

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département de l'Hydraulique

Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau (LRS-EAU)

Thèse de doctorat en Hydraulique

L'eau dans les oasis d'Adrar : désorganisation du système hydraulique millénaire (La Foggara)

BOUTADARA Youcef

Sous la direction de M. REMINI Boualem Professeur

et Mme BENMAMAR Saadia Professeur

Présentée et soutenue publiquement le 03/02/2021

Composition du jury :

Pr. ARRAR Jazia	Ecole Nationale Polytechnique	Président
Pr. REMINI Boualem	Université Saad Dahlab Blida	Directeur de thèse
Pr. BENMAMAR Saadia	Ecole Nationale Polytechnique	Co-Directrice de thèse
Pr. CHERGUI Abdelmalek	Ecole Nationale Polytechnique	Examineur
MCA. AMMARI Abdelhadi	Ecole Nationale supérieur d'Hydraulique	Examineur
MCA. BERREKSI Ali	Université de Bejaia	Examineur

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique d'Alger



Département de l'Hydraulique

Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau (LRS-EAU)

Thèse de doctorat en Hydraulique

L'eau dans les oasis d'Adrar : désorganisation du système hydraulique millénaire (La Foggara)

BOUTADARA Youcef

Sous la direction de M. REMINI Boualem Professeur

et Mme BENMAMAR Saadia Professeur

Présentée et soutenue publiquement le 03/02/2021

Composition du jury :

Pr. ARRAR Jazia	Ecole Nationale Polytechnique	Président
Pr. REMINI Boualem	Université Saad Dahlab Blida	Directeur de thèse
Pr. BENMAMAR Saadia	Ecole Nationale Polytechnique	Co-Directrice de thèse
Pr. CHERGUI Abdelmalek	Ecole Nationale Polytechnique	Examineur
MCA. AMMARI Abdelhadi	Ecole Nationale supérieur d'Hydraulique	Examineur
MCA. BERREKSI Ali	Université de Bejaia	Examineur

Dédicaces

A toute ma famille,

Aux martyrs, experts et propriétaires de la foggara,

A tous mes amis.

Je dédie ce modeste travail.

Remerciements

Mon Directeur de thèse :
Monsieur REMINI Boualem
Professeur en Hydraulique

Ce travail a été une occasion pour moi d'apprécier vos qualités humaines et professionnelles.

«Qu'il me soit permis de vous remercier et de vous exprimer mon estime et mon profond respect».

A ma co-directrice de thèse:
Madame BENMAMAR Saadia
Professeur en hydraulique

«J'ai été touché par la bienveillance et la sympathie avec laquelle vous m'avez accueilli.

Veillez accepter ma profonde gratitude pour l'aide considérable que vous m'avez apporté».

Aux membres du jury de ma thèse
« Permettez-moi de vous témoigner mon respect et mon estime les plus sincères ».

A mes collègues :

L'équipe de l'Observatoire de la Foggara

L'équipe de la DRE d'Adrar

L'équipe de la DSA d'Adrar

L'équipe de l'ANRH d'Adrar

L'équipe des volontaires et experts :

SMAILI Abdellah, et AICHAOUI Salem

Je dis tout simplement merci

ملخص.

نتطرق من خلال هذه الاطروحة الى دراسة الموارد المائية بمنطقة الحدود الجنوبية الغربية لحوض المتداخل القاري، أين تقع واحات صحراوية تعتمد في سقيها على نظام تقليدي لايزال قائم لحد الساعة يعرف بالفقارة أو إيفلي بالأمازيغية.

إن ظهور الابار العميقة منذ ثمانينات القرن الماضي كان له أثر سلبي على هذا النظام التقليدي مما أدى إلى تدهور بيئي غير مسبوق أصبح يرهن مصير جزء مهم من الواحات وهذا بسبب نضوب ما يعادل 1468 فقارة وهو عدد لا يستهان به من مجموع 2283. هذه الوضعية تستلزم إجراء أبحاث علمية معمقة من أجل الحفاظ على معلم الري للمنطقة والذي لازال يمثل مصدر إقتصادي وبيئي مهم لسكان الواحات.

إعتادا على عدد مهم من المعطيات والتحقيقات الميدانية التي أجريناها حول مجمل الفقرات والآبار المستغلة، قمنا بما يلي :

- تحيين السياق العام للمنطقة.

- تطوير وتحليل خرائط رقمية، حيث إستنتجنا خريطة إنخفاض مستوى المياه الجوفية في الفترة الممتدة بين 2007 و 2016 وهو ما يتناسب مع الزيادة في نضوب عديد الفقرات، ومن خلال دراسة الحالة إتضح جليا مدى حساسية و إضطراب الفقارة تجاه أي إنخفاض حاصل في حقل استغلالها وهو ما يستوجب إعادة النظر في إستغلال الموارد المائية تزامنا مع التطورات الحالية.

الكلمات الدالة : الحوض المتداخل القاري، واحات، الفقارة، إيفلي، بودة.

Abstract.

The aim of this thesis is to study water resources in the western limits of the Intercalary Continental (CI) aquifer, on which are located Saharan oases fed by a still operational traditional water catchment and irrigation system named foggara (iffli in Zenet). The introduction of boreholes since the 1980s had negative impacts on the traditional irrigation system, and consequently on the oasis ecosystem, by drying up of 1468 foggaras out of a total of 2283 foggaras in the study area. This situation requires doing a deep scientific research aimed at preserving the foggaras, which still have an important economical and ecological resource to the oasis people. We updated the general context of the study area and the CI aquifer. We also produced and analyzed digital maps according to the problems encountered in the field. In this context, we have drawn up a map of the water table drawdown. Finally, we showed the case of the oases of Bouda, we showed through this example the impact of boreholes, often installed without prior study, on foggaras. Based on the hydro geological and piezometric maps made for the years of 2007 and 2016, we realized the drawdown map which showed an explicit causality with the foggaras drying phenomenon. In the case of Bouda foggaras, we made explicit the interference between boreholes and foggaras and the sensitivity of the latter to the least drawdown in their catchment area. This showed the interest of reviewing the current aquifer management plan in the light of recent transformations in the area.

Keywords: Intercalary Continental, Oases, Foggara, Iffli, Bouda.

Résumé.

Cette thèse a pour objectif l'étude des ressources en eau sur les limites occidentales de la nappe du Continental Intercalaire (CI), sur lesquelles se situent des oasis sahariennes alimentées en eau par un système de captage et d'irrigation traditionnel encore en fonctionnement nommé *foggara* (Ifflien Zénète). L'introduction depuis les années 80 des forages a eu des impacts négatifs sur le système d'irrigation traditionnel, et par conséquent sur l'écosystème oasien avec le tarissement de 1468 foggaras sur un total de 2283 foggaras dans la zone d'étude. Cette situation nécessite l'élaboration des recherches scientifiques pour la préservation des foggaras de la zone d'étude qui représentent encore une ressource économique et écologique intéressante pour les oasiens. On a actualisé le contexte général de la zone d'étude et la nappe du CI. On a également produit et analysé des cartes numériques selon les problèmes rencontrés sur le terrain. Dans ce cadre, on a élaboré une carte de rabattement de la nappe. Enfin, on a montré le cas des oasis de Bouda, on a montré à travers cet exemple l'impact des forages, installés souvent sans étude préalable, sur les foggaras. En se basant les cartes hydrogéologiques et piézométriques réalisées pour les années 2007 et 2016, on a pu réaliser la carte de rabattement qui montre une causalité explicite avec le phénomène de tarissement des foggaras. Pour le cas des foggaras de Bouda, on a rendu explicite l'interférence entre les forages et les foggaras et la sensibilité de ces dernières au moindre rabattement dans leur zone de captage. Cela montre l'intérêt de revoir les formes de gestion actuelles de la nappe à la lumière des transformations récentes dans la zone.

Mots clés: Continental Intercalaire, Oasis, Foggara, Iffli, Bouda.

TABLE DE MATIERES.

LISTE DES TABLEAUX.

LISTE DES FIGURES.

INTRODUCTION GENERALE	15
CHAPITRE 1 : CONTEXTE GENERAL	19
1.1. Introduction	19
1.2. Contexte historique	19
1.3. Contexte socio-économique	22
1.4. Contextes géographique et administratif.....	24
1.5. Contextes géomorphologique et topographique.....	27
1.5.1. La géomorphologie générale de la zone d'étude	27
1.5.2 La topographie générale	28
1.6. Contexte climatologique	30
1.6.1. La Température.....	32
1.6.2. La Précipitation	32
1.6.3. Le Vent	32
1.6.4. L'humidité atmosphérique.....	32
1.6.5. L'évaporation.....	32
1.7. Conclusion	34
CHAPITRE 2: CONTEXTE HYDROLOGIQUE.....	36
2.1. Introduction	36
2.2. Bassin de la Saoura	36
2.2.1. Versant méridional de l'Atlas saharien	37
2.2.1.1. Oued Saoura	37
2.2.1.2. Oued Béchar	38
2.2.1.3. Oued Namous	38
2.2.1.4. Oued Rharbi.....	39
2.2.1.5. Oued Seggeur	39
2.2.1.6. Oued Zergoun.....	39
2.2.1.7. Oueds Mehaïguène et Louha	40
2.2.2. Versant occidental du Tademaït	40
2.2.2.1. Oued Mzaourou - El Berreg	41
2.2.2.2. Oued du versant M'eguiden - Gourara	41
2.2.2.3. Oued Tilia.....	42
2.2.2.4. Bassins fermés des Daiets du Tademaït	42

2.3. Bassin du Melrhir.....	42
2.3.1. Oued du Djedi.....	43
2.3.2. Oued Biskra	43
2.3.3. Oued Biraz.....	44
2.3.4. Oued El Arab	44
2.3.5. Oued Zegrir.....	44
2.3.6. Oued Nsa	44
2.3.7. Oued Mzab	44
2.3.8. Oued Metlili.....	44
2.3.9. Oued Ittel	44
2.3.10. Oued Retem	45
2.3.11. Oued El Attar.....	45
2.3.12. Oued de la Chebka méridionale.....	45
2.3.13. Oued Mya	45
2.3.14. Oued In Sokki	45
2.3.15. Oueds Algérien du Tinrhert.....	45
2.3.16. Oueds Hamada Al-Hamra	46
2.3.17. Oueds de Matmata	47
2.3.18. Oueds septentrional des chotts Sud-tunisiens.....	47
2.4. Répartition et apports des pluies dans le territoire du Sahara septentrional	47
2.5. Régime des pluies sur le territoire du SASS	48
2.5.1. Régime des pluies sur le territoire sud-tunisiens	48
2.5.2. Régime des pluies sur le territoire Algérien	49
2.5.3. Régime des pluies sur le territoire Libyen.....	51
2.6. Précipitation, ruissellement et évapotranspiration dans le territoire du CI	51
2.7. Conclusion	53
CHAPITRE 3: CONTEXTES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE.....	55
3.1. Introduction.....	55
3.2. Les affleurements de la formation aquifère dans le Sahara septentrional.....	55
3.2.1. Atlas saharien Grand Erg Occidental (coupe A-A' et B-B').....	57
3.2.2. Tinrhert - Sud Libye (La coupe C-C').....	57
3.2.3. Dahar (coupe D-D').....	57
3.2.4. Jabal Nefusa (coupe E-E').....	58
3.2.5. Jabal Hassawna (coupe F-F')	59
3.3. Les affleurements utiles dans le système aquifère du Sahara septentrional.....	60
3.4. La géologie de la zone d'étude	60

3.4.1. Stratigraphie de la région d'étude.....	62
3.4.1.1. Le Quaternaire	62
3.4.1.2. Le Complexe Terminal.....	62
3.4.1.3. Le Turonien	62
3.4.1.4. Le Cénomaniens.....	62
3.4.1.5. Le Continental Intercalaire	62
3.4.1.6. Le Jurassique	63
3.4.1.7. Le Trias.....	63
3.4.1.8. Le Paléozoïque	63
3.4.2. Les coupes géologiques	64
3.4.3. Profils géologiques	67
3.5. L'hydrogéologie de la zone d'étude	60
3.5.1. La nappe du Complexe Terminal	70
3.5.2. La nappe du Continental Intercalaire.....	71
3.5.2.1. L'alimentation	71
3.5.2.2. L'écoulement.....	72
3.5.2.3. Les exutoires naturels	73
3.5.2.4. Les exutoires artificiels.....	73
3.5.2.5. La piézométrie	73
3.5.2.6. Conditions aux limites	74
3.5.2.7. La Transmissivité	75
3.5.2.8. Le Coefficient d'emménagement	75
3.5.3. Estimation de la recharge de la nappe du C.I	75
3.5.4. La géométrie du Continental Intercalaire	76
3.5.4.1. Le toit du Continental Intercalaire.....	76
3.5.4.2. Le mur	77
3.6. Conclusion.....	77
CHAPITRE 4 : CONCEPTION D'UNE BASE DE DONNEES SUR LES RESSOURCES EN	
EAU SOUTERRAINES.....	80
4.1. Introduction.....	83
4.2. La géométrie du continental intercalaire dans la zone d'étude.....	81
4.2.1. Carte du toit du substratum.....	81
4.2.2. Carte de l'épaisseur de la nappe	82
4.2.3. Carte de la profondeur de la nappe.....	82
4.3. Les données des foggaras.....	83

4.4.	Les données piézométriques.....	85
4.5.	Les données hydrodynamiques	87
4.5.1.	La Transmissivité	88
4.5.2.	Le coefficient d’emménagement.....	90
4.5.3.	Le débit spécifique.....	91
4.6.	Données des prélèvements d’eau souterraine	93
4.6.1.	Les prélèvements dans les foggaras.....	93
4.6.2.	Les prélèvements agricoles.....	94
4.6.3.	Les prélèvements d’AEP	96
4.6.4.	Les prélèvements industriels	97
4.7.	Les données recueillies sur terrain	98
4.8.	Conclusion	101
CHAPITRE 5: L’EVOLUTION DE LA PIEZOMETRIE DANS LA ZONE D’ETUDE		
	103
5.1.	Introduction.....	103
5.2.	Analyse exploratoire des données piézométriques	103
5.3.	Traitement des données piézométriques	104
5.4.	Méthode de réalisation des cartes piézométriques 2007 et 2016	104
5.5.	Cartes piézométriques 2007 et 2016	109
5.6.	Le rabattement dans la zone d’étude entre 2007 et 2016	111
5.7.	Conclusion	112
CHAPITRE 6: L’INFLUENCE DE L’EVOLUTION DES NIVEAUX DE LA NAPPE SUR LES FOGGARAS - CAS DES OASIS DE BOUDA.....		115
6.1.	Introduction.....	115
6.2.	Localisation et situation des oasis de Bouda.....	116
6.3.	L’état quantitatif de la nappe.....	116
6.3.1.	Rabattements des essais de pompage	117
6.3.2.	Profondeur et l’évolution des niveaux de la nappe.....	117
6.4.	L’impact de l’évolution du niveau de la nappe sur les foggaras de Bouda.....	119
6.4.1.	Le rabattement de niveau de la nappe 2007 - 2016.....	119
6.4.2.	La remontée de niveau de la nappe 2016 – 2018	121
6.5.	L’influence du niveau de la nappe sur les foggaras de Bouda.....	126
6.6.	Conclusion	130
CONCLUSION GENERALE.....		131
BIBLIOGRAPHIE.....		134

LISTE DES TABLEAUX.

Tableau 1-1: Classification de l'aridité	31
Tableau 1-2 : Données climatiques Adrar	33
Tableau 2-1: Pluie moyenne mensuelle à la station de Matmata (1902-1977)	48
Tableau 2-2 : Caractéristiques des pluies journalières dans le Sahara algérien	50
Tableau 2-3: Pluviométrie à Biskra	50
Tableau 2-4: Pluviométrie moyenne mensuelle en Libye	51
Tableau 4-1 : Répartition des foggaras par communes	84
Tableau 4-2 : Débit des foggaras par sous-région en 1960	94
Tableau 4-3 : Débit des foggaras par sous-région en 2011	94
Tableau 4-4 : Prélèvements agricoles en 2014	95
Tableau 4-5 : Prélèvements d'AEP en 2014.	96
Tableau 4-6 : Prélèvements industriels en 2014.	97
Tableau 4-7 : Calendrier des missions effectuées sur terrain	98
Tableau 6-1 : Profondeurs de la nappe entre 2007 et 2018	118
Tableau 6-2 : Débits des foggaras jaugés en 2018 dans l'oasis de Bouda	126
Tableau 6-3 : Caractéristiques de la foggara Hadj Amar Lekbir.	127
Tableau 6-4 : Caractéristiques de la foggara Aït Amrane	128
Tableau 6-5 : Caractéristiques de la foggara Abnkour	129

LISTE DES FIGURES.

