Lachassagne P. and Wyns R. (2003). Relationship between the permeability of hard-rock aquifers and their weathered cover based on geological and hydrogeological observation in South Korea. In IAH Conference on Groundwater in fractured rocks, Prague 15-19 September 2003.

Dakore D. (2003). Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure Sud-Est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina Faso – Mali) – Essai de modélisation. Thèse de doctorat, Univ de Pierre et Marie Curie-Paris VI, 218 p.

Dewandel B., Lachassagne P., Wyns R., Maréchal, J-C. et Krishnamurthy N. S. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. Journal of Hydrology, Vol. 330 N°1-2, pp.260-284.

DIALOG HYDRO-GEO-SERVICE. (2001). Etude de faisabilité d'un barrage souterrain sur Oued Tamanrasset et ses affluents. Rapport géophysique.

Draibat A. (2015). Essai de modélisation de la nappe inféro-flux d'Oued In Amguel, région de Tamanrasset (Hoggar central ; Sud Algérien). Mémoire de Master, Univ. Abou Beker Belkaid, 125 p.

Dubief J. (1953). *Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara.* Alger, 457 p.

Elhoussaoui A. (2015). Hydrologie et modélisation de la fonction pluie-débit : cas du bassin versant de l'Oued Tamanrasset (Sud Algérie). Mémoire de Master, Univ. Abou Beker Belkaid, 117 p.

Fernand J. (2006). Les eaux sauvages des régions arides : Notions de base sur l'hydrologie des déserts. Revu. Géomorphologie : relief, processus, environnement. n° 4, pp. 285-298.

Ferrara G., Gravelle M. (1966). Radiometric ages from western Ahaggar (Sahara) suggesting an eastern limit for the west African craton. Earth Planet. Sci. Lett, V.1, pp 319-324.

E.N.HYD. (1989). Etude de faisabilité d'un barrage souterrain sur Oued In Amguel. Rapport géologique, géophysique et hydrogéologique.

E.N.HYD. (1990). Etude de faisabilité d'un barrage souterrain sur Tamanrasset. Rapport géologique, géophysique et hydrogéologique.

E.N.HYD. (1991). Etude de faisabilité d'un barrage souterrain sur Oued Outoul. Rapport géologique, géophysique et hydrogéologique.

E.N.HYD. (2005). Etude de faisabilité d'un barrage souterrain à Ihelfene. Rapport géologique, géophysique et hydrogéologique.

Ghodrati M., Ghazaryan S. (2013). Agriculture water supply in semi-arid zone by underground dams. *European Journal of Experimental Biology*, 2013, 3(3):706-711

Haddoum H. (1984). Lithologie, évolution structurale et géodynamique des terrains Précambriens d'Abankor-Timgaouine (Hoggar occidental). Thèse 3ème cycle, Univ. Paris Sud Orsay, 182p.

Hamit A. (2012). Étude du fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère du Chari Baguirmi (République du Tchad). Thèse de doctorat, de Poitiers, 238 p.

Hannachi A. (1981). Relations entre aquifères profonds et superficiels : hydrogéologie de la vallée de l'Oued M'Zi, à l'est de Laghouat, Wilaya de Laghouat (Algérie). Thèse de 3^e cycle, Univ. Grenoble, 212 p.

HIMIX. (2008). Etude de faisabilité du futur barrage d'inféro-flux au niveau de l'Oued Tamanrasset. Rapport géophysique.

Joly F. (1968). Hydrographie aride. *Mélanges offerts à M. Pardé*. Ophrys, Grenoble, 323-326.

Khedimi O.K. (2014). Volcanisme cénozoïque de la région de Tamanrasset : Pétrographie et minéralogie et mise en évidence des formations géologiques par la Télédétection (Hoggar central, Algérie). Mémoire de Master, Univ. Abou Beker Belkaid, 119 p.

Koussoube Y. (1992). Application de la géophysique électrique à l'étude des aquifères alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal (Nord-Guiers, Dagana, Bas-Ferlo). Mémoire D.E.A, Univ. CHIKH ANTA DIOP DE DAKAR, 72 p.

Lachassagne P, Wyns R, Bérard P, Bruel Th, Chéry L, Coutand Th, Desprats J-F, Le Strat P (2001). Exploitation of High-Yields in Hard-Rock Aquifers: Downscaling Methodology Combining GIS and Multicriteria Analysis to Delineate Field Prospecting Zones. *Ground Water*, Vol. 39, N°4, pp. 568-581.

Lachassagne P. et Wyns R. (2005). Généralités sur les eaux souterraines. Aquifères de socle. In: J.C. Roux (Editor), *Aquifères et Eaux Souterraines en France*. BRGM Editions, Orléans, pp. 43-51.

Latouche L., Vidal P. (1974). Geochronologie du Précambrien de la région des Gour Oum elalen NE de l'Ahaggar, Algérie. Un exemple de mobilisation du Strontium radiogénique. *Bull. Soc. Géol. Fr.*XVI 195-203.

Lelubre M. (1952). Recherches sur la géologie de l'Ahaggar central et occidental (Sahara central). *Bull.Serv.Carte Géol. Algérie*, Alger, 2^e série, 22, 2 tomes.

Lancelot J.R., Vitrac A., Allegre C.J. (1976). Uranium and Lead isotopic dating with grain-by grain zircon analysis: A study of complex geological history with a single rock. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 29, pp 357-324.

Lesquer et al, 1988. *Tectonophysics*, 152.

Lesquer, A., Bourmatte, A., Ly, S., Dautria, J.M. (1989). First heat flow determination from the central Sahara; relationship with Pan-African belt and Hoggar domal uplift. *Journal of African Earth Sciences*;vol. 9;No, 1,pp.14-48

Levassor V. (1971). Etude des ressources en eau de l'Oued Tamanrasset. Direction de l'hydraulique de la Wilaya des oasis, division technique Ouargla (Ouargla 1971).