Figure 1-1 : Situation géographique de la zone d'étude.....	25
Figure 1-2 : Carte de situation du Gourara.....	26
Figure 1-3: Carte de situation du Touat.....	26
Figure 1-4 : Carte de situation du Tidikelt	27
Figure 1-5 : Carte du relief de la zone d'étude.....	29
Figure 1-6 : Pluviométrie et limites du Sahara	31
Figure 1-7 : Paramètres climatologiques mensuels moyens.....	33
Figure 2-1 : Les oueds du versant méridional de l'Atlas saharien.....	37
Figure 2-2: Versant occidental du Tademaït	41
Figure 2-3: Bassins du Melrhir.....	43
Figure 2-4: Carte des isohyètes dans le domaine du SASS.....	48
Figure 2-5: Carte des isohyètes sur le domaine du SASS	52
Figure 3-1: Carte de situation des coupes géologiques	55
Figure 3-2 : Coupe A-A', NO-SE : Atlas saharien – Grand Erg Occidental.....	56
Figure 3-3 : Coupe B-B', NO-SE : Atlas saharien – Grand Erg Occidental.....	57
Figure 3-4: Coupe C-C', N-S à travers le plateau de Tinrherth	57
Figure 3-5: Coupe D-D', NO-SE : Dahar – Grand Erg Oriental	58
Figure 3-6 : Coupe E-E', N-S: J. Nefusa – Al Hamada Al Hamra	59
Figure 3-7 : Coupe F-F', S-N: Al Hamada Al Hamra – J. Hassawna	59
Figure 3-8 : Affleurements perméables utiles du CI	60
Figure 3-9 : Carte géologique de la zone d'étude.....	61
Figure 3-10: Coupes géologiques réalisées dans la zone d'étude	65
Figure 3-11: Coupe géologique S-E dans la zone d'étude.....	66
Figure 3-12 : Coupe géologique N-S dans la zone d'étude.....	66
Figure 3-13: Coupe géologique O-S dans la zone d'étude.....	66
Figure 3-14: Profils géologiques dans la zone d'étude.....	67
Figure 3-15: Profils géologiques de la zone d'étude	68
Figure 3-16: L'extension des formations du SASS	69
Figure 3-17: La coupe hydrogéologique à travers le Sahara	70
Figure 3-18: Schéma hydrogéologique du Système Aquifère du Sahara Septentrional.....	70
Figure 3-19: Carte hydrogéologique du SASS	72
Figure 3-20 : Carte piézométrique de référence du Continental Intercalaire	74

Figure 3-21: Carte de transmissivité et de coefficient d'emmagasinement	75
Figure 4-1: Carte du toit du substratum.....	81
Figure 4-2: Carte de l'épaisseur de la nappe	82
Figure 4-3: Carte de la profondeur de la nappe	83
Figure 4-4: Répartition spatiale des données des foggaras.....	85
Figure 4-5: Répartition spatiale des points de mesures piézométriques.....	86
Figure 4-6: Carte piézométrique 2007	87
Figure 4-7: Répartition spatiale des données de la transmissivité.....	88
Figure 4-8: Carte de la Transmissivité	89
Figure 4-9 : Répartition spatiale des données des coefficients d'emmagasinement	90
Figure 4-10: Carte de coefficient d'emmagasinement	91
Figure 4-11 : Répartition spatiale des données des débits spécifique	92
Figure 4-12 : Carte de la perméabilité	92
Figure 4-13 : Répartition des prélèvements d'eau pour les divers usages en 2014.....	93
Figure 4-14 : Répartition spatiale des prélèvements agricoles	95
Figure 4-15 : Répartition spatiale des prélèvements d'AEP.....	96
Figure 4-16 : Répartition spatiale des prélèvements industriels.....	97
Figure 5-1 : Carte d'implantation des données piézométriques	104
Figure 5-2 : Histogramme en fréquence des données piézométriques 2007	106
Figure 5-3 : Histogramme en fréquence des données piézométriques 2016	106
Figure 5-4 : Semi-variogramme expérimental 2007	107
Figure 5-5 : Semi-variogramme expérimental 2016	108
Figure 5-6 : Validation croisée des données piézométrique 2007 et 2016.....	109
Figure 5-7 : Carte piézométrique 2007.....	110
Figure 5-8 : Carte piézométrique 2016.....	111
Figure 5-9 : Carte du rabattement entre 2007-2016	112
Figure 6-1 : Carte de situation des foggaras de Bouda.....	116
Figure 6-2 : Carte des rabattements en conditions d'exploitation à Bouda.....	117
Figure 6-3 : Carte des profondeurs de nappe.....	118
Figure 6-4 : Exemple de situation des forages d'AEP par rapport aux foggaras	120
Figure 6-5 : Carte du rabattement 2007-2016	121
Figure 6-6 : Observation de la nappe au piézomètre PZ1	124
Figure 6-7 : Observation de la nappe au piézomètre PZ2	125

Liste des abréviations.

AEP : Alimentation en Eau Potable

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

APCs : Les Assemblées Populaires Communales

ASAL : Agence Spatiale Algérienne

BURGEAP : Bureau d'Études de Géologie Appliquée

CDARS : Commissariat au Développement de l'Agriculture des Régions Sahariennes

CI : Continental Intercalaire

CT : Complexe Terminal

DRE : Direction des Ressources en Eau

DSA : Direction des Services Agricoles

ERESS : Etude des Ressources en Eau Souterraines en Sahara

FNRDA : Fond National de Régulation et du Développement Agricole

INSID : Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage

IWRA : International Water Resources Association

OF : Observatoire de la Foggara

OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture

DGRE : Direction Générale des Ressources en Eau

FAO ClimWat : Food and Agriculture Organization of the United Nations /CLIMWAT est une base de données climatiques à utiliser en combinaison avec le programme informatique CROPWAT. Et permet le calcul des besoins en eau des cultures.

INTRODUCTION GENERALE

L'archipel Touâtien est basé sur les eaux souterraines, ressource uniques dans cette zone constituée par la nappe du continental intercalaire; mais l'extension du tissu urbain et le développement dans les domaines agricoles et industriels depuis les années 80 du siècle écoulé avaient un effet négatif sur la quantité de ces ressources hydriques dans cette zone saharienne.

Le revirement de ce développement sur les coutumes de la région d'une façon générale est apparu notamment d'une manière passive sur le système oasien de la zone qui repose sur l'irrigation par le système hydraulique connu sous le nom de Foggara créé dans la zone depuis 27 siècles [51]. Ce système traditionnel ne se limite pas uniquement aux galeries souterraines pour le captage des eaux mais c'est un système environnemental et humain composé d'oasis, puits et des sociétés locales qui ont participé dans une grande proportion à l'établissement de l'être humain dans cet environnement. Il a été établi au fur du temps son efficacité et son pouvoir à assurer l'existence et la continuité d'un mode de vie dans les oasis sahariennes.

Celui qui a fait des études sur la Foggara à travers sa longue histoire à ce jour remarquera un net recul dans leur valeur ce qui a conduit à la détérioration environnementale jamais connue pour divers motifs qu'on peut résumer en deux parties principales environnementale - et socio-économique comme en témoigne le manuscrit « Oasis sahariennes » édité par le chercheur AGP Martin [3] en comparaison avec les derniers recensement de 2011. Il a été recensé 1834 Foggaras comprenant 676 Foggaras pérennes en exploitation, 28 Foggaras pérennes non exploitées avec 755 Foggaras avec eau stagnante, 369 Foggaras taries remblayées, 03 Foggaras taries renforcées par un forage. L'ensemble de ces foggaras comprend 154 360 puits et environ 94 % des Foggaras sont utilisables pour l'irrigation, 06% des Foggaras ont une eau avec une haute salinité [4]. Selon le recensement des services agricoles jusqu'aux années 80, la majorité des oasis de la région est irriguée par les Foggaras. En 1987, les Foggara à elles seules ont permis de produire 19.500 tonnes de tomate dont 60% destinés à l'exportation. En 2014, les superficies irriguées par les Foggara ont atteint environ 50 % ce qui justifie que les Foggaras étaient et continuent à ce jour d'occuper un rang important dans le secteur agricole de la région. Il a été également recensé divers produits agricoles irrigués par voie de Foggaras. Une superficie de 15 121 hectares est irriguée par des foggaras : 210 hectares

de blé pur ; 2737 hectares de blé tendre, 683 hectares de tomate ; 151 hectares de pomme de terre ; 49 hectares de divers légumes et 11 291 hectares de palmiers dattiers [18]. Ces chiffres édités par les institutions concernées prouvent que l'agriculture par Foggara n'est pas atteinte d'incapacité mais qu'elle a été marginalisée.

L'état Algérien a pris toutes les mesures pour protéger ce patrimoine à travers divers programmes [5]. Ces programmes ont couvert un déficit important sur le territoire de la wilaya d'Adrar (476 Foggaras). Ces efforts ont été suivis par d'importantes mesures pour la réintégration de la Foggara dans le fonds national de l'eau en 2005 et la création d'un observatoire spécial en 2012 et d'importantes sommes additionnelles ont été affectées et qui ont été traduites en projet de réhabilitation durant la période 2005 à 2014 avec une somme de 190 milliards de centimes attribuée par le Ministre des ressources en eau 2015 [1].

Dans ce contexte, la préservation du patrimoine ancestral exceptionnel qu'est la foggara constitue un des enjeux majeurs auxquels notre recherche tentera de répondre, face aux risques avérés de mise en péril que représente l'augmentation des prélèvements dans la nappe et face à la transition galopante d'une agriculture traditionnelle sur le déclin vers une agriculture moderne et intensive. Le niveau de la nappe du Continental Intercalaire a baissé de plusieurs dizaines de centimètres dans la zone d'influence des foggaras ces dernières années, dans un contexte d'accroissement des prélèvements agricoles et AEP. Cette situation constitue un des facteurs de tarissement des foggaras, celles-ci étant particulièrement sensibles à toute baisse du niveau de la nappe [30].

Nous visons à travers cette recherche d'éclairer la situation actuelle du système foggara et offrir une expérience adaptée aux problèmes quantitatifs de la ressource en eau souterraine dans la zone d'étude. Les principales parties de notre travail sont les suivantes :

- Actualisation du contexte général de la zone d'étude.
- Afin de bien comprendre le système de foggaras et la problématique de l'exploitation des ressources en eau souterraines dans ses champs de captage, nous produisons et analysons des cartes numériques selon les problèmes rencontrés sur le terrain. Elles sont liées en particulier aux facteurs hydrogéologiques et piézométriques. Dans ce cadre, nous avons élaboré une carte de rabattement de la nappe durant une période donnée.

- Enfin, nous montrons le cas des oasis de Bouda qui ont connu en 2017 une remontée de la nappe dû à l'abandon de cinq (05) forages destinés à l'alimentation en eau potable en 2016 et situés dans la zone de captage des foggaras. Nous montrons à travers cet exemple l'impact des forages, installés souvent dans la zone d'influence des foggaras [12].

Chapitre 1: Contexte général

Chapitre 1 : Contexte Général

1.1. Introduction

Ce chapitre a pour objet de faire une synthèse du contexte général de la zone d'étude basée sur la bibliographie existante. La connaissance des spécificités générales marquantes des oasis des foggaras est nécessaire à la compréhension de notre recherche, nous retraçons ci-dessous les principaux contextes :

- Contexte historique ;
- Contexte socio-économique ;
- Contexte géographique et administratif ;
- Contexte géomorphologique et topographique ;
- Contexte climatologique.

1.2. Contexte historique

La présence humaine dans la région semble être très ancienne, comme en témoigne l'histoire de ces oasis, qui semble à priori tout à fait récente, est pourtant liée à la lointaine présence de l'homme depuis la nuit des temps, et qui a laissé ses traces indéniables de pierres taillées et polies [46]. Depuis l'homme primitif avec ses fléchettes en pierre, jusqu'aux communautés musulmanes et leurs précieux manuscrits, la région a vécu une longue histoire mouvementée, où l'homme médiéval en tant qu'acteur dynamique, a marqué de son empreinte la longue et houleuse histoire [14].

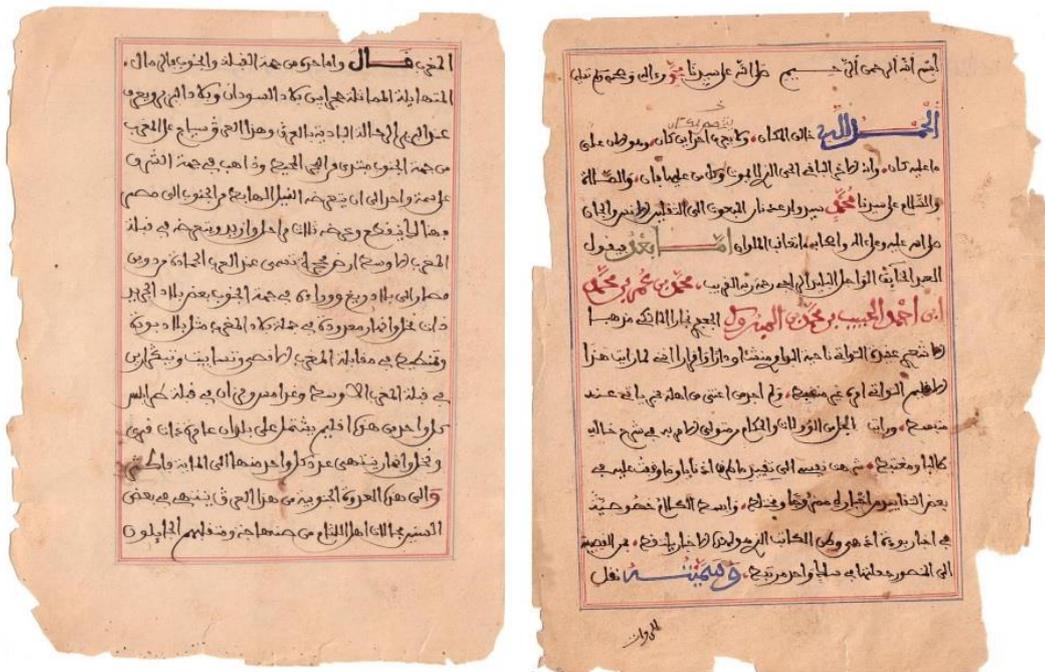


Photo 1-1: Manuscrits Cheikh Sidi Ahmed Ben Youcef, XII^e siècle (Page1et10)

De nombreux vestiges de stations de silex et de pierres taillées, ont été découverts dans différents endroits à travers toute la région, témoignages de l'ancienneté de la présence de l'homme au Sahara, et d'une activité humaine qui relève de la nuit des temps. En 1955, une équipe de chercheurs a découvert dans le Tidikelt, aux abords du plateau du Tademaït, des vestiges d'une race d'hommes qui a dominé toute l'Afrique du Nord, il y a 20 000 ans, que les archéologues désignent sous le terme de captien (premier squelette découvert à Gafsa) [55].



Photo 1-2: Bois pétrifié dans la région de Tit [55]



Photo 1-3 : Pierres taillées aux abords du plateau du Tademaït [55]

Les plus anciens témoignages évoqués par les historiens, remontent à la haute antiquité, au V^e siècle Av J.-C.; avec les récits de l'historien grec Hérodote, qui raconte le voyage du groupe des *Nazamons* [2], traversant un pays sablonneux, avec des mares d'eau bordées de palmeraies. Ces informations sommaires, seront complétées plus tard par des témoignages romains; Ptolémée qui décrit le pays du Guir (le fleuve Ger) qui traverse le lac Libya (Sebkha du Gourara), puis le lac Nigris (Sebkha de Tamentit), citant même quelques villages : Bunta (Bouda), Tokabat (Tsabit), Doundoun (Deldoul) qui étaient habités par une population noire sédentaire, asservie par des tribus berbères nomades, les Gétules (appellation romaine: Gaetulis). L'époque des Gétules, anciens berbères nomades qui parcouraient le désert, est marquée par au moins deux migrations juives, et l'édification de nombreuses acropoles, bâties au sommet de pitons rocheux, évitant les inondations fréquentes, et auxquelles on a attribué l'appellation de Taourirt (masculin Aourir), désignation conservée jusqu'à présent.

La période antique s'achève par l'apparition et la progression vers le sud des Zénètes, qui ont dominé pratiquement toutes les régions Ouest de l'Algérie, en procédant à l'introduction du chameau. Les premiers Zénètes nomades, auraient occupé la région de M'éguiden pour leurs pâturages, et y auraient construit leurs premiers campements. Durant cette époque judéo-zénète, loin des troubles des occupations romaine et byzantine en Afrique de Nord, la région a traversé une période de paix et de grande prospérité, avec la fondation de nombreux villages, entourés de palmeraies verdoyantes, avec Tamentit qui s'est imposée comme nouvelle métropole. Tout cela grâce aux canalisations souterraines des foggaras, utilisant efficacement des eaux souterraines, devant permettre le développement des activités agricoles au sein des oasis [54].



Photo 1-4: Kasba rectangulaires, Ksar Aghlad, Gourara



Photo 1-5: Kasba circulaire, Zet Kounta, Touat

1.3. Contexte socio-économique

Depuis 10 siècles, d'une manière générale, c'est la répartition de l'eau des foggaras qui constitue tous les rapports de production. De ce fait, la possession de l'eau, dans la région d'Adrar, représentait un instrument de domination et une situation de fortune, voire une certaine prééminence sociale [6].

Pendant des siècles, l'activité économique des palmeraies a été régie fondamentalement par le mode de production « esclavagiste ». C'est par cette main d'œuvre servile, importée pour la plupart d'Afrique noire, qui assuraient aussi bien le creusage et l'entretien des foggaras, que les travaux agricoles proprement dits. A l'époque, la société était divisée essentiellement en deux classes : d'une part, les producteurs directs, en majorité des esclaves d'origine soudanaise, et d'autre part, une aristocratie féodale, religieuse et commerçante, elle-même divisée en castes (*Morablines*, *Chorfas*). L'abolition de l'esclavage, amorcée au début du XX^e siècle, s'est traduite par l'apparition d'une nouvelle caste : les « *Haratines* ». Cette émancipation a eu des effets négatifs sur l'activité agricole car d'une part, le propriétaire dédaignait accomplir les tâches agricoles et d'autre part, l'esclave affranchi, appelé désormais *Hartani* qui signifierait « homme libre de deuxième position », aspirait à occuper une place dans la société en devenant lui-même propriétaire d'une terre qu'il irriguait par une part d'eau qu'il aura loué [44]. Ce phénomène fait partie des causes qui ont favorisé l'apparition d'un nouveau système d'exploitation : exploitation capitaliste [43].



Photo 1-6: Creusement d'une foggara en 1964 [33]

Cette transformation est due à la dévalorisation des titres de propriété, causée par la baisse de rendement des foggaras et par l'accroissement, pour une même part d'eau, du nombre d'héritiers. Après l'émancipation de la main d'œuvre servile, dans les années 50, la foggara dont l'entretien n'était plus assuré, a connu une baisse de débit [15].

Aujourd'hui, la stratégie de développement de la région est toujours basée sur le secteur agricole au regard des disponibilités des ressources en eau souterraine [8]. L'orientation vers le développement de la petite mise en valeur avec le concours du FNRDA a donné un bon résultat. L'extension des superficies de la phoeniculture et le développement de la plasticulture restent les principaux objectifs dans le secteur agricole.

Les dernières découvertes en matière de pétrole et de gaz dans la région de Reggan, Sali, Sbaa, Timimoune et d'In Salah, augurent un avenir prometteur dans le secteur industriel qui reste à développer et à prendre en charge, en raison de ses retombées économiques et sociales sur toute la région du sud du pays [29].