Maréchal J-C., Dewandel B. et Subrahmanyam K. (2004). Contribution of hydraulic tests at different scales characterize fracture network properties in the weathered-fissured layer of hard rock aquifers. *Water Resources Research*, Vol. 40, pp. 11-17.

Miller C.L., Laflamme R.A. (1958). The digital terrain model - theory and application. *Photogrammetric Engineering*, 24(3), pp 433-442.

Mohamed A S. (2012). Approches géochimique et hydrodynamique de la recharge de la nappe du Trarza, Sud-Ouest de la Mauritanie. Thèse de doctorat, Univ. Paris Sud, 133 p.

Nouvelot J.F. (1973). Hydrologie des Mayos du Nord Cameroun monographie de la Tsanaga. *ORSTOM, 1973.*

Ould Ali M., Boutoutou D. (2011). Les barrages souterrains en Algérie (développement et perspectives) : le petit barrage de Timiaouine. 1er Séminaire International sur la Ressource en eau au sahara : Evaluation, Economie et Protection. Ouargla, 2011, pp. 125-132.

Oga M-S., Lasm T., Yao K. T., 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 Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 31 N°1, pp. 72-87.

Onder H., Yilmaz. (2005). Underground dams: A Tool of sustainable development and management of groundwater resources. *European Water* 11/12: 35-45, 2005.

ORGM (2004). Carte géologique du massif du Hoggar.

Peucat J.J., Drareni A., Latouche L., Deloule E., Vidal P. (2003). U-Pb zircon (TIMS and SIMS) and Sm-Nd whole-rock geochronology of the GourOumelalengranulitic basement, Hoggar massif, Tuareg shield, Ageria. *Journal of Africa Earth Sciences* 37, pp 229-239.

Sahraoui I., Soulimani S. (2003). Etude géophysique des alluvions de l'Oued Timiaouine (Wilaya d'Adrar) et de l'Oued In Amguel (Wilaya de Tamanrasset). Mémoire d'ingénieur, Univ d'Oran, 101 p.

Saighi O. (1984). Possibilités aquifères au Hoggar Central. Mémoire d'ingénieur, Univ Haouari Boumediene, 177 p.

Saighi O. (1999). Hydrogéologie en zones arides : Hydrochimie isotopique des eaux naturelles de l'Ahaggar et modélisation de nappe d'inféro-flux. Thèse de doctorat, Univ Houari Boumediene, 244 p.

Sauret E S G. (2013). Etude des potentialités hydrogéologiques d'une plaine alluviale en relation avec les eaux souterraines et de surface dans un contexte d'agriculture irriguée (Burkina Faso). Thèse de doctorat, Univ de Liège, 179 p.

Savat J. (1982). Common and uncommon selectivity in the process of fluid transportation, field observations and laboratory experiments on base surfaces. *Aridic soils and geomorphic processes*, Yalon (ed.), *Catena, supplement* 1, pp 139-160.

Schick A.P. (1970). Desert floods. *Symposium on the results of research on representative experimental basin*. International association scientific hydrologists, UNESCO, pp 478-493.

Schick A.P. (1987). Hydrologic aspects of floods in extreme arid environments, in R Baker *et al.*, *Flood geomorphology*, New York, J. Wiley and Sons, 189-203.

- Semiani A. (1996).** Métallogénie de la zone de cisaillement aurifère est-ouazzalienne : Structure, pétrologie et géochimie des gisements d'Or de Tirek-Amesmess (Hoggar occidental, Algérie). Thèse de doctorat, Univ. Renne I, 251 p.
- Taylor R., Howard K. (2000).** A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: evidence from Uganda. *Hydrogeology Journal*, Vol. 8 N°3, pp. 279-294.
- Vialette, Y., Vitel, G., 1981.** *Geochronological data on the Amsinassene-Tefedest block (Central Hoggar) and evidence for its polycyclic evolution.-Precambrian Res., 9, 241-254.*
- VIIEEL G. (1975).** Mylonitisation, tectonique cassante et lineamentaire du Hoggar central : leurs rapports avec les granites d'âge pharusien. *Rev. Géor. Phys. Géo. Dun*, (2). XVII, 4, p. 413-426.
- VIIEEL G. (1979).** La région Tefedest-Atakor du Hoggar Central (Sahara). Evolution d'un complexe granulitique précambrien. Thèse d'état, Univ.Paris VII, 324 p.
- Wyns R., Baltassat J.M., Lachassagne P., Legchenko A., Vairon J., Mathieu F. (2004).** Application of proton magnetic resonance sounding to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany France). *Bull. Soc.géol. fr.* N°1. pp. 21-34.
- Yao K T. (2009).** Hydrodynamisme dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du Sud-Ouest de la Cote d'Ivoire : cas du département de Soubré : apports de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie. Thèse de doctorat, Univ de COCODAY-Abidjan, 262 p.
- Zairi R (2008).** Etude géochimique et hydrodynamique de la nappe libre du Bassin du Lac Tchad dans les régions de Diffa (Niger oriental) et du Bornou (nord-est du Nigeria). Thèse de doctorat, Univ de MONTPELLIER II, 179 p.

Annexe

Liste des crues de l'Oued Tamanrasset à Tamanrasset (J. Dubief, 1953)

Dates des crues	Importance	Observations
A. — Renseignements anciens d'origines diverses de valeur inégale et manquant de continuité.		
1900 —	importante	Aurait atteint le confluent de l'O. Adjelmane (renseignement indigène, cité par le Capitaine NÉGER ; Mission du Transafricain).
1901 — (mai ?)	forte	Forte crue ayant emporté les blés (renseignement indigène).
1902 — mai	crue	Forte crue de l'O. Tit (Lieutenant COTTENEST).
21 octobre	crue ?	Fortes crues des oueds des régions In Amguel, Ideles, Tazerouk, Tin Tarabin (Lieutenant GUILLO-LOHAN).
1905 — 5 août	néant	Crue de l'O. Tit, le 5 août de 17 h. à 21 h.
décembre	importante	Crue de 2 jours à Tamanrasset : crue de l'O. Tin Tarabin.
1906 — février	importante	Crue de 4 jours à Tamanrasset (MOTYLINSKI et BASSET. Grammaire et dictionnaire français-touareg, Alger, 1908).
1907 — 23 août	importante	Crue à Tamanrasset du 23 à 3 h. 45 au 24 à 5 h. (observation de DE FOUCAULD).
1908 — 2 août	importante	Le 2 août à 9 h. du soir, l'oued coule à plein bord sur 50 à 60 m de large avec une vitesse de 1/2 m/sec. Il cesse de couler le 3 à 11 h. (Annexe).
1909 — octobre	néant	Crues des oueds Tarahouahout et Outoul. (VILLATTE. A travers le Sahara. La Géographie, XXIII, n° 3, 15 mars 1911).
10 décembre ...	crue	Crue de l'oued à Tamanrasset le 10 décembre à 21 h., cesse le lendemain à 10 h. (observation de DE FOUCAULD).
1910 —	pas de crue	
1912 — juillet	forte	
1914 — septembre ?	crue	
1915 — septembre	crue ?	Destruction de foggaras (DE FOUCAULD).
1916 — septembre	crue ?	Destruction de foggaras (DE FOUCAULD).
1918 — septembre	crue	Tous les oueds coulent. Le Tarahouahout coule à plein bord pendant 2 jours.
1919 — septembre	importante	Crue pendant 3 ou 4 jours.

Dates des crues	Importance	Observations
1922 — 15 janvier	grosse	Crues de tous les oueds. A Tamanrasset les eaux emportent les maisonnettes et les jardins qui bordent l'oued. Le 16 l'oued déborde et l'eau passe à la vitesse d'un cheval au galop... Le 17, l'oued baisse. (Communication du Capitaine AYMARD, publiée par LASSERRE. Les Territoires du Sud. Aperçu météorologique, Alger, 1929).
avril		Crue de l'O. In Amguel.
1923 —	pas de crue	
1924 — août	crue ?	
1926 — juin	crue	Détruit les foggaras.
Renseignements tirés des « Bulletins mensuels météorologiques » et de nos observations personnelles.		
1927 — 28 janvier	violente	
19/20 avril	crue	
7 au 9 août	crue	Pendant 3 jours à Tamanrasset.
1928 — 8/9 janvier	grosse	Crue pendant 4 jours à Tamanrasset.
14 août	moyenne	Crue pendant 1 jour et 1 nuit à Tamanrasset.
1929 — mai	néant	Crue de l'O. Outoul.
juin	quelques crues	
juillet	crue	Crues des oueds Tit et In Amguel.
27 août	légère	Crue pendant 4 heures à Tamanrasset.
1/2 octobre	assez importante	Cause quelques dégâts à Tamanrasset.
1930 — 25 mai	crue	
31 juillet au 1 ^{er} août	crue	
1931 —	néant	
1932 — les 5, 6 et 7 juil.	crue	
les 4, 5, 14, 18 19 et 27 août.	fortes crues	L'oued coule sur toute sa largeur à Tamanrasset (1).

(1) Le 4 août, faible crue débutant à 15 h.

Le 5, une forte crue, arrive tout d'un bloc à Tamanrasset sur 30 m de large. Elle s'étend rapidement sur une largeur de 50 m. Sa hauteur est faible (30 cms) et sa vitesse de 2 m-seconde. L'écoulement diminue à partir de 14 h., il cesse dans la nuit.

Le 14, la crue arrive à Tamanrasset à 19 h. 30, elle cesse au matin du 15.

Dans les nuits du 18 au 19, du 19 au 20 et du 27 au 28, les écoulements sont faibles.

Dates des crues	Importance	Observations
1933 — du 16 au 19 janv.	forte	L'oued coule sur toute sa largeur à Tamanrasset (1).
du 22 au 25 mai.	forte	L'oued coule sur toute sa largeur. Crues exceptionnelles des oueds Tit, In Amguel et In Iker (2).
5 et 6 juin	faible	Début à 21 h., cesse le 6 (3).
26 juillet	néant	Crue de l'O. Tit.
4 septembre	néant	Crue de l'O. Tit.
6 et 7 septembre.	faible	
1934 —	néant	
1935 — 24 et 25 mai	néant	L'O. Tamanrasset coule en amont.
16 juillet	faible	La crue s'arrête à quelques kms au Nord du poste.
24 et 25 septemb.	faible	Faible crue en amont du poste.
1936 — 12 juillet	légère	
1937 — septembre	néant	Forte crue de l'O. In Amguel.
octobre	néant	Crue de l'O. In Amguel.
1938 —	néant	septembre. Crue de l'O. Outoul.
1939 — 6 et 25 août	crue	N'a pas dépassé Amselka.
1940 — 2 au 5 septembre et du 17 au 18 septembre .	fortes	L'oued coule à 6 reprises. Il atteint son confluent avec l'O. Amded au Nord de Tin Missao. L'O. Amded arrive à quelques kms de son confluent. Crue de l'O. In Tamerouall.
1941 — juin	faible	
20 au 22 septemb.	moyennes	L'oued coule à 5 reprises sur la moitié de sa largeur. Crue de l'O. Takalous.