1.4 Contextes géographique et administratif

Il ressort sur la carte (Figure1-1) que nous avons élaborée que la zone d'étude est située au centre sud de l'Algérie. Elle est limitée par :

- la wilaya d'El-Bayadhau Nord ;
- la wilaya de Ghardaïaa Nord-Est ;
- Plateau Tademaït à l'Est
- la wilaya de Bechar au Nord-Ouest ;
- la wilaya de Tindouf à l'Ouest;
- la wilaya de Tamanrasset au Sud-Est
- Tanezrouft au Sud.

Cette zone de foggara représente la partie affleure de la formation continental intercalaire et est en forme d'arc de cercles qui s'étend du grand Erg Occidental à l'Erg Chech. Aux pieds du plateau de Tademaït se succèdent ainsi les palmeraies du Gourara, du Touât et du Tidikelt, constituant une seule région saharienne dénommée par les anciens géographes l'Archipel Touâtien. Elle est comprise entre latitude Nord 26°N et 30°30'N et les méridiens 0°30' et 5°30'E.

Le territoire de la zone d'étude compte 11 daïra et 28 communes incluses dans la wilaya d'Adrar. En 2011, sa population est estimée à 443 457 habitants, soit une densité de 6 hab/km², répartie à travers un chapelet de 300 Ksar éparpillés dans les trois sous régions.

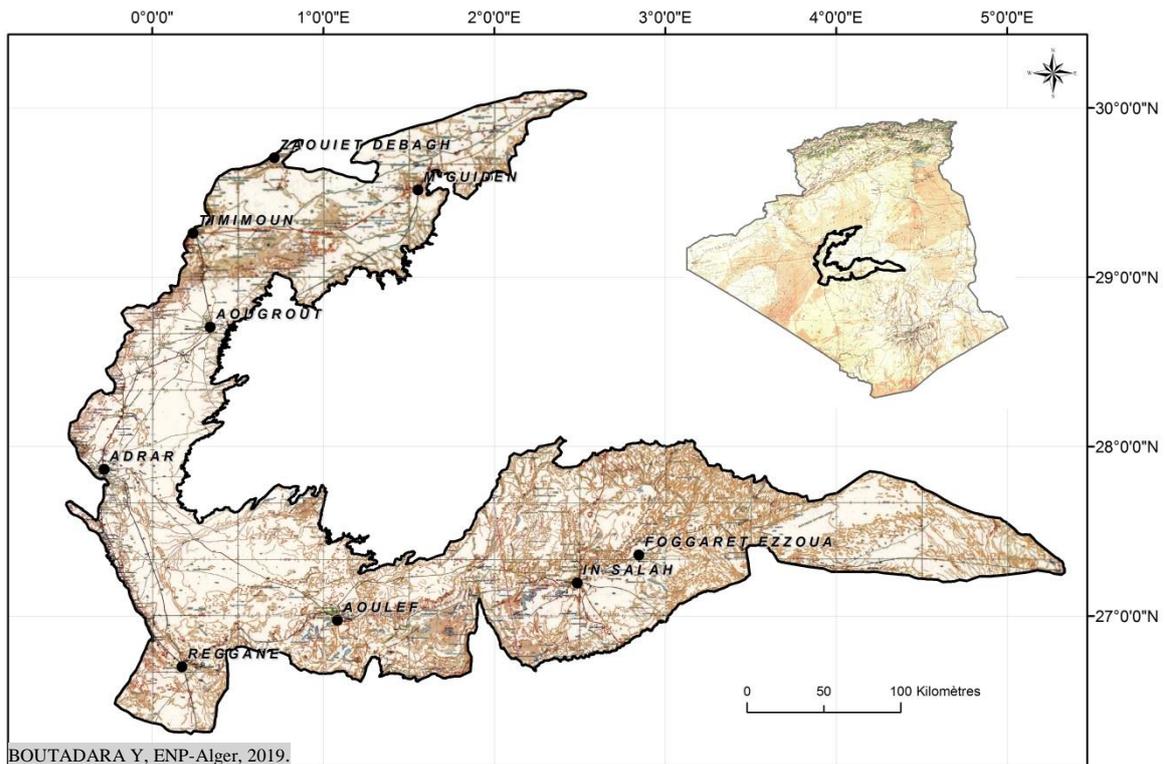


Figure 1-1: Situation géographique de la zone d'étude

La zone représente une dépression dans laquelle viennent aboutir les eaux descendues du plateau de Tademaït et de l'Atlas et des massifs des Hoggar. Elle est composée de trois sous régions :

- **Le Gourara** : situé au nord de la zone d'étude, cerné par le Grand Erg Occidental (au Nord et au Nord-Ouest), le Touat et le plateau de Tademaït (au Sud et à l'Est) (figure 1-2). Il s'étend sur une superficie de 16.786 km².
- **Le Touât** : est situé au centre de la zone d'étude. Il s'étend sur une superficie de 14.314 km². Il est délimité (figure 1-3):
 - au Nord, par la région du Gourara;
 - à l'Est, par le plateau du Tademaït;
 - au Sud, par la plaine du Tanezrouft;
 - à l'Ouest, par l'Erg Chech.
- **Le Tidikelt** : ses limites sont à l'ouest, le Touat; à l'Est, le Tassili N'Ajjer; au Nord le Tademaït et au Sud la sebkha de Mekerrhane et la plaine au pied de monts de l'Ahnet (figure 1-4). Il s'étend sur une superficie de 39.221 km².

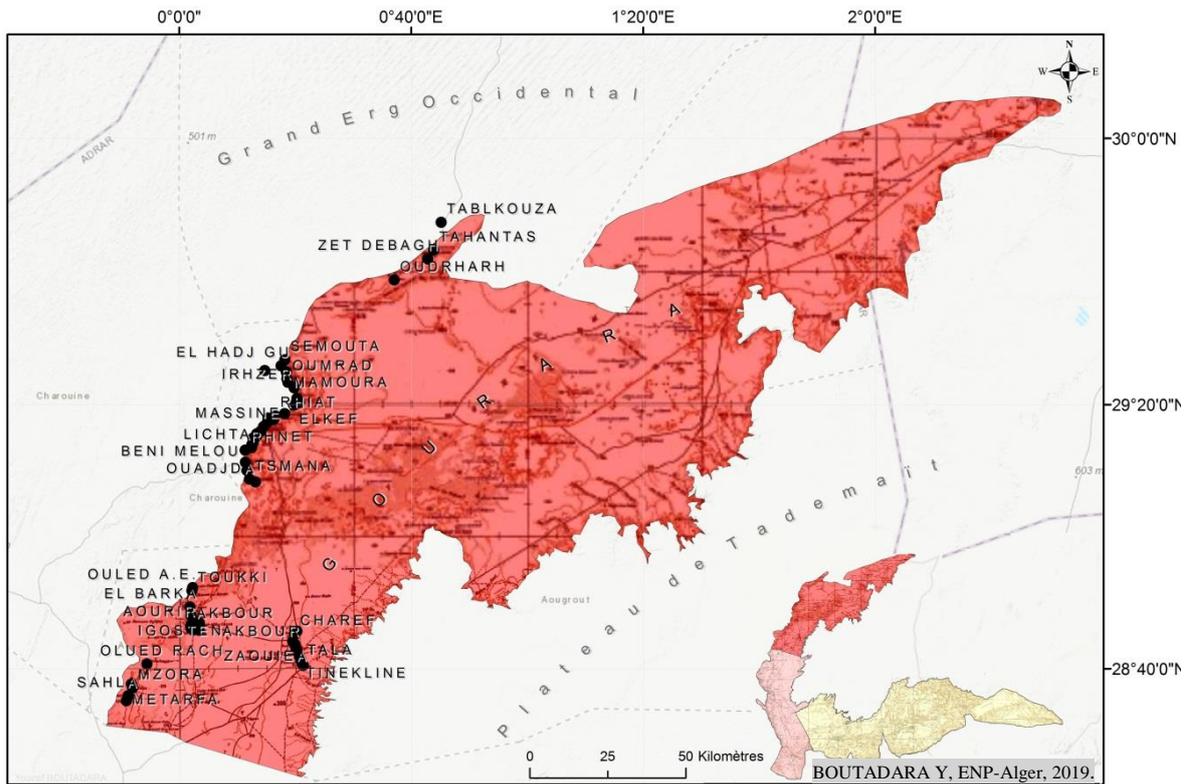


Figure 1-2 : Carte de situation du Gourara

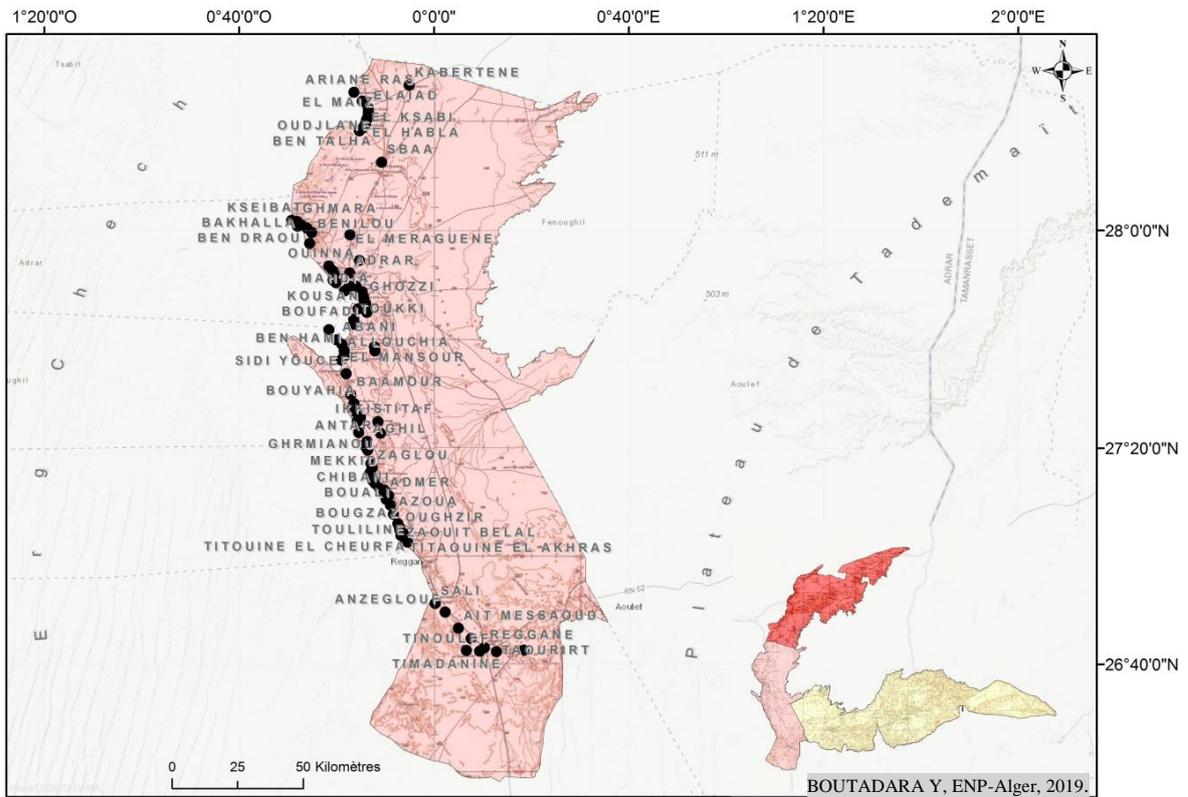


Figure 1-3 : Carte de situation du Touat

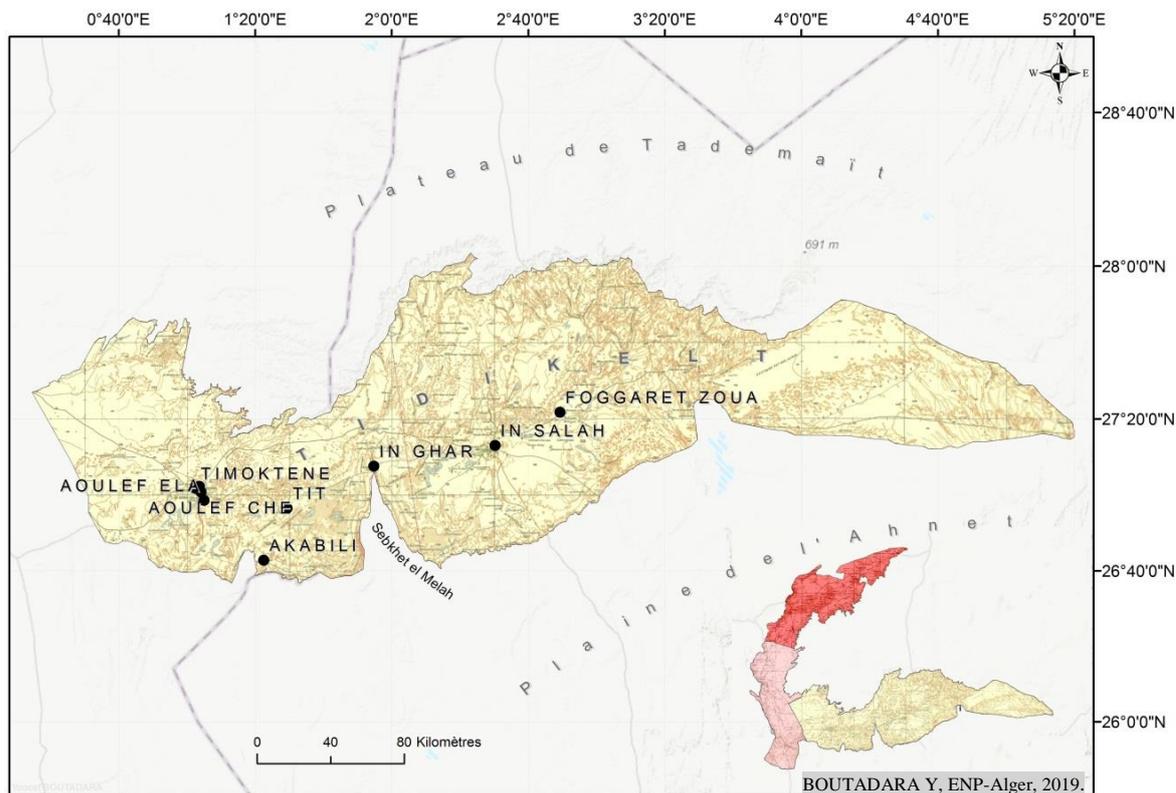


Figure 1-4 : Carte de situation du Tidikelt

1.5. Contextes géomorphologique et topographique

1.5.1. La géomorphologie générale de la zone d'étude

L'analyse de la situation géomorphologique de zone d'étude nous a permis de distinguer cinq unités de base [10] :

- i. **Les regs** : on peut considérer le reg comme le type morphologique le plus fréquent dans la région. Il est représenté par une surface sensiblement horizontale, recouverte de débris généralement graveleux ou caillouteux d'âge Quaternaire qui protègent un substrat en général sableux ou alluvial de texture plus fine et d'âge crétacé inférieur.
- ii. **Les ergs** : toutes les nuances existent entre le simple voile sableux et les dunes massives constituées en ergs. L'erg occidental et l'erg Chech est la formation sableuse la plus massive sur les bordures de la région.
Les autres ergs abritent une végétation éphémère, ou sont formés artificiellement des obstacles (Affrègue) contre la progression du sable. Ils sont dispersés de part et d'autre de la région étudiée.
- iii. **Les oueds** : les oueds sont des ravinements ou des lits de rivières asséchées et ensablées. Ils entaillent les regs ou les hamadas et sont épisodiquement alimentés

par des pluies sauvages, locales ou lointaines, qui peuvent les transformer en torrents. Mais l'eau souvent leur arrive depuis le plateau Tademaït.

- iv. **Les terrasses d'érosion** : leur importance varie selon la nature des roches et l'intensité des agents érosifs, elles se sont formées dans les dépressions naturelles des oasis du Gourara, du Touât et du Tidikelt au cours du Quaternaire.
- v. **Les sebkhas** :Elles constituent l'émergence naturelle de la nappe du Continental Intercalaire qui correspond aux points les plus bas de la région d'étude. Elles sont représentées par de grandes étendues remplies d'eau salée situées en contrebas des grande oasis comme le cas de la sebkha de Timimoune, Tamentit et In Salah.

1.5.2 La topographie générale

Afin d'illustrer et analyser la topographie de la zone d'étude, nous avons dressé une carte de relief sur la base d'un modèle numérique de terrain (MNT) (figure1-5). La zone d'étude occupe une grande zone allongée qui fait géographiquement partie du Sahara Algérien. La zone d'étude est limitée au nord par le massif dunaire du Grand Erg Occidental à 500m d'altitude et au Sud par les plaines de monts de l'Ahnet (289 m) et la sebkha de Mekerrhane (120 m). À l'Est, la zone d'étude est limitée par le plateau de Tademaït à 600m d'altitude, et à l'ouest nous trouvons l'Erg Chech (380m) et Oued Messâoud (158m) qui contourne l'oasis du Touat à l'ouest.

Les dépressions des foggaras sont situées entre les rives des dépressions (350m) et les sebkhas (255m). Cette disposition permet d'exploiter les eaux souterraines drainées à des côtes supérieures à celles des terrains cultivés, par les galeries des foggaras.

La sebkha de Gourara située sur l'altitude 203 m représente une grande cuvette reçoit une importante gouttière quaternaire qui forme une dépression ayant la plus basse altitude de plaine de M'eguiden. Sur le parcours probable des vallées d'érosion vers le Nord et au pied de l'Erg occidental on trouve les oasis du Tinerkouk (331m). Au Sud-Ouest de celles-ci nous trouvons un autre groupement d'oasis autour de la sebkha, ce sont les oasis d'Ouled Said (283m). En aval, la cuvette du Gourara est limitée par les oasis de Deldoul (223m). Au Sud du Gourara un autre réseau hydrographique draine l'ouest du plateau de Tademaït et forme la sebkha d'Aougrouit (290 m) et l'oasis de Metarfa sur une altitude moyenne de 248m.

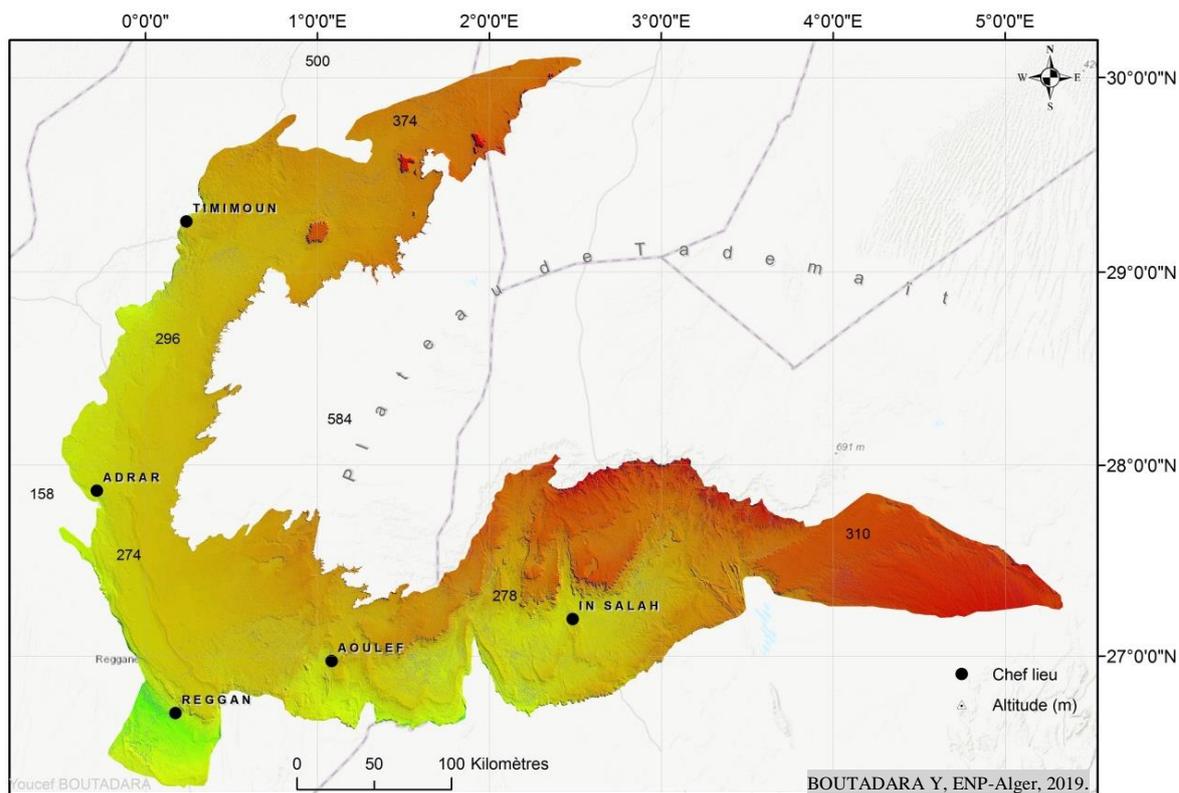


Figure 1-5: Carte du relief de la zone d'étude

Dans le Touat, nous trouvons Oued Messâoud qui coule vers le sud. Il est jalonné par la sebkha à côté de l'oasis de Teçabit (256m). L'oued Messaoud s'étend vers le Sud-Ouest à 7,5 km de l'oasis de Bouda (237m). Entre les deux, nous notons la présence des palmiers isolés (El Bour) et des foggaras en ruine qui sont des vestiges des anciennes oasis abandonnées à cause de l'ensablement. A une dizaine de kilomètres au sud, nous trouvons également les oasis de Timmi (242m), qui est une grande localité comprenant une vingtaine de ksour, parmi lesquels le chef-lieu du Touat (Adrar) et le groupe d'oasis Ouled Oungal, Adgha, Ouled Ouchen (250 à 263m). Les deux oasis de Merguen et Tinilane se trouvent respectivement au nord et à l'ouest de Timmi. À 6 km au sud de cette dernière, se situent les oasis de Tamentit (246m), Amguid (225m) et Bou-Faddi (234 m) vers l'ouest. Enfin, plus au Sud-Ouest, se trouve l'oasis isolée de Tasfaout (223m).

Vers le Sud de Tamentit, la sebkha est suivie d'une dépression légère, mais qui s'élargit ensuite en une grande vallée d'érosion dont les berges sont très accentuées. On y trouve successivement les oasis de Fenoughil (217m) et Tamest (229m). À l'Est de ces dernières, nous trouvons successivement les oasis de Noum-Ennas (248m), Titaf (250m) et Gharmïanou (247m). Au Sud de Tamest, il y a une série d'oasis presque ininterrompue situées sur une zone de rupture de pente dont les principales oasis sont Zaouïet Kounta (216m) et Inzegmir (217m). La rupture de pente continue vers le sud où nous y trouvons la

grande oasis de Sali (160m) avec une douzaine de ksour. Vers le Sud de la sebkha de Sali, il existe des dépressions où s'accrochent les oasis de Tinnourt, Berich, Baho, El Mestour, Zaouïet el Hachef et Inzeqlouf (170 à 207 m). Enfin dans les limites sud de notre zone d'étude, sur une altitude moyenne de 160 m, nous apercevons les oasis d'Aït Messâoud, En-Nefis, Taârrabt, Tinoulef et Zaouïet Reggani situées dans une dépression contournée par de grandes dunes de sable. Les limites sud du Touat se terminent à 15 km au sud des oasis au niveau de l'embouchure de l'oued Messaoud.

Notre zone d'étude s'étend vers le Tidikelt à l'Est, où nous passons par les hauteurs de Taorirtet en descendant dans les oasis disparus d'Ain Chebbi. Dans cette même partie de la zone d'étude au sud du plateau de Tademaït et d'un point de vue hydrographique, nous trouvons les oueds de Tilia, Tigfermas et Talha qui drainent le plateau de Tademaït dans la sebkha de Mekerrhane. Avant son débordement dans la sebkha de Mekerrhane, l'oued Talha s'élargit en aval sur une altitude de 309m en passant par les oasis d'Aoulef et Timoktene sur une altitude moyenne de 275m. En continuant vers l'Est, nous arrivons à l'oasis de Tit (279m). À 25 km au Sud de cette dernière, se trouve l'oasis d'Akabli sur une altitude moyenne de 224m. À l'Est de Tit s'étend une plaine surveillée du Nord par les falaises de plateau et une large vallée qui va déboucher sur l'oasis d'Inghar (317m). Toujours vers l'Est, sur 60 Km, s'étend la grande sebkha de l'oasis d'In Salah (240m) avec dix ksour, parmi lesquels : ksar El Arab, Deghamcha et Ouled El Hadj. Un peu plus loin à l'Est de ces oasis c'est encore un alignement de petites oasis comprenant Sahela, Igosten, Foggaret El Arab et Foggaret Ezzoua sur une altitude moyenne de 328m.

1.6. Contexte climatologique

Le climat de la zone d'étude est désertique hyperaride (Classification de Köppen), caractérisé par la faiblesse des précipitations et leurs irrégularités, des températures extrêmement élevées et des vents qui contribuent à augmenter la très forte évaporation [45].

L'aridité est une expression qualifiant la sécheresse qualitative ou quantitative d'une région. C'est d'abord un fait climatique majeur actuel qui règne dans des zones du globe relativement stables à l'échelle humaine (séculaire à millénaire) : on sait qu'elle se caractérise par des précipitations annuelles faibles, à distribution très irrégulière dans le temps et dans l'espace, et notamment inférieures à l'évaporation potentielle annuelle. En zone aride, il pourrait s'évaporer 10 à 20 fois plus d'eau qu'il n'en tombe chaque année, en moyenne [39]. Des indices ont été définis [32] ; [22] pour classer les zones climatiques en

fonction de leur degré d'aridité (Tableau 2-1). L'indice d'aridité (I_a) est le rapport entre la moyenne des précipitations annuelles (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) ($I_a = P/ETP$).

Tableau 1-1: Classification de l'aridité [32] ; [22].

Zone	Indice d'aridité	Pluviométrie (mm/an)
Sub-humidesèche	0,50 - 0,65	-
Semi-aride	0,20 - 0,50	200 - 500
Aride	0,05 - 0,20	50 - 200
Hyper-aride	< 0,02	0 - 50

En se référant à la carte ci-dessous (Figure 1-6), on constate que la région étudiée est placée dans le climat désertique [9]. Le Sahara sud-occidental, jusqu'à la latitude de Tanezrouft, sont dans les limites bioclimatiques du désert; les plateaux du Tidikelt et du Tademaït appartiennent au vrai désert.

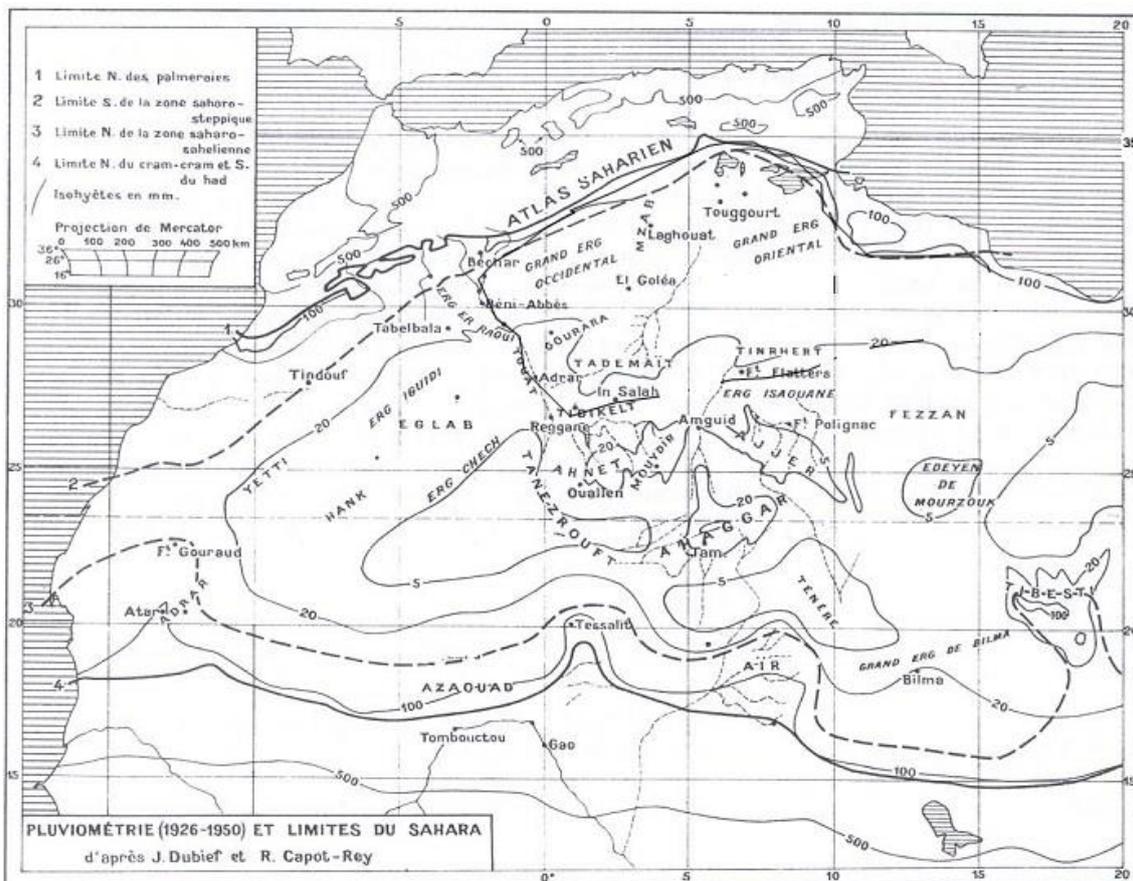


Figure 1-6: Pluviométrie et limites du Sahara [16]

1.6.1. La Température

Selon les données FAO, la température moyenne maximale est au mois de juillet et est de 46 °C. De ce fait, Juillet est le mois le plus chaud de l'année.

Cette situation influe sur la transformation de l'eau en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de salinité des eaux.

1.6.2. La Précipitation

L'analyse des données des précipitations, sur une période de 20 ans (1997-2017), montre que les précipitations sont faibles, dispersées et irrégulières. Pratiquement une précipitation faible durant l'année dans la région d'Adrar, est en moyenne 40 mm/an seulement.

1.6.3. Le Vent

Le vent est un facteur qui distingue souvent la zone d'étude, on note que la fréquence des vents est très grande durant toute l'année : 50% au Touat, 45% au Tidikelt et 30% au Gourara, avec un maximum de fréquence pour la période de mai à septembre. Le vent enregistre des vitesses généralement modérées en moyenne 162,2 Km/jour avec une direction dominantes NE en hiver et SW en été.

1.6.4. L'humidité atmosphérique

La moyenne annuelle de l'humidité dans la région ne dépasse guère 25,30 %. Les moyennes mensuelles de l'humidité sont au-dessous de la médiane (50 %). Les fortes valeurs de l'humidité sont enregistrées durant la saison d'hiver et la valeur maximale moyenne enregistrée est celle du mois de janvier et décembre qui est de l'ordre de 42%. Les faibles valeurs caractérisant la saison la plus chaude où on trouve que l'humidité relative de l'air ne dépasse pas les 30 % et la valeur minimale moyenne est celle du mois de juin qui est de l'ordre de 14 %.

1.6.5. L'évaporation

En zones arides, l'évaporation et l'évapotranspiration sont les mécanismes majeurs de pertes en eau [34]. Dans des bassins arides fermés, ils sont les seuls modes de perte en eau [52]. Notre zone apparaît comme la région qui possède le degré d'évaporation le plus élevé du monde.

C'est un paramètre particulièrement contraignant pendant l'été, comme c'est le cas dans localités du Kabertene, Reggan et In Salah où près de 50% de l'E.T.P. annuelle est enregistré entre les mois de Mai et Août, elle est entre 300-350 mm [20].

Tableau 1-2: Données climatiques Adrar (source : FAO ClimWat)

Mois	TempMin °C	Temp Max °C	Humidité %	Vent km/jour	Insolation heures	Ray. MJ/m ² /jour	Eto mm/jour	Pluie Mm
Janvier	3,80	20,50	42,00	147,00	7,90	14,20	2,69	10,00
Février	6,60	23,20	31,00	190,00	8,60	17,10	3,98	2,00
Mars	10,50	27,70	24,00	173,00	9,80	21,50	5,08	3,00
Avril	15,50	33,20	23,00	156,00	10,70	24,90	6,18	3,00
Mai	19,30	37,20	17,00	207,00	10,80	26,00	7,96	2,00
Juin	25,50	43,20	14,00	173,00	11,30	27,00	8,33	0,00
Juillet	27,70	46,00	15,00	173,00	11,40	27,00	8,78	0,00
Août	26,60	44,30	15,00	147,00	10,80	25,40	7,75	0,00
Septembre	23,80	40,50	19,00	156,00	9,80	22,00	6,95	1,00
Octobre	17,10	33,20	27,00	138,00	8,70	18,00	5,04	10,00
Novembre	10,50	25,50	34,00	130,00	8,20	14,90	3,50	0,00
Décembre	5,50	15,50	42,00	156,00	7,80	13,30	2,43	12,00
Moyenne	16,03	32,50	25,25	162,17	9,65	20,94	5,72	3,58

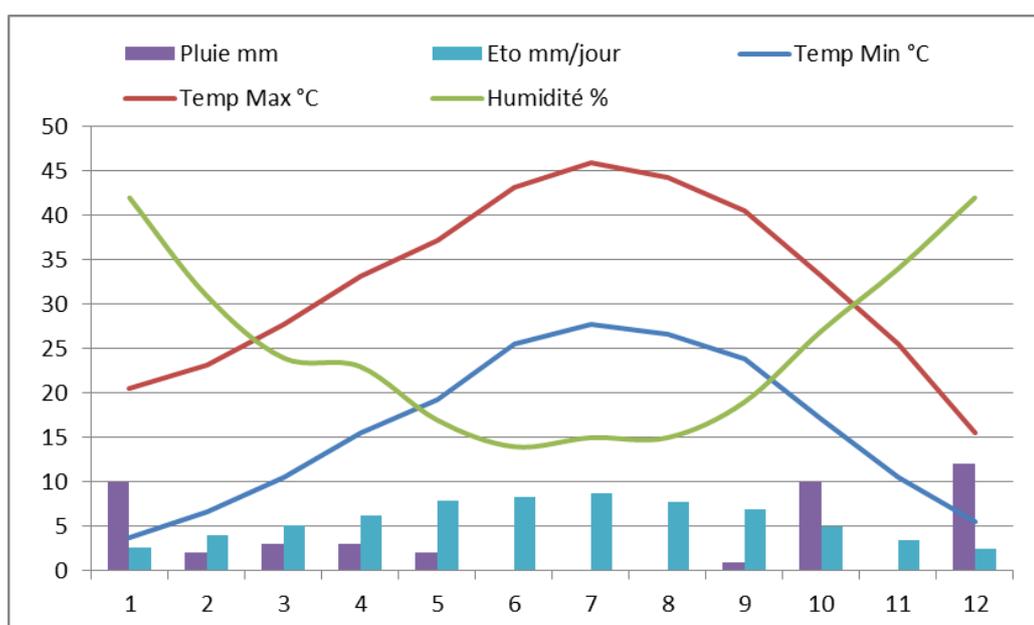


Figure 1-7: Paramètres climatologiques mensuels moyens (source : FAO ClimWat)

1.7. Conclusion

La zone de Touat, Gourara et Tidikelt fait partie du Sahara septentrional. C'est une vaste région qui s'étend sur un chapelet d'oasis d'environ 70 321 km² de superficie, incarnée par plus de 300 ksour. La zone d'étude est caractérisée par cinq unités géomorphologies de base (regs, ergs, oueds, terrasses d'érosion et sebkhas) située entre 158 et 425 m d'altitudes. Le climat de la zone est de type hyperaride caractérisé par la rareté et la grande irrégularité des précipitations. Pendant des siècles et jusqu'à ces dernières années, l'activité agricole oasienne est considérée comme un facteur d'équilibre socio-économique dans un écosystème fragile, caractérisé par des conditions climatiques rugueuses et des reconfigurations sociales profondes [24]. En réponse à ces conditions et en profitant des conditions topographiques et hydrogéologiques, la population oasienne a su maitre en place le système gravitaire séculaire d'exploitation de la ressource en eau souterraine « la foggara ».