(1) La crue de l'oued arrive à 13 h. à Tamanrasset. Elle baisse rapidement et le 17 à 7 h. l'oued ne coule plus que sur un dixième de la largeur de son lit. L'écoulement se renforce légèrement le 18 pour cesser dans la matinée du 19 à hauteur de Tamanrasset. Dans les gorges en aval de ce centre l'écoulement atteint 4 m de hauteur sur 10 de largeur au moment du maximum. Il se poursuit en surface jusqu'à la fin du mois.

(2) Le 22 une première crue de l'oued, d'origine locale, s'observe de 13 à 15 h. Elle est suivie à 20 h. d'une très forte crue venant de l'Atakôr.

Le 23 à 10 h. l'oued ne coule plus que faiblement. L'écoulement est un peu plus abondant le 24, il cesse de couler devant Tamanrasset le 25 mai. Il se maintient par contre pendant plusieurs jours dans les gorges en aval de Tamanrasset, ainsi que dans celles qui sont à 10 kms en amont de ce centre.

(3) La crue d'origine locale débute à 21 h., tandis que celle provenant de la haute montagne n'arrive que dans la nuit. Elle se poursuit pendant toute la journée du 6.

Dates des crues	Importance	Observations
1942 — octobre	néant	Crue du cours supérieur de l'O. Tamarrasset. Crues des oueds Outoul et Tin Tarabin.
décembre	néant	Crue de l'O. Outoul.
1943 — juillet	faible	Crue des oueds Outoul, Tit, Silet.
août	assez forte	
septembre	néant	
1944 — juillet	crue	Crues de l'O. Tamarrasset pendant 48 h. et de l'O. Amded.
17 et 18 décemb.	crue	
1945 — 20 et 21 octobre.	faible	En août crue de l'O. In Dallag.
1946 — février	néant	Crue dans la partie supérieure de l'oued seulement.
juillet, du 30 à 21 h. au 31 à 2 h.	moyenne	Crues des oueds Amded et Tarahouhout. De 11 h. 30 à 16 h.
1 ^{er} août	violente	Du 1 ^{er} à 19 h. au 6 à 9 h. et du 8 à 17 h. au 9 à 12 h.
29 au 30 septemb.	faible	
1 ^{er} au 8 octobre.	faibles	
1947 — 30 juin	crue	Crues de l'O. Zazir jusqu'au Tassili Ouan Ahaggar et crue de l'O. Amded.
août		
1948 — 12 avril	faible ?	Pendant 9 h. Crues des oueds de la face N et NW de l'Atakôr en avril et août.
15 août	crue	
1949 — avril	faible	
1950 — les 15, 16, 17, 19 et 24 août	crues	Crues de 4 à 5 h. Forte le 13 (17 h.) ; atteint l'erg de Tin Missao. L'O. Amded atteint son confluent avec le Tamarrasset.
les 10, 11, 13 sept.	forte	
1951 — septembre	fortes	L'oued coule à nouveau fortement, à diverses reprises, totalisant 7 jours de crue.

Tableau. III.1 : Inventaire des points d'eau du secteur autour du BIF1 (02 décembre 2015).

N°	Point d'eau	x	y	Z	NS
1	F13A	765931,89	2531174,97	1454	11,1
2	F	765787,25	2530803,06	1437	9,74
3	F13B	765769,94	2530651,93	1456	9,4
4	F14A	765558,19	2530365,02	1438	8,46
5	F11	765845,5	2527162,7	1418	14
6	F10	765856,43	2527027,45	1423	13,88
7	P102	765686,88	2527421,55	1424	16,28
8	P103	765561,98	2527385,5	1432	21,12
9	P104	765555,63	2527422,33	1429	19,6
10	F	765606,5	2526961,51	1425	17,9
11	F32	765635,37	2526617,27	1423	16
12	P105	765526,43	2526483,62	1427	13,3
13	F9	765568,53	2526360,62	1415	17,7
14	P106	765316,4	2525931,42	1419	23
15	P107	765482,59	2526054,38	1422	22,52
16	P108	764548,33	2524652,92	1415	23,37
17	P109	764464,58	2524709,94	1421	25,4
18	P110	764928,33	2524299,42	1412	14,76
19	P111	764572,63	2524077,75	1413	16,38
20	F12	764382,51	2524015,95	1410	14,42
21	P112	764328,96	2524141,22	1410	13,9
22	P113	764470,64	2524199,09	1409	13,9
23	P114	764540,24	2524298,8	1407	15,88
24	P115	764265,4	2524349,41	1414	18,4
25	P116	764126,85	2524276,21	1405	13,6
26	P117	763994,59	2524169,25	1407	12,8
27	P118	763959,23	2524233,27	1405	14,1
28	P119	764231,35	2523847,1	1405	14,38
29	P120	763852,32	2524145,23	1395	19,9
30	P121	763848,53	2523871,22	1403	19,6
31	P122	763855,57	2523794,39	1401	14,4
32	P123	763680,35	2523695,92	1393	11
33	P124	763692,8	2523308,31	1403	11,9
34	P125	763629,64	2523165,62	1401	11,2
35	P126	763524,85	2523283,84	1400	20
36	P127	763569,53	2523340,02	1399	11,43
37	P128	763551,83	2523373,57	1407	14,65
38	P129	763288,34	2523427,48	1399	26,2
39	P130	763147,27	2523498,91	1403	25,2
40	P131	763140,98	2523203,31	1404	14,7
41	P132	763001,13	2523203,96	1399	19,25
42	P133	763135,63	2522689,19	1397	11,7
43	P134	763104,67	2522664,03	1396	12,15

Tableau. III.2 : *Inventaire des points d'eau du secteur autour du BIF2 (21-22 décembre 2015).*

N°	Name	X	Y	Z	NS
1	P207	5,35419	22,8821	1316	2,25
2	P203	5,35814	22,8856	1308	2,4
3	P204	5,3575	22,8848	1300	2,4
4	P205	5,35692	22,8843	1316	2,25
5	P208	5,354	22,8809	1316	5,8
6	P206	5,35606	22,8829	1313	1,7
7	P210	5,35023	22,8789	1306	5,1
8	P209	5,3505	22,8788	1307	3,8
9	F	5,35119	22,8796	1308	4,3
10	P202	5,359381	22,887578	1316	5,45
11	P201	5,360695	22,887821	1309	1,2
12	P221	5,34433	22,8506	1303	5,7
13	P220	5,3445	22,8521	1289	3,8
14	P218	5,34547	22,8552	1300	5,45
15	P212	5,34233	22,8638	1309	14,47
16	P213	5,3425	22,8628	1302	12,5
17	P214	5,34233	22,8625	1306	11,05
18	P215	5,34236	22,8613	1297	10,2
19	P216	5,34261	22,8589	1293	7,7
20	P217	5,34331	22,8579	1294	7,5
21	P219	5,34392	22,8541	1289	5,05
22	P222	5,34269	22,8513	1294	4,2
23	P223	5,34206	22,8493	1295	4,2
24	P226	5,34019	22,8459	1286	2,45
25	P228	5,33861	22,8431	1285	14,4
26	P227	5,34094	22,8443	1289	6,72
27	P225	5,342	22,8462	1288	3,45
28	P224	5,34269	22,8479	1296	5,1

Tableau. III.3 : *Inventaire des points d'eau du secteur autour du BIF3 (novembre, 2004).*

N°	Point d'eau	X	Y	NP
1	P318	5,26499	22,8403	1209,53
2	P317	5,26374	22,8385	1208,57
3	P316	5,26321	22,8369	1207,71
4	P315	5,26323	22,8346	1206,24
5	P314	5,26204	22,83	1204,48
6	P313	5,26099	22,8286	1203,29
7	P312	5,25972	22,826	1202,75
8	P311	5,25872	22,8231	1202,4
9	P310	5,25847	22,8226	1202,94
10	P309	5,25681	22,819	1202,5
11	P308	5,2564	22,8196	1202,24
12	P307	5,25487	22,8205	1201,87
13	P306	5,25441	22,8204	1201,63
14	P305	5,25295	22,8202	1200,26
15	P304	5,25113	22,8208	1200,1
16	P303	5,24947	22,8207	1200,1
17	P302	5,246936	22,820921	1200,16
18	P301	5,245901	22,820841	1199,96

Tableau. III.4 : *Inventaire des points d'eau du secteur autour du BIF3 (09 décembre, 2015).*

N°	Point d'eau	X	Y	NP
1	P301	5,247556	22,820639	1201
2	P302	5,249472	22,820667	1199,1
3	P303	5,251139	22,820806	1197,8
4	P304	5,252972	22,820222	1204,8
5	P305	5,253389	22,820278	1206,22
6	P306	5,254472	22,820444	1208
7	P308	5,257611	22,820944	1215,6
8	P307	5,256806	22,818972	1213,05
9	P309	5,258472	22,822639	1209,2
10	F	5,259972	22,826889	1213,65
11	P310	5,260972	22,8285	1213,85
12	P311	5,262	22,829944	1224,07
13	P312	5,262722	22,832028	1216,35
14	P313	5,263222	22,834583	1213,6
15	P314	5,262806	22,837361	1218
16	P315	5,26375	22,8385	1220
17	P316	5,263167	22,8405	1215,55
18	P300	5,244944	22,821528	1199

Tableau. III.5 : *Inventaire des points d'eau du secteur 4 (DRE, février 1982).*

N°	Point d'eau	z	ns
1	P407	1001,5	14,305
2	P406	984	14,38
3	F1	965,3	3,455
4	F0	980	7,855
5	P402	971	6,17
6	P405	980	7,675
7	P404	972	6,37
8	P403	970	5,51
9	P401	965	3,35
10	F7	1003	14,383
11	F6	987,767	11,695
12	F5	978,1	7,13
13	F4	975,39	6,88

Tableau. III.7 : *Inventaire des points d'eau du secteur autour du BIF4 (26 novembre, 2015).*

N°	Point d'eau	X	Y	NP
1	P403	718286,92	2621228,22	976
2	P402	718122,76	2621213,45	964,84
3	P401	717889,11	2620729,9	968,8
4	P404	718335,89	2621364,35	970
5	P405	718496,89	2621400,62	968
6	P406	718536,42	2621410,45	962,5
7	P407	719024,66	2621734,75	967,8
8	P408	719076,46	2621870,93	967,8
9	P409	719013,8	2621891,53	968,6
10	P411	719447,21	2622091,93	966,5
11	P410	719381,16	2621961,69	971,5
12	P412	719579,21	2622170,86	959,06
13	P413	719687,01	2622538,68	969
14	P414	719872	2622673,8	968,06
15	P415	719324,03	2622930,16	970,22
16	P416	719574,92	2623017,04	970,8
17	P417	719986,19	2623180,2	974,57
18	P418	720512,76	2623400,52	973
19	P419	720620,37	2623405,23	979,1
20	P420	720797,98	2623278,68	979,7

Tableau. IV.9 : Indices de saturation.