Chapitre 2: Contexte hydrologique

Chapitre 2 : Contexte hydrologique

2.1. Introduction

Actuellement le Sahara Algérien porte les vestiges des réseaux hydrographique anciens qui témoignent sur les écoulements de surface énergiques au cours des périodes humides du Quaternaire [28]. Ces réseaux sont aujourd'hui plus ou moins colmatés par des apports éoliens ou des dépôts sédimentaires, il est encore possible de discerner une dynamique hydrographique importante dont le fonctionnement actuel.

Dans notre région, l'érosion causée par l'ancien écoulement crée des chenaux de drainage débouchant dans les grandes sebkhas en contact avec la nappe du continental intercalaire, ou plus encore dans d'immenses plaines, comme celles de la Saoura, du Gourara et du Touat. Ainsi d'énormes réserves hydriques se sont constituées au cours des périodes géologiques humides en s'accumulant dans les terrains perméables du Secondaire et du Tertiaire [19].

Dans ce contexte, nous présentons un aperçu hydrologique sur les réseaux hydrographiques et les divers bassins-versants. Nous avons élaboré des cartes montrant les différents oueds qui ont des performances hydrologiques et une communication avec la nappe dans le territoire de notre zone d'étude. Dans ces réseaux hydrographiques fonctionnels, nous avons observé des écoulements relativement importants. Dans ce qui suit, nous présentons les grands ensembles hydrologiques à savoir :

- le bassin de la Saoura ;
- le bassin du Melrhir.

2.2. Bassin de la Saoura

Dans ce bassin très dégradé (Figure 2-1), nous avons réuni autour de la Saoura, prise comme oued principal, tous les oueds qui se perdent, actuellement, dans le Grand Erg Occidental [25]. Il nous semble en effet, avec assez de vraisemblance, qu'ils ont été, jadis, des affluents de gauche de la Saoura ou de son prolongement, Oued Messaoud. Ce grand bassin a été subdivisé en :

2.2.1. Versant méridional de l'Atlas saharien

Un versant méridional de l'Atlas saharien : dont les divers affluents, encore assez vivants, seront étudiés dans l'Oued Saoura et son affluent la Zousfana, Oued Béchar, Oued Namous, Oued Rharbi, Oued Seggeur, Oued Zergoun et Oued Mehaiguène.

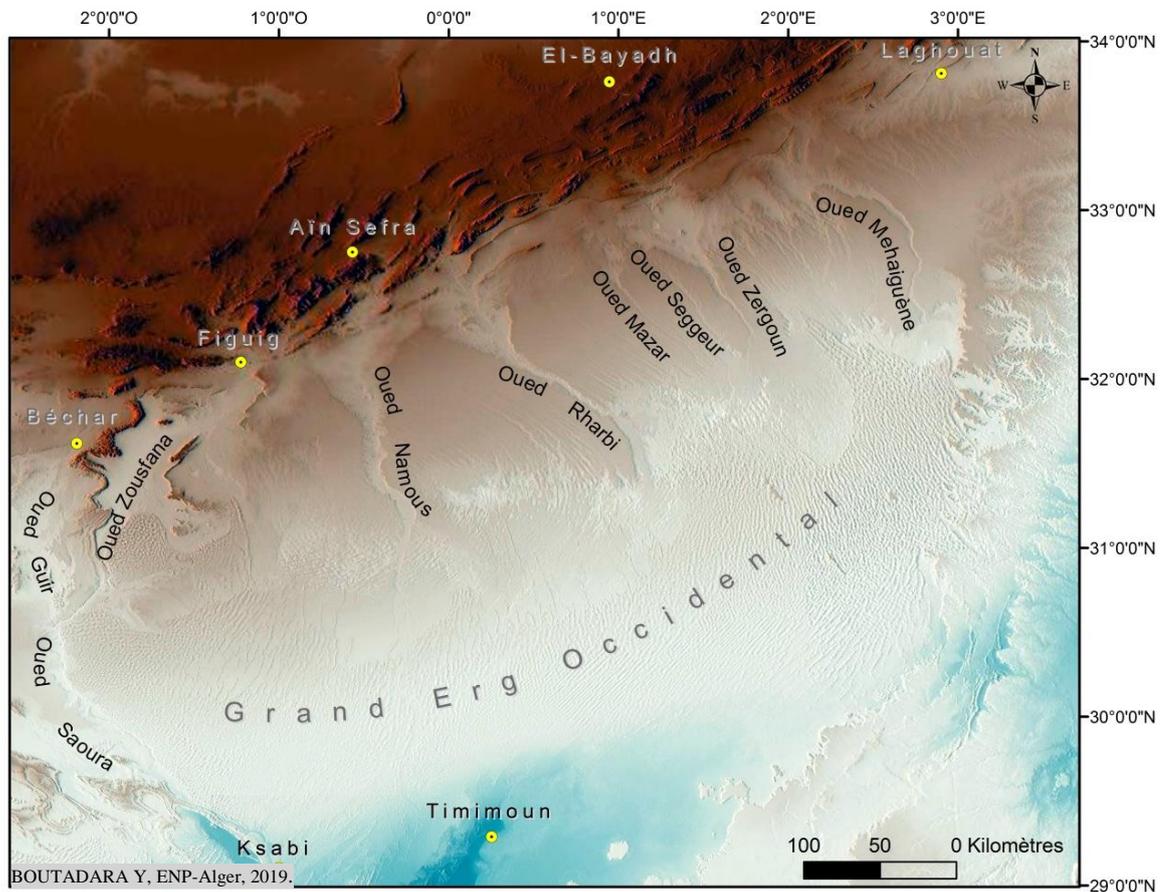


Figure 2-1: Les oueds du versant méridional de l'Atlas saharien

2.2.1.1. Oued Saoura

Les limites adoptées du bassin-versant sont celles découlant de l'étude du ruissellement actuel. Elles sont déterminables jusqu'au niveau de Kerzaz. Pratiquement, cependant, le bassin-versant effectif peut être arrêté à la hauteur d'Igli, c'est à-dire au confluent du Guir et de la Zousfana. La Saoura proprement dite peut être considérée comme jouant le rôle d'un oued allogène vis-à-vis des régions qu'elle traverse. Ainsi réduit, le bassin ne dépasse pas 44000 Km² dont 27 400 Km² pour le Guir et 16 600 Km² pour la Zousfana.

Du point de vue de l'étude quantitative de l'écoulement, le bassin effectif peut même être réduit à 22000 Km², si on le restreint à la région en amont d'Abadlah, c'est-à-dire à l'oued principal qui reçoit encore un appoint appréciable de ses affluents. Les profils et les crues

des oueds Guir, Saoura et Zousfana conduisent à admettre que les deux premiers oueds sont les éléments d'un même oued principal, la Zousfana n'étant qu'un affluent.

Ce grand oued Guir-Saoura, prolongée par le Messaoud est l'oued le plus important du Sahara algérien puisqu'il draine plus de 800 km du Nord au Sud et connaît en moyenne plus de 30 jours de crue par an. Ces écoulements importants sont dus aux pluies qui arrosent le Haut Atlas et qui sont collectées par l'oued Guir auxquelles viennent s'ajouter celles de l'Atlas saharien (plus de 100 mm par an) drainées par la Zousfana.

L'apport moyen annuel de la Zousfana est de 6 Mm³. Celui du Guir à la hauteur du barrage de Djorf Torba est de 200 Mm³ (6,3 m³/s) [27]. Les crues de l'oued Guir surviennent en automne et au printemps. En octobre 1950, on a enregistré 3000 m³/s à Djorf Torba ; en 1959, le débit estimé au maximum de la crue à Abadlah était de 4000 à 5000 m³/s et le total du volume d'eau écoulé était de l'ordre de 800 millions de m³. Il s'agit là de fortes crues exceptionnelles. Les débits sont en moyenne de 1500 m³/s. Les débits de crue décennale et centennale, évalués à Djorf Torba, donnent des valeurs de 2000 et 8830 m³/s.

2.2.1.2. Oued Béchar

Le bassin de l'oued Béchar s'étend sur 5800 km². Il prend sa source vers 1600 m d'altitude dans le Jebel Antar. Il descend rapidement sur la hamada et reçoit de nombreux affluents venant des Jebels Horreït et Béchar. Après un parcours de 150 km, sous le nom d'Oued Bou Dib, il vient se perdre, 50 km en aval, dans la Daïet Tiour, à 550 m d'altitude. Cet oued se jetterait antérieurement dans le Guir.

D'après les données de 1938 à 1950, reportées par [19], le nombre annuel de mois de crue à Béchar, à 40 km de la source, est en moyenne inférieur à 2 par an. Ces crues se présentent, essentiellement, en automne et au printemps. L'apport moyen annuel est estimé à 2 Mm³.

2.2.1.3. Oued Namous

Le bassin effectif de l'oued Namous peut être limité à la hauteur de Hassi Mamoura, cet oued ne recevant plus d'affluents actifs en aval de ce point. Dans ces conditions, sa superficie atteint 8900 km². L'oued Namous, si l'on adopte pour son origine le début de l'oued El Breïdj, prend sa source vers 1900 m d'altitude dans les Monts des Ksour.

Légèrement en amont de Hassi Mamoura, la pente augmente et l'oued coule dans une large vallée, creusée dans la hamada, où son lit s'ensable progressivement. Le Namous atteint le Grand Erg Occidental et disparaît dans les sables à 370 km de son origine. Dans sa partie amont, sous le nom d'oued Sefra, à Ain Sefra, les mois de crue sur la période 1938-1951 ont atteint en moyenne 2,6 mois par an. Dans le bas Namous, les crues ne s'observent que 7 années sur 13. Ces crues peuvent être d'une grande violence.

2.2.1.4. Oued Rharbi

Le bassin de l'oued Rharbi atteint une superficie de 14 600 km², si on le prolonge jusqu'au débouché de l'oued dans le Grand Erg Occidental. Pratiquement, cependant son bassin effectif peut être limité au confluent des deux branches formées par les Oueds Chergui et Kreroua ; la superficie se réduit alors à 7800 km².

Ainsi défini, le Rharbi prend naissance dans la partie orientale des Monts des Ksour vers 1500 m d'altitude. Jusqu'à son entrée en région saharienne à El Abiod Sidi Cheikh, à 65 km de l'origine, son profil est assez régulier. Il se poursuit dans la gouttière sud-atlasique jusqu'à son confluent avec le Chergui, vers 800 m d'altitude et après 130 km de parcours. Peu après Arich et Tir, à 280 km de son origine et vers 600 m d'altitude, il s'engage dans l'erg où sa vallée actuelle peut se suivre de nos jours jusqu'à Gour el Gahouane. Son parcours de crue extrême a atteint Gour El Gahouane à 310 km. À El Abiod Sidi Cheikh les mois de crue sur la période 1940-1950 ont atteint en moyenne 2 mois par an. La durée des écoulements peut atteindre une dizaine de jours (Septembre 1941) et la hauteur de crue 1,5 m (Septembre 1950).

2.2.1.5. Oued Seggeur

Le bassin théorique de l'oued Seggeur s'étend sur 8 900 km², sa superficie se réduit à 3 900 km² si on le limite à la hauteur de Brezina, c'est-à-dire au point où il ne reçoit plus d'apport d'eau appréciable. L'oued Seggeur prend sa source dans la région de Géryville vers 1 800 m d'altitude. Sous les noms de Rhassoul, puis de Mouilar, il gagne la région de Brezina où il prend son nom de Seggeur. Après un parcours de 340 km, l'oued débouche sur le Grand Erg Occidental à Guerinet el Kahala.

2.2.1.6. Oued Zergoun

Le bassin-versant théorique de l'oued Zergouna une superficie d'environ 6 600 km² dont près de 4 000 km² peuvent être considérés comme actifs. L'oued prend son origine, dans le Jebel Amor, vers 1600 m d'altitude. Il aborde la hamada qu'il traverse dans une vallée

relativement étroite pour déboucher sur le Grand Erg Occidental à 250 km de son origine, vers la cote 570 m.

Des informations sur les écoulements du Zergoun sont pratiquement inexistantes. Dubief en 1953 a noté que, plus au Sud, des écoulements se produisent de temps à autre, comme en septembre 1938, juin 1940 et 1945 et avril 1950.

2.2.1.7. Oueds Mehaïguène et Louha

L'oued Méhaïguène actuel a une longueur d'environ 160 km. Sa large vallée, très ensablée, est tracée, presque entièrement, dans le plateau du Pliocène continental. Après une bifurcation vers l'Est, d'une dizaine de km, il conflue dans l'oued El Louha vers la cote 540m. Si l'on en juge par l'importance des dépôts du Quaternaire continental, il devait primitivement se poursuivre directement vers le Sud avant de déborder dans l'oued du Louh.

2.2.2. Versant occidental du Tademaït

Une ligne de partage des eaux bien marquée peut être tracée à travers le plateau du Tademaït, du NNE au SSW (Figure 2-2). Elle sépare un versant occidental que l'on peut rattacher aux bassins du Sahara occidental, d'un versant oriental plus complexe. Ce dernier est, en effet, fractionné par une ligne de partage des eaux passant par le rebord méridional du Tademaït en un versant Mya-Grand Erg Occidental, au nord, et en un versant Mekerhane au sud.

Le bassin hydrographique du versant occidental du Tademaït est actuellement très dégradé. On peut distinguer, de nos jours :

- au Nord, le versant des oueds Mzaourou et El Berreg,
- à l'Ouest, le versant M'eguiden- Gourara groupant l'ensemble des petits oueds descendant du premier rebord occidental du plateau,
- au Sud, le versant de l'oued Tilia,
- au centre et à l'Est, un ensemble de petits bassins fermés centrés, du Nord au Sud, sur les daïets.

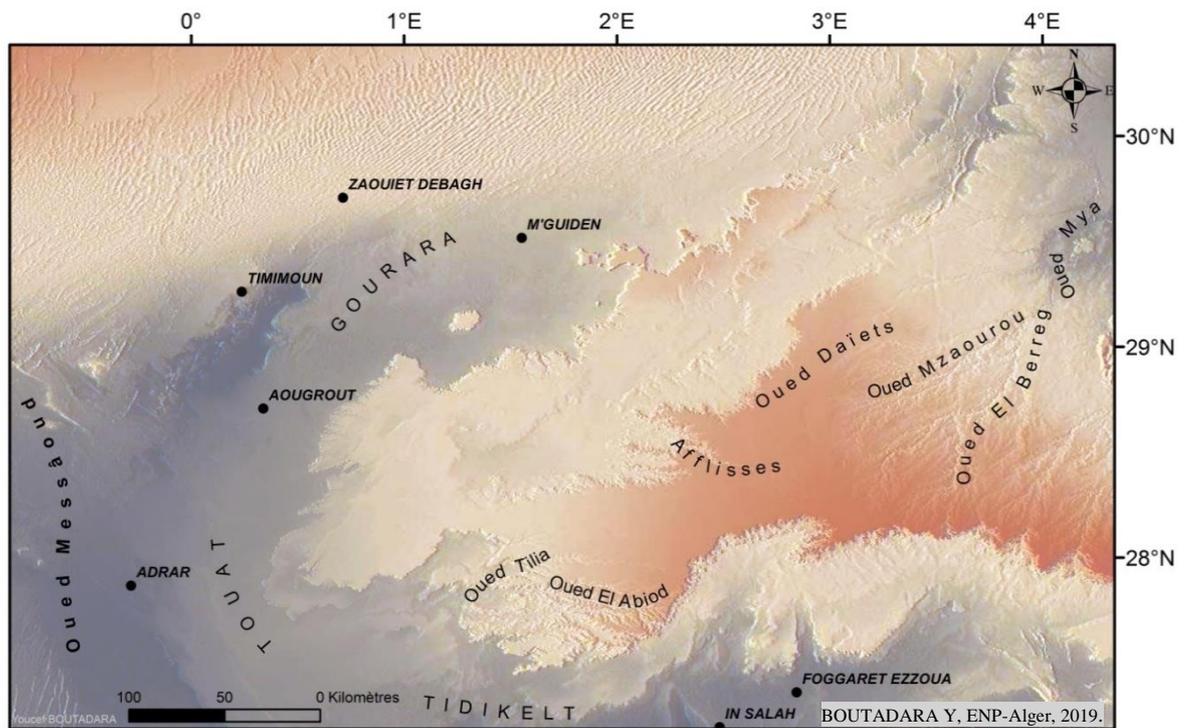


Figure 2-2: Versant occidental du Tademaït

2.2.2.1. Oued Mzaourou - El Berreg

L'oued Mzaourou draine la corne NW du Tademaït; il débute vers la cote 500 m et se perd dans un grand cordon dunaire, vers 375m d'altitude. Il a été en crue en octobre 1945 et en janvier 1946 où la crue dura 2 jours. Le versant de L'oued El Berreg, partant de la cote 500 m, se perd dans l'Erg à 353 m d'altitude.

Si l'on considère la ligne de cote 400m de cette région, on constate qu'elle limite une région de bas-fonds. Son point bas serait à la cote 353m, si toutefois celle-ci est exacte. Cette dépression pouvait, soit constitué un bassin fermé autonome avant la dégradation hydrographique actuelle, soit appartenir à l'un des deux grands bassins voisins, la Saoura et le Mya. Dans le premier cas, ses eaux s'écouleraient par les bas-fonds du M'eguiden et les sebkhas du Gourara ; dans le second, elles rejoindraient l'oued Mya. les a rattachés au bassin de la Saoura.

2.2.2.2. Oued du versant M'eguiden - Gourara

Actuellement, ces oueds sont réduit à leurs vallées supérieures, d'ailleurs courtes. Ils descendent du premier contrefort occidental du Tademaït qui culmine entre 500 et 600 m et se perdent dans les daïas et les regs du M'eguiden et du Gourara qui bordent le pied de la falaise. Les oueds du M'eguiden ont été en crue en mars 1943 et octobre 1945.