N°	Point d'eau	Calcite	Dolomite	Anhydrite	Aragonite	Gypse
1	P113	-0,61	-1,1	-0,78	-0,76	-0,57
2	P112	-1	-1,75	-2,04	-1,14	-1,82
3	P111	-0,4	-0,48	-1,46	-0,54	-1,24
4	P110	-0,98	-1,59	-1,57	-1,12	-1,36
5	P109	-1,38	-2,56	-2,74	-1,52	-2,52
6	P108	-0,98	-1,73	-1,66	-1,12	-1,45
7	P107	-0,37	-0,9	-2,9	-0,52	-2,68
8	P106	-0,95	-1,49	-2,92	-1,1	-2,7
9	F12	-1,44	-2,42	-2,72	-1,59	-2,51
10	P105	0,32	0,18	-4,28	0,17	-4,06
11	P104	-0,15	-0,09	-2,39	-0,29	-2,18
12	P103	-0,81	-2,4	-3,35	-0,95	-3,14
13	P102	-0,19	-0,91	-2,83	-0,33	-2,62
14	P101	-0,65	-0,8	-3,21	-0,79	-2,99
15	P205	-0,88	-1,43	-2,25	-1,02	-2,04
16	P206	-0,83	-2,22	-2,76	-0,98	-2,54
17	P207	-0,62	-1,27	-1,94	-0,76	-1,72
18	P208	-1,03	-1,67	-2,06	-1,18	-1,84
19	P209	-0,78	-1,26	-2,54	-0,92	-2,32
20	P202	-0,99	-2,21	-2,38	-1,13	-2,16
21	P201	-0,9	-1,94	-2,37	-1,05	-2,16
22	P203	-1,19	-2,03	-2,78	-1,33	-2,56
23	P204	-1	-1,85	-3,76	-1,14	-3,54
24	P308	-1,03	-2,21	-2,28	-1,17	-2,07
25	P307	-1,77	-3,22	-2,97	-1,91	-2,75
26	P306	-1,09	-2,99	-2,48	-1,23	-2,26
27	P305	-1,01	-2,09	-2,55	-1,15	-2,33
28	P304	-1,17	-2,85	-2,66	-1,31	-2,44
29	P303	-0,66	-1,6	-2,54	-0,81	-2,32
30	P302	-1,02	-1,86	-2,61	-1,17	-2,38
31	P301	-0,06	0,08	-2,32	-0,2	-2,1
32	P404	-0,13	-0,34	-1,91	-0,27	-1,7
33	P401	-0,09	0,12	-2,44	-0,23	-2,22
34	P402	-0,36	-1,28	-2,38	-0,51	-2,16
35	P403	-0,32	-0,25	-1,97	-0,47	-1,75
36	P405	-0,2	-0,12	-2,33	-0,35	-2,11
37	P406	-0,55	-1,02	-2,75	-0,7	-2,54
38	P407	-0,39	-0,62	-2,34	-0,53	-2,12
39	P408	-0,43	-0,86	-2,41	-0,58	-2,2
40	P409	-0,65	-1,15	-2,33	-0,79	-2,11
41	P410	-0,69	-0,76	-2,82	-0,83	-2,6
42	P411	-0,41	-0,54	-2,41	-0,55	-2,2
43	P412	-1,09	-2,01	-3,06	-1,23	-2,85

Figure 43 : Coupes des sondages mécaniques réalisés sur l'aquifère de l'Oued Outoul (BIF2).

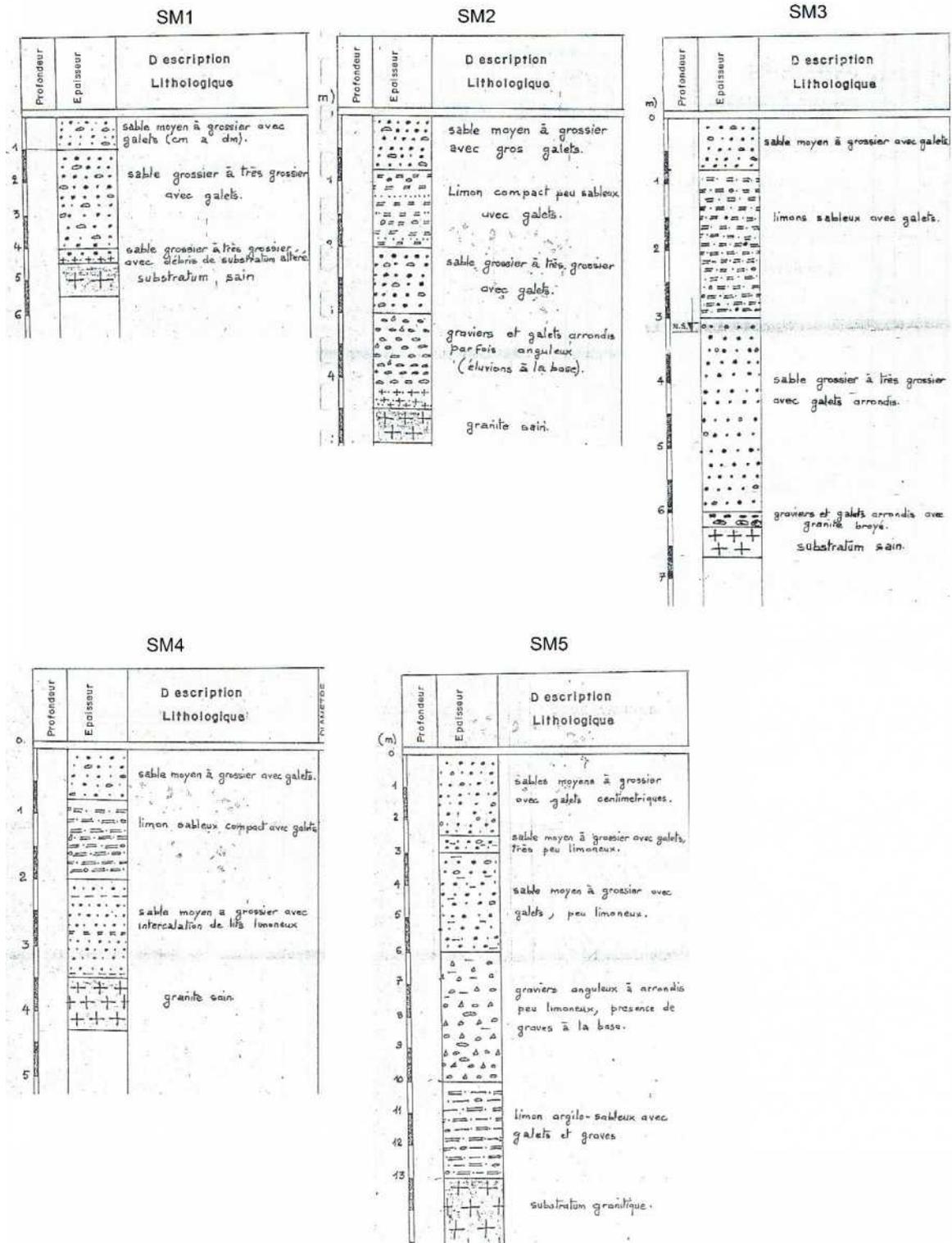


Figure 56. Coupes des sondages mécaniques SM6 et SM9 (Site BIF3_Ihelfene)

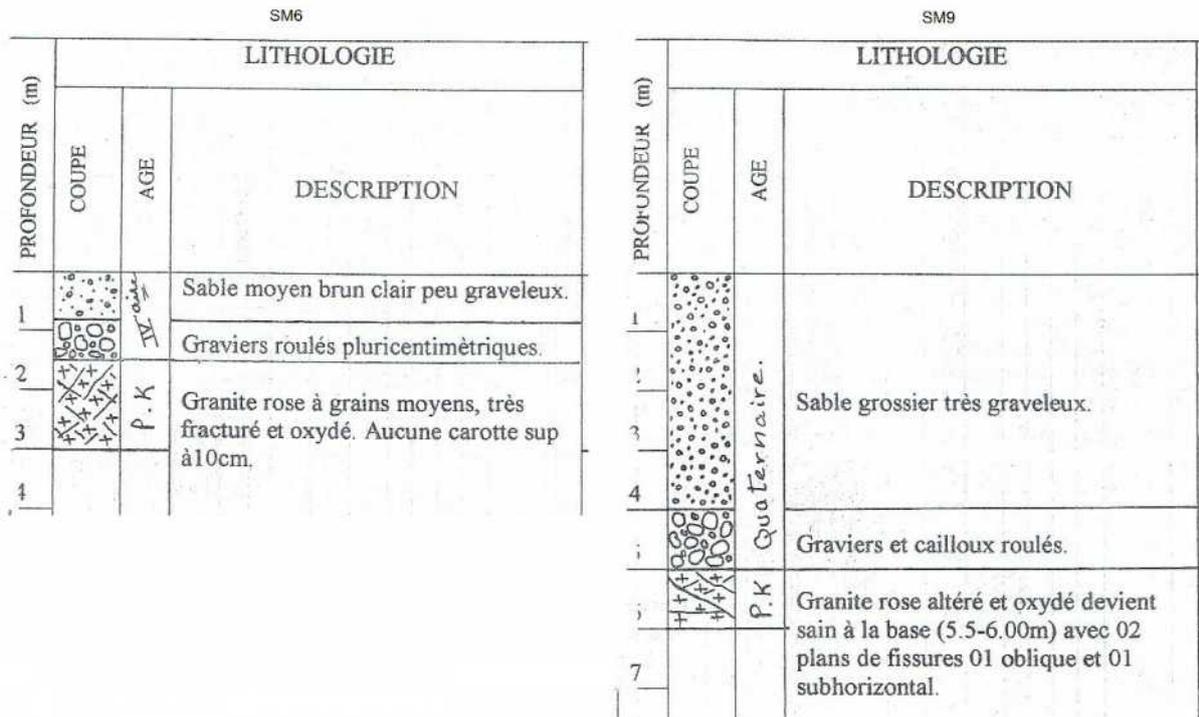


Figure 84. Variation de la surface piézométrique de la nappe d'inféro-flux de l'oued In Amguel, avant et après la mise en place du barrage (piézométries de février 1982 et de novembre 2015).