2.2.2.3. Oued Tilia

L'oued Tilia prend son origine sur le versant occidental du Jebel Aglal, vers 600m d'altitude. Il descend assez rapidement de 300m pour gagner les regs du Touat oriental. Il se perdait jadis dans la sebkha du Touat au niveau de Zaouïet Kounta. Ses affluents, l'In Belbel, le Matiourag, l'En Nezoua, l'El Abiod, sont encore actifs. Tous ces oueds ont été en crue en octobre et décembre 1951, ainsi qu'en janvier 1952.

2.2.2.4. Bassins fermés des Daiets du Tademaït

Ces petits bassins fermés occupent une vaste gouttière allongée, NE-SO, du Sud de la région d'El Goléa au Touat. Elle est bordée à l'Ouest, par le premier réseau du Tademaït, à l'Est, par la falaise du plateau terminal. Elle présente deux pendages divergents, l'un vers la dépression des oueds Mzaourou et El Berreg, l'autre vers le Touat. Elle est ainsi partagée en deux parties inégales, un tiers au NE et deux tiers au SO. Actuellement, les daiets peuvent encore être en eau de temps à autre. Des crues de leurs collecteurs ont été signalées, le 12 août 1940 dans l'oued Sidi Ahmadou, affluent de l'Afflisses, en novembre 1942 dans l'oued Admadou de la daiet Mouilkor, en janvier 1945 dans l'oued El Ahmara de la daiet bou Madhi, en septembre, octobre et décembre 1951 et janvier 1952 dans l'ensemble de ces oueds.

2.3. Bassin du Melrhir

Nous désignons sous ce terme général, l'ancien système hydrographique, d'ailleurs encore assez hypothétique, qui avait comme niveau de base de la région des chotts du Sud constantinois et tunisien. Les chotts actuels seraient les derniers vestiges de la vaste nappe d'eau qui recouvrait alors cette région (figure 2-3).

En ce qui concerne les bassins du Djedi et de l'Aurès, le phénomène est actuel. Par contre, il reste du domaine de l'hypothèse pour les autres bassins rassemblés ici : ceux du Mzab, du Mya, de l'Igharghar, du Tinrher et de l'Isaouane.

Les bassins du Melrhir couvrent en gros une superficie de 685.000 km², sur lesquels 250.000 km² peuvent être considérés comme appartenant encore au domaine de l'endoréisme actif et 200.000 km² à celui des ergs.

Les divers bassins qui composent cet ensemble seront étudiés dans l'ordre suivant :

Bassin du Djedi, Bassins de l'Aurès, Bassins du Mzab, Bassins du Mya, Bassin de l'Igharghar, Bassins de l'Isaouane, Bassins du Tinrher et du Sud Tunisien.

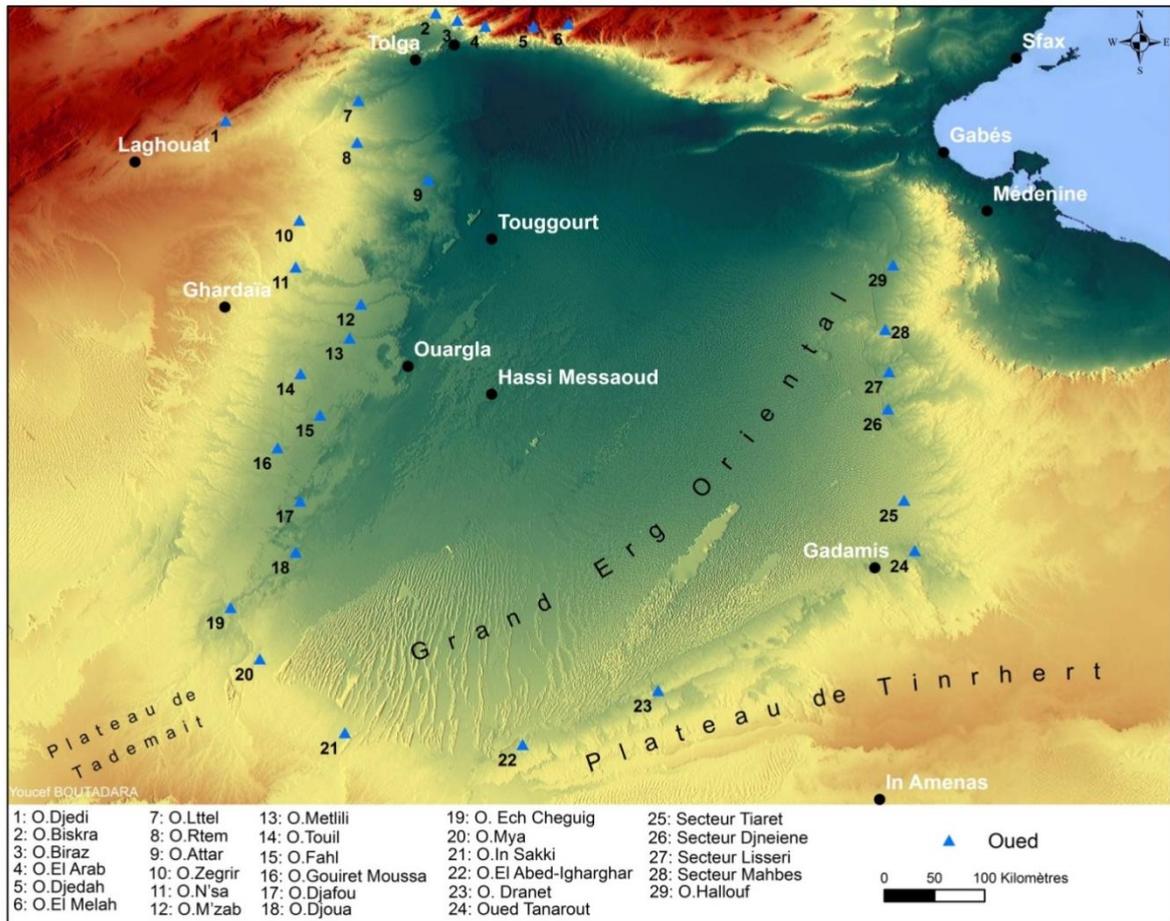


Figure 2-3: Bassin du Melrhir

2.3.1. Oued du Djedi

L'oued Djedi proprement dit peut être considéré comme le collecteur de la vaste gouttière qui s'étend entre l'Atlas saharien et le plateau des daïas. Entre Laghouat (Altitude : 752m) et Ouled Djellal (Altitude : 156m) l'oued Djedi reçoit une quinzaine d'affluents sur sa rive gauche et finit son parcours après 500m dans le chott Melrhir (Altitude : - 26m).

2.3.2. Oued Biskra

L'oued Biskra est formé par la réunion des deux grands oueds El Haï et Branis, l'oued Biskra prend sa source dans la région de Zgag (Aurès occidental), sur 2 000m d'altitude. Il se jette dans le Melrhir, à 25 m en-dessous du niveau de la mer, après un parcours de 194 km environ.

2.3.3. Oued Biraz

Cet Oued, relativement court (156 km), a son origine vers 1900m d'altitude et son extrémité dans le Chott Melrhir.

2.3.4. Oued El Arab

L'oued El Arab s'étend sur une longueur de 150 km environ, de son origine dans le Jebel Aïdel, vers 2100m d'altitude, à son embouchure dans le chott Melrhir.

2.3.5. Oued Zegrir

Les limites d'oued Zegrir sont peu précises. En prenant pour origine la tête de l'oued Ajerma. La longueur de l'oued principal, atteint 270 km à la Daïa ben Feïla, limite normale des grandes crues. Si l'on tient compte des écoulements exceptionnels qui empruntent la vallée de l'oued Zgag, celle-ci est portée à près de 300 km.

2.3.6. Oued Nsa

La longueur de son oued principal est de 320 km, part de la région de Tilremt, vers 750m d'altitude, pour aboutir à la Sebkh et Safioune, au Nord d'Ouargla, à la cote 107m.

2.3.7. Oued Mzab

L'oued Mzab coule sensiblement d'Ouest en Est sur 320 km de la région de Bohna Rouila, à 750 m d'altitude (où il prend sa source sous le nom d'Oued El Abiod), à la Sebkhet Safioune qui est à la cote 107 m.

2.3.8. Oued Metlili

L'Oued Metlili est barré à 134 km de son origine par le cordon dunaire de l'erg Rhanem. Plus en aval, son lit est parsemé de daïas qui absorbent une partie des eaux de ruissellement dont la plus importante est la Daïa Ghemta.

2.3.9. Oued Ittel

Cet oued prend son origine dans la région d'El Mengoub, à 475 m d'altitude. Il se jette dans le chott Merouane aux environs de la cote 20 m, après un parcours de 165 km.

2.3.10. Oued Retem

Il a une longueur de 190 km environ, en prenant comme tête l'oued Berriche, il coule sensiblement W-E de la région d'El Mchibigue, à 720m d'altitude, à la Daia d'Hassi Mrara située à la cote 100 m.

2.3.11. Oued El Attar

Cet oued prend son origine sous le nom d'Oued Bel Aroug dans la région du Ras Bel Aroug, vers 760 m d'altitude. Il se perd, après un parcours sensiblement O-E de 180 km, à quelques km du Chott de Dzioua. Il est encore susceptible de couler; mais aucune de ses crues n'atteint plus son ancien niveau de base le Chott de Dzioua, d'ailleurs envahi par les sables.

2.3.12. Oued de la Chebka méridionale

Les principaux oueds de la Chebka méridionale sont, du Nord au Sud, les oueds : Sebseb, Chouikat, Touiel, Fahl, Terhir, Bou Ali, Zirara, Gouiret Moussa, Djafou enfin Ben Barour. L'oued Metlili, par ses caractéristiques générales identiques à celles de ces oueds, devrait être compris dans cet ensemble.

D'une façon générale, ces différents oueds coulent dans le sens ONO-ESE de la cuesta occidentale à la vallée du Mya.

2.3.13. Oued Mya

L'oued Mya actuel prend son origine à l'Ouest d'Aïn el Hadjadj, vers 800m d'altitude. Ses crues, après un parcours de 400 km en direction du Nord-Est, se perdent, entre Saf-Saf et le cordon dunaire de Tinefdjaouine, vers la cote 200 m.

2.3.14. Oued In Sokki

L'oued In Sokki prend naissance à 815 m d'altitude. Après un parcours d'environ 280 km, il se perd dans la vallée du Saab Ferdjalla, avant d'atteindre le Mya.

2.3.15. Oueds Algérien du Tinrhert

Les oueds algériens du Tinrhert, en effet, de direction générale SSE-NNW, se perdent dans des daïas en aval. On distingue d'Ouest en Est :

- à l'Ouest de l'Igharghar les oueds El Abed, El Hadjadj et El Malah. Ils disparaissent dans des daïas en bordure de l'Erg ;
- à l'Est de l'Igharghar, on citera les oueds Ameskiki (alias Sidi-Moussa), Tabankort et Tissit.
- plus à l'Est on note les oueds Tamedjelt et Neïdi, assez démembrés dans leurs vallées terminales ;
- plus à l'Est encore, le réseau est confus, de vastes daïas et sebkhas parsèment le pays ; les oueds Ohanet, Adaoui, Tahala et Ekazouet se perdent dans la région de Timellouline;
- tout à fait à l'Est, le Tinrhert est drainé par les deux grands oueds Tin Fouchaye et Timissit qui confluent dans la daïa de l'erg Tin Rhales ;
- enfin, l'oued Mareksene, au NE du Tinrhert algérien, se perd à l'Ouest de Ghadamès.

2.3.16. Oueds Hamada Al-Hamra

La Hamada Al Hamra présente sur son bord Nord-occidental une succession de deux gradins, un inférieur profondément entaillé par les oueds, un supérieur infiniment plus vaste, parsemé de petites daïas ou Garaet. Les principaux oueds de ce versant sont :

- les oueds Amasin et Anebdan qui disparaissent dans les sebkhas de la région de Ghadamès et de Tounine ;
- Oued Tanarout, de beaucoup le plus important. Cet oued prend son origine au bord méridional de la Hamada el Hamra ; après un parcours de 180 km ;
- plus au Nord, des oueds un peu moins importants se perdent dans les dunes du Grand Erg Oriental, ceux sont les oueds El Bir, Ihar, Tiaret, Cherchouf, Merbia et Zar.

Au Nord du bassin de la Hamada, des oueds descendent du flanc sud de J. Nefusa. Il s'agit, en particulier, des oueds Nalut, Saniet El Asfa, Jadu, At Tall, Danaji, Al Hiram qui disparaissent vers le sud dans des dépressions.

Au NE, deux grands oueds (Wadi Sufajjin et Wadi Kaam) drainent les eaux de ruissellement vers la mer ; auxquels s'ajoutent des systèmes hydrographiques mineurs, Wadi Lebda, Wadi Majir plus au Nord Est.

2.3.17. Oueds de Matmata

De nombreux oueds descendent sur la face Ouest de la chaîne des Matmata; ils donnent l'impression d'un réseau hydrographique entièrement démembré à la suite de l'envahissement des basses vallées par les sables du Grand Erg Oriental, tous les oueds se terminent brusquement en bordure de l'erg dans de petites daïas, nous n'avons plus, maintenant, que de nombreux petits bassins reliques des grands bassins-versants des oueds disparus. On notera que des pertes par infiltration sont possibles tout au long de leurs vallées.

Le bassin des oueds Tieret et Montasseur (3 808 km²), celui des oueds Djeneïene et El Kheneg (6 060 km²), celui du Bir Aouine, groupant les oueds Rhedamsi, Guebli et Dahraoui et l'oued Lisseri (2 342 km²), celui groupant les oueds Mahbes et Bénina (2 202 km²), ceux de la Garaet Ali Tsemel, de la Garaet Bou Flidja, de l'oued Hallouf (3 396 km²) et enfin celui de l'oued Hassane. Tous ces oueds coulent, de nos jours, jusqu'à l'Erg et les daïas terminales peuvent rester en eau, un temps assez long [19].

2.3.18. Oueds septentrional des chotts Sud-tunisiens

On distingue d'Ouest en Est :

- deux grands oueds, Kebir et Seldja qui forment le bassin-versant du chott Rharsa sur 13 500 km²,
- l'Oued el Hamma et oued Magroun forment le bassin du Fedjej de 4 390 km².

2.4. Répartition et apports des pluies dans le territoire du Sahara septentrional

En utilisant les données pluviométriques de la période 1926-1950, Dubief en 1953 a pu établir une carte de distribution des pluies moyennes interannuelles dans le Sahara septentrional. La numérisation de cette dernière a permis de disposer d'une grille représentative de la pluie moyenne en tous points du domaine du SASS (figure 2-4).

Elle dénote l'inégale répartition des précipitations. Les quantités les plus importantes sont observées au nord, sur l'Atlas saharien, où les moyennes interannuelles sont de l'ordre de 200 à 250 mm. Le Dahar présente des moyennes comprises entre 80 et 150 mm. Sur le Jebel Nefusa et le long de la cote libyenne, les moyennes interannuelles sont comprises entre 80 et 250 mm. Ces régions sont les principales zones d'alimentation des nappes du

SASS. Le Grand Erg Occidental et le Grand Erg Oriental sont traversés par les isohyètes 40 à 80 mm. Les régions du Sud du bassin sont le domaine des faibles précipitations.

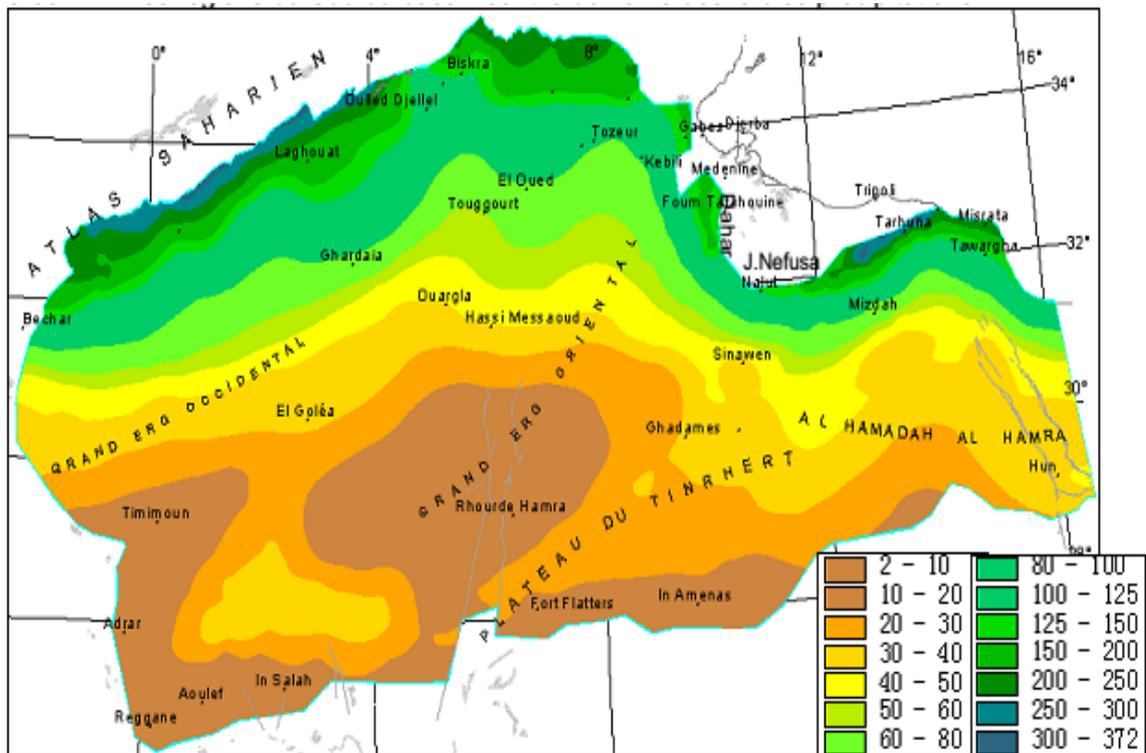


Figure 2-4: Carte des isohyètes dans le domaine du SASS [42]

2.5. Régime des pluies sur le territoire du SASS

2.5.1. Régime des pluies sur le territoire sud-tunisiens

D'une façon générale, la variation annuelle de la fréquence des pluies est caractérisée par un maximum d'hiver et un minimum d'été (juillet) (Tableau 2 -1).

Tableau2-1: Pluie moyenne mensuelle à la station de Matmata (1902-1977) (DGRE).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
S. Matmata (mm)	14,4	23,5	31,3	27,3	29,8	24,9	37,7	18,0	11,3	2,3	0,2	2,7

Les hauteurs annuelles des précipitations ont un caractère méditerranéen marquées avec leurs maxima en octobre novembre et en mars, séparées par un minimum relatif entre décembre et février et un minimum presque absolu en juillet. Autrement dit, les pluies sont fréquentes en hiver, mais relativement peu abondantes.

2.5.2. Régime des pluies sur le territoire Algérien

Les pluies annuelles et journalières ont fait l'objet d'une étude portant sur 23 stations pluviométriques (ci-dessous).

Les valeurs minimales des séries d'observations des pluies journalières maximales sont nulles pour l'ensemble des stations. D'après cette étude, le bassin-versant de l'Erg occidental est caractérisé par de faibles coefficients de variation et des pluies journalières maximales moyennes de 20 mm à 27 mm.

La plus grande irrégularité est enregistrée au niveau des stations de : Beni Abbes ($C_v = 1,09$; altitude = 497 m), Adrar ($C_v = 1,22$; altitude = 286), Reggane ($C_v = 1,51$; altitude = 267 m), du bassin de Saoura-Touat. Également, au niveau des stations de : Tindouf ($C_v=0,92$; altitude= 401 m), Tabelbala ($C_v = 0,97$; altitude = 588m) du bassin Iguidi Draa, Ideles ($C_v = 0,95$; altitude = 1400 m) du bassin Igharhar, Djanet ($C_v = 1,12$; altitude = 1100 m) du bassin Tafassasset et de la station d'In Salah ($C_v=1,49$; altitude =280m) du bassin de Tidikelt (tableau 2-2).

Dans le bassin du Melrhir, les observations de la pluviométrie dans une période 37 ans (1968/2004), montrent les valeurs moyennes sur 25 postes pluviométriques avec un coefficient de variation $C_v= 0,15$ (tableau 2-3).

Tableau 2-2 : Caractéristiques des pluies journalières dans le Sahara algérien [36].

Station	Bassin	Altitude(m)	1	2	3	4	5
Reggane	Saoura Touat	267	21,00	4,90	2,70	15,00	1,51
In Salah	Tidikelt	280	66,00	10,70	5,80	35,00	4,49
El Goléa	Erg Occidental	380	67,00	34,60	15,20	90,00	1,27
Adrar	Saoura Touat	286	78,00	13,50	7,40	35,20	1,22
Djanet	Tafassaset	1100	46,00	31,60	9,80	48,50	1,12
Beni Abbas	Saoura Touat	497	69,00	33,30	13,20	70,10	1,09
Tabelbala	Iguidi Draa	588	23,00	31,20	14,90	53,00	0,97
Ideles	Saoura Touat	1400	35,00	10,40	7,70	29,70	0,95
Tindouf	Erg Oriental	401	33,00	40,00	16,40	59,90	0,92
Bechar ONM	Saoura Touat	769	85,00	75,20	19,80	103,30	0,84
Ouargla	O.Tamanrasset	154	61,00	38,50	13,20	67,00	0,81
Beni Ouenif	Saoura Touat	825	47,00	112,50	28,00	123,10	0,78
Tamanrasset	O.Tamanrasset	1390	37,00	25,00	15,00	44,00	0,78
Igli	Saoura Touat	510	21,00	48,30	23,20	59,00	0,75
Ain Sefra	Erg Occidental	1072	61,00	129,30	25,00	91,70	0,72
Touggourt	Erg Oriental	45	35,00	78,30	12,80	33,40	0,71
Ghardaia	Erg Oriental	526	77,00	59,00	17,70	57,10	0,69
El Oued	Erg Oriental	70	62,00	62,10	19,60	58,00	0,67
El AbiedS.Cheikh	Erg Occidental	903	54,00	91,00	20,20	65,20	0,62
Brezina	Erg Occidental	927	22,00	65,80	15,50	33,00	0,58
Si A.Belabbes	Erg Occidental	1210	22,00	110,10	24,00	50,20	0,49
Bousemrhoun	Erg Occidental	985	20,00	130,40	27,00	51,80	0,38
ArbaTahtami	Erg Occidental	600	28,00	124,00	22,80	37,00	0,37

1: Nombre d'années d'observation.

2: Pluie moyenne interannuelle de la série d'observation (mm).

3: Valeur moyenne de la série d'observation des pluies journalières maximales (mm).

4: Valeur maximale de la série d'observation des pluies journalières maximales (mm).

5: coefficient de variation (Cv) de la série d'observation des pluies journalière maximales (mm).

Tableau 2-3: Pluviométrie à Biskra [37].

Bassin	Valeurs moyenne				Coefficient de variation			
	Val Min	Val Max	Moy	CV	Val Min	Val Max	Moy	CV
Chott Melrhir	93,00	404,90	237,00	0,49	0,30	0,48	0,40	0,15

2.5.3. Régime des pluies sur le territoire Libyen

Les données de pluies moyennes mensuelles ont été collectées aux stations de Nalut, Derj, Ghadamès, Kabaw, Sabha et Hun. Au centre des bassins Ghadamès et Derj et au Sud de Sabha et de Hun, la pluie ne dépasse pas 8 mm par mois ; tandis qu'au Nord, à Nalut, la moyenne mensuelle dépasse 9 mm, 8 mois sur 12. Aussi bien au Nord qu'au Sud, la pluie est virtuellement inexistante pendant les mois d'été. Le maximum de pluie est observé en mars (32 mm à Kabaw, 31 mm à Nalut, 7 mm à Ghadamès et Derj). Un second pic apparaît en octobre (7mm à Derj) ou en Hiver (Ghadamès). Au Sud, on note un maximum de pluie en octobre et en mai, à Hun. À Sabha, on observe la même quantité de pluie (1,6 mm) pour les mois de janvier, mai et octobre.

Par ailleurs, les observations faites aux stations de Ferjan, Jabal As Sawda, Brak et Idri, situées au sud du bassin montrent que la pluie moyenne annuelle est extrêmement faible pour la période d'observation considérée et que les valeurs sont comprises entre 15 mm à Quarqafet 43,2 mm à Brak.

Tableau 2-4: Pluviométrie moyenne mensuelle en Libye [40]

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Annuelle	Période (ans)
Nalut	21,0	20,0	31,0	18,0	10,0	2,0	0	2,0	7,0	15,0	16,0	16,0	158,0	81
Kabaw	27,0	22,0	32,0	13,0	3,0	2,0	0	1,0	5,0	5,0	21,0	29,0	160,0	-
Derj	2,0	4,0	7,0	3,0	2,0	0,0	0	0,0	0,0	7,0	2,0	3,	30,0	-
Ghadamés	4,0	6,0	7,0	2,0	2,0	1,0	0	0,0	1,0	4,0	4	5,0	36,0	63
Sabha	1,6	1,0	0,4	0,5	1,6	0,4	0	0,0	0,4	1,6	1,2	1,0	9,70	41
Hun	2,0	2,9	2,2	2,8	4,7	0,5	0	0,0	3,4	6,2	2,1	2,3	31,1	40

2.6. Précipitation, ruissellement et évapotranspiration dans le territoire du CI

D'après l'étude de l'OSS [39], les précipitations moyennes sont estimées à $1.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Sur les zones de ruissellement qui représentent environ 60% de la superficie totale, les précipitations moyennes sont de $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'alimentation effective du CI provient de l'infiltration de fortes pluies sur les affleurements de l'Atlas et du Dahar / Nafusa ou de leur ruissellement à travers les réseaux

hydrographiques jusqu'aux piémonts et vallées. Les plateaux, Tademaït et Tihert, sont également des zones de recharge mais nettement moins arrosées que les reliefs du Nord.

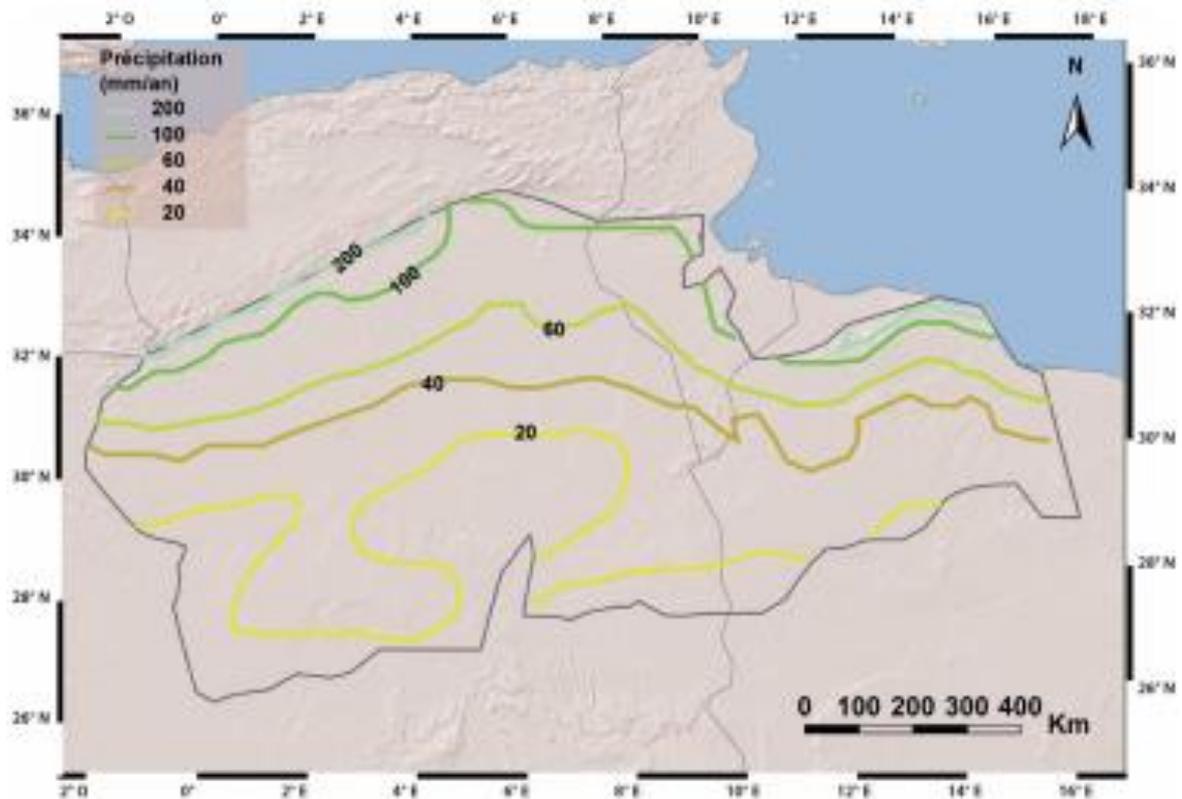


Figure 2-5: Carte des isohyètes sur le domaine du SASS [40]

L'OSS évalue le ruissellement moyen sur le SASS à $30 \text{ m}^3/\text{s}$ sur l'Atlas avec 60%, la dorsale du Mزاب 15% et le Dahar environ 5%. Cette étude considère que l'infiltration de la ressource pluviale calculée de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ est comprise entre 1 à 10% pour l'ensemble du SASS. Donc les flux infiltrés seraient entre 10 et 100 m^3 , dont $2/3$ pour le CT et $1/3$ pour le CI. En définitive, la valeur intermédiaire de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ sur le SASS est avancée, soit environ $10 \text{ m}^3/\text{s}$ du volume infiltré pour CI.

Les flux évaporatoires sont difficilement mesurables. En zone aride et semi-aride, ils sont principalement répartis entre l'évaporation (ET) partielle des précipitations (P) de l'équation du bilan ($P - Q - ET - \Delta S = 0$) ou l'évaporation d'une eau déjà infiltrée dans les zones de recharge ou comme un flux sortant dans les zones d'exutoire (la végétation intervient peu). Dans cette équation du bilan, si l'on donne $P = 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, le débit de précipitation est de $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, le volume infiltré, on obtient $ET = 970 \text{ m}^3/\text{s}$ (le terme de variation des réserves ΔS dues au pompage est négligeable dans le bilan ($\approx 3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$) et l'ordre de grandeur de taux d'évaporation (ET/P) est d'environ de 97% [26].

2.7. Conclusion

À l'instar d'autres régions désertiques, Le système hydrologique de la zone d'étude se caractérise par la rareté des précipitations et par conséquent des oueds souvent sans écoulements. Mais à l'occasion de fortes pluies dans le bassin de la Saoura, sur les bords du plateau de Tademaït, une partie importante des eaux s'écoule vers la zone d'étude, sur des formations en contact avec les nappes aquifères souterraines. Ces pluies sont inégalement réparties dans l'espace et dans le temps avec des quantités et des intensités très variables. La zone la plus pluvieuse avec un impact sur la zone d'étude est celle de l'Atlas saharien. Les précipitations sur cette zone provoquent des ruissellements considérables sur le Grand Erg Occidental à travers Oued Namous, Oued Rharbi, Oued Seggeur, Oued Zergoun, Oued Mehaïguène et Oued Louha. Ces eaux s'infiltrent dans les formations aquifères et provoquent la recharge aux limites sud-ouest de la formation Continental intercalaire.

Chapitre 3: Contextes géologique et hydrogéologique

Chapitre 3 : Contextes géologique et hydrogéologique

3.1. Introduction

L'objet de ce chapitre est de procéder à une analyse géologique et hydrogéologique succincte (description de la nature lithologique et définition de l'extension spatiale) des caractéristiques générales de la nappe de la région (le continental intercalaire). Cette analyse est basée sur la bibliographie existante et sur les données hydrogéologiques (coupes lithologiques des forages, résultats des pompages d'essai, bilans) collectées notamment auprès des différentes institutions locales.

3.2. Les affleurements de la formation aquifère dans le Sahara septentrional

Les coupes sur la carte ci-dessous (Figure 3-1) mettent en évidence les zones de recharge potentielles et les parcours qu'emprunteraient les eaux de pluie infiltrées aux reliefs de bordures (Atlas, Dahar, Sud du bassin, Nefusa, Hassawna) ou dans les ergs (Grand Erg Occidental ou Grand Erg Oriental) vers les profondeurs de la nappe.

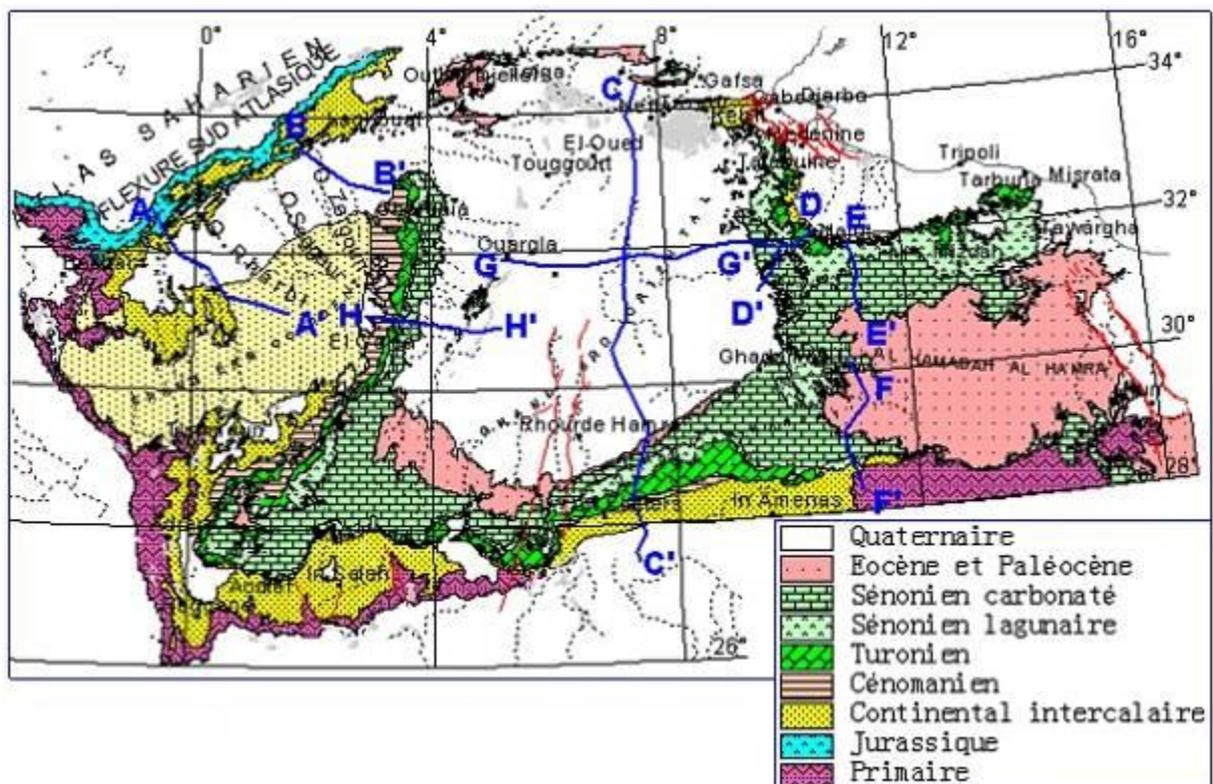


Figure 3-1: Carte de situation des coupes géologiques [40]

3.2.1. Atlas saharien Grand Erg Occidental (coupe A-A' et B-B')

L'enfouissement des formations du Continental intercalaire, affleurantes sur l'Atlas saharien, sous les formations tertiaires de la flexure sud-atlasique d'une part, et leur contact direct avec les sables du Grand Erg Occidental d'autre part. Elle met en évidence le déversement de la nappe superficielle du Grand Erg Occidental dans le Continental intercalaire sur tout le front du Gourara. Les eaux ainsi infiltrées passent sous le Tademaït et sont drainées vers le Touat. La moyenne pluviométrique dépasse 100 mm sur l'Atlas ; elle n'est que de l'ordre de 30 à 40 mm sur le Grand Erg Occidental.