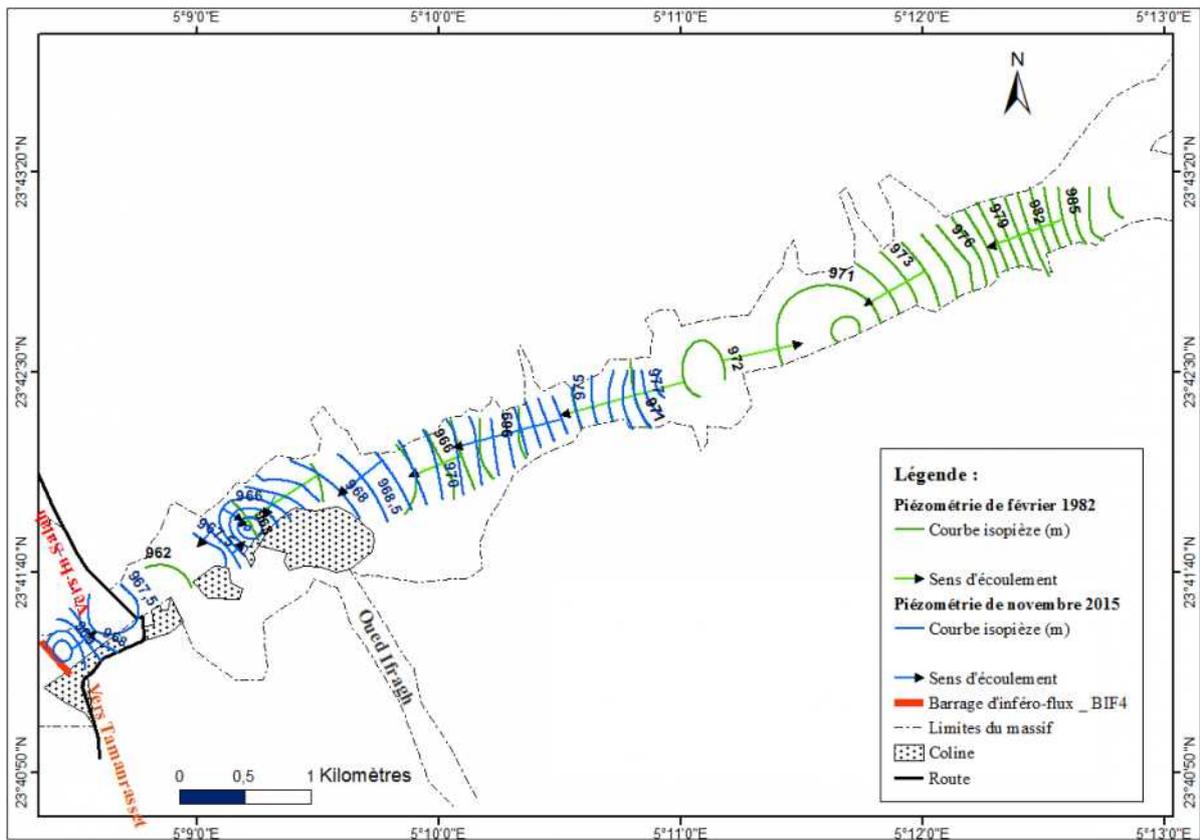


Figure 86. Corrélation de la carte en courbes isopièzes - piézométrie d'avril 2015- avec celle en courbes isobathes de l'aquifère alluvial de l'Oued In Amguel.

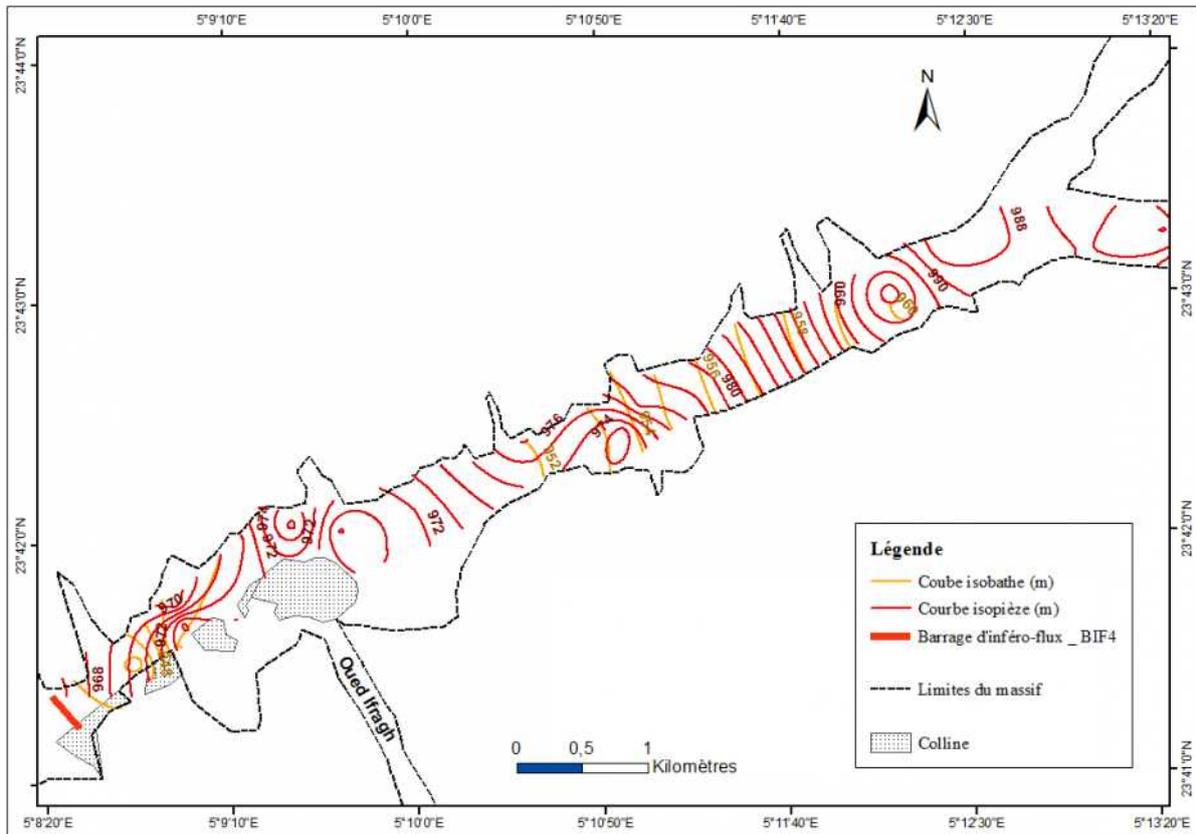


Photo n° 1 : Vue de barrage d'inféro-flux de l'Oued Outoul (site BIF2)



Photo n°2 : *Image satellite du secteur autour BIF3 (Oued Outoul_ localité d'Ihelfene)*



Photo n° 3 : *Image satellite du secteur autour BIF4 (Oued In Amguel)*