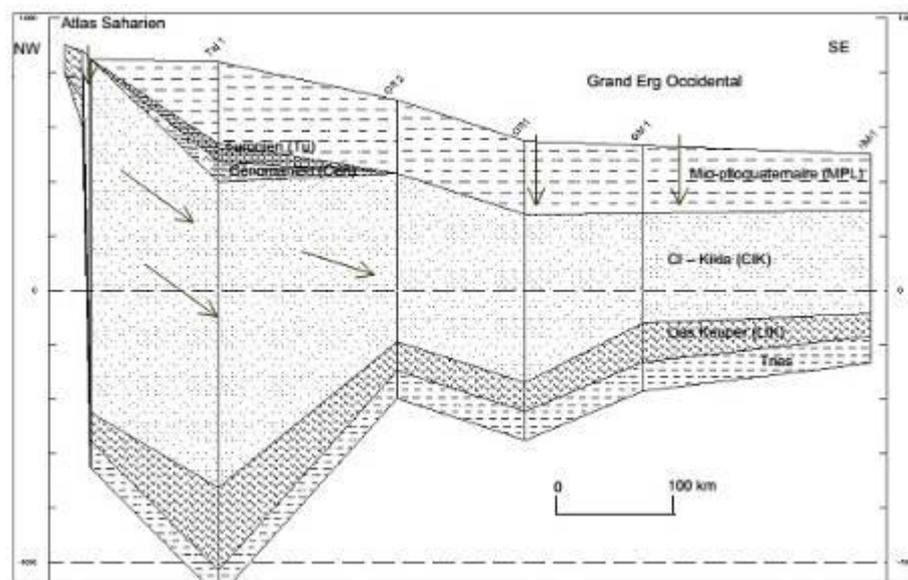


Figure 3-2 : Coupe A-A', NO-SE : Atlas saharien – Grand Erg Occidental

La coupe B-B' (Figure 3-3), au nord-est du Grand Erg Occidental, illustre aussi l'enfouissement du Continental intercalaire, sous les formations tertiaires. Mais à ce niveau, le Cénomanien argileux constitue un écran imperméable empêchant tout contact entre le CI et les formations tertiaires qui affleurent sur la dorsale du M'zab. Les flèches indiquent les cheminements éventuellement empruntés par les eaux d'infiltration.

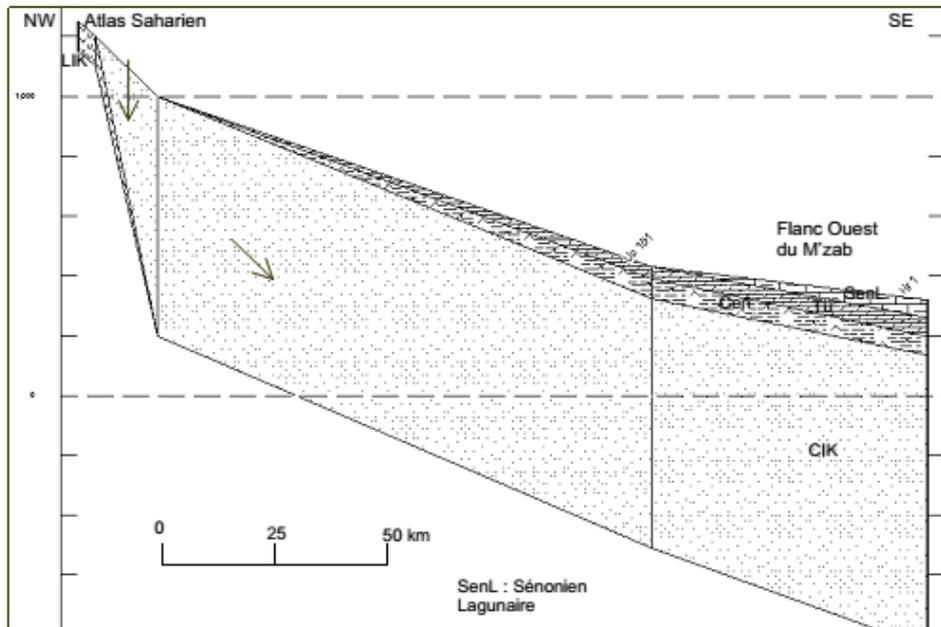


Figure 3-4: Coupe B-B', NO-SE : Atlas saharien – Grand Erg Occidental

3.2.2. Tinrhert - Sud Libye (La coupe C-C')

Cette coupe montre les affleurements de couches aquifères du CI au sud du bassin. Cet endroit constitue une zone de recharge potentielle de la nappe du CI.

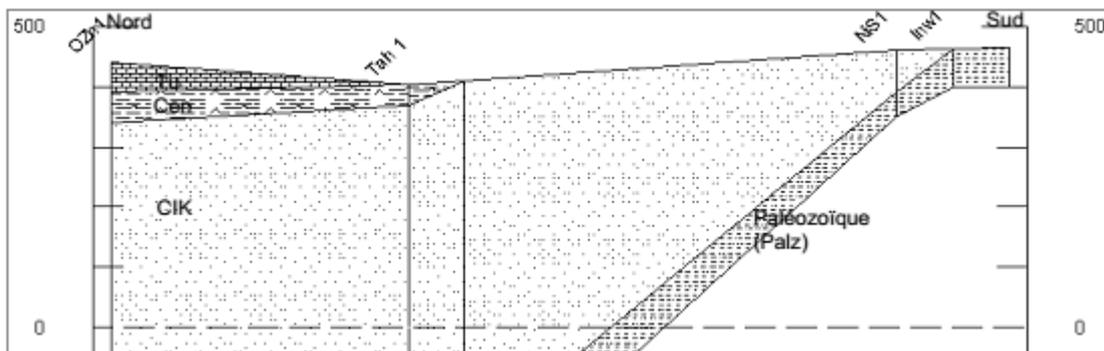


Figure 3-5: Coupe C-C', N-S à travers le plateau de Tinrhert

3.2.3. Dahar (coupe D-D')

La coupe D-D' montre le biseautage vers le nord-est du Sénonien lagunaire et du Cénomaniens mettant ainsi en contact les différentes formations aquifères : le Sénonien carbonaté et le Turonien d'une part ; le Turonien et le Continental intercalaire d'autre part. Le CI peut donc être alimenté directement sur ses affleurements et indirectement à travers les infiltrations sur les affleurements du CT.

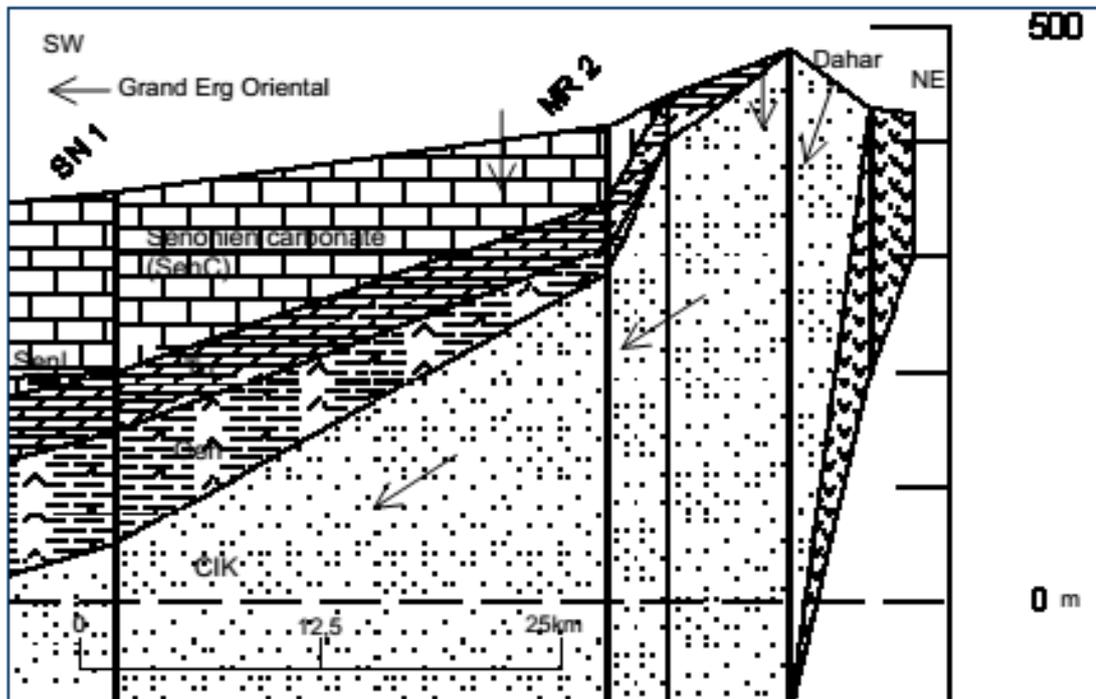


Figure 3-6: Coupe D-D', NO-SE : Dahar – Grand Erg Oriental

La pluie moyenne y est supérieure à 80 mm. Les eaux de pluie ou de ruissellement qui s'y infiltrent sont acheminées vers le centre du bassin où elles sont prises dans deux directions d'écoulement principales : vers l'Exutoire tunisien au nord, ou le golfe de Syrte au nord-est pour les eaux du CI ; vers les chotts Algéro-tunisiens au nord, ou Tawargha au nord-est pour les eaux du CT.

3.2.4. Jabal Nefusa (coupe E-E')

Cette coupe met en évidence les affleurements de couches aquifères sur le J. Nefusa et leur plongement vers le centre du bassin sous la plate-forme hamadienne. La pluie dans cette région n'est, cependant, pas négligeable (plus de 100 mm/an) par rapport à la moyenne annuelle saharienne (50 mm). Le J. Nefusa est, à ce titre, une zone de recharge potentielle des nappes du Sahara.

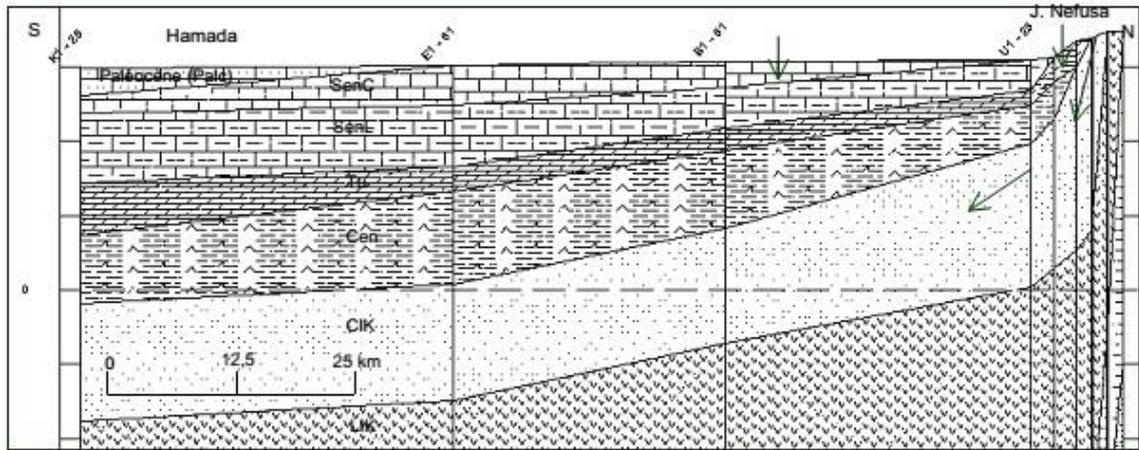


Figure 3-7: Coupe E-E', N-S: J. Nefusa – Al Hamada Al Hamra

3.2.5. Jabal Hassawna (coupe F-F')

La coupe fait apparaître les affleurements carbonifères du sud, et l'approfondissement du bassin sous la Hamada Al Hamra. Le biseautage des formations triasiques plus au Sud et l'absence de dépôts jurassiques met en contact étroit l'aquifère du Continental intercalaire avec les formations du Paléozoïque.

En effet, au niveau du Hassawna, le Continental intercalaire est alimenté par les eaux du Cambro-Ordovicien, infiltrées depuis les périodes humides du Sahara.

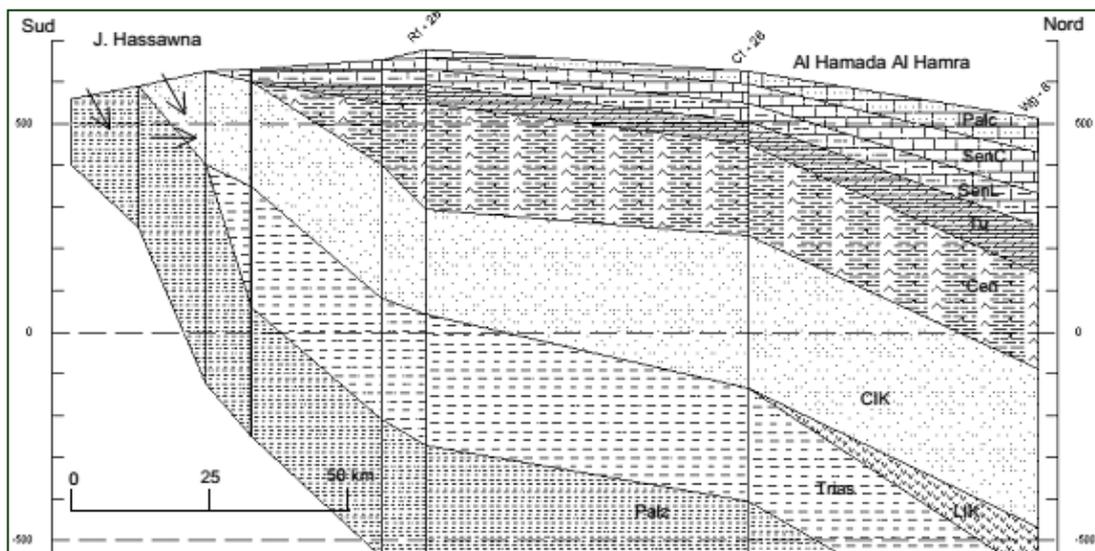


Figure 3-8: Coupe F-F', S-N: Al Hamada Al Hamra – J. Hassawna

3.3. Les affleurements utiles dans le système aquifère du Sahara septentrional

L'infiltration directe de la pluie s'effectue sur les affleurements perméables utiles; ceux-ci sont par définition situés dans les zones à nappe libre du continental intercalaire.

La délimitation exacte de la nappe libre du CI est rendue possible après élaboration de la carte du toit de la nappe du CI. Cette carte est obtenue par interpolation (sur un support cartographique) des valeurs de la cote du toit du CI, données par les forages recoupant les formations du Continental intercalaire. La soustraction de la grille représentant la piézométrie de référence (1950); l'une correspondant aux valeurs positives : c'est la zone à nappe libre (NL), et l'autre correspondant aux valeurs négatives : c'est la zone à nappe captive (NC).

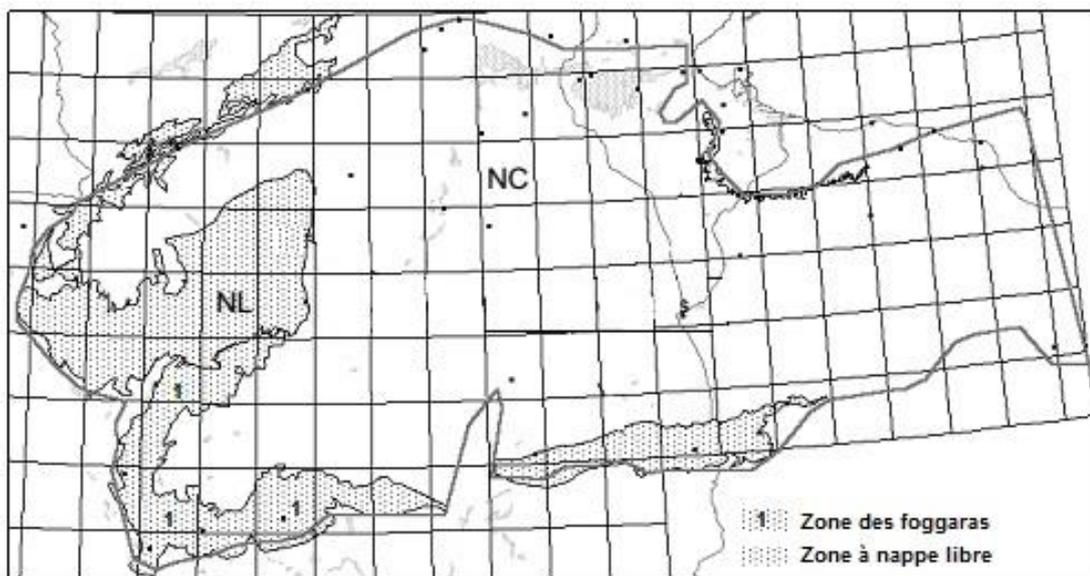


Figure 3-9: Affleurements perméables utiles du CI [40]

La zone des foggaras est l'une des zones les plus importantes dans les zones à nappe libre où cette région occupe les limites Sud-Ouest du continental.

3.4. La géologie de la zone d'étude

La superposition de la carte de la région des foggaras sur la carte géologique de l'Algérie (figure 3-9) montre que notre zone d'étude fait partie de la plateforme géologique du Sahara Nord Occidental. Elle comprend un socle précambrien recouvert de sédiments structurés au paléozoïque en plusieurs bassins séparés par des zones hautes. On distingue :

- Bassin de l’Ahnet Gourara : situé dans la partie centre-occidentale du Sud algérien, couvre une superficie de 121164 km². Ce bassin préserve une épaisse série sédimentaire allant du Cambro-Ordovicien au Carbonifère.
- Le bassin de Reggane : est limité au Nord par la bordure méridionale de la chaîne de l’Ougarta, qui le sépare de la cuvette de Sbâa, à l’Ouest par l’ensellement de Krettamia Bou Bernous, à l’Est par l’ensellement d’AzzelMatti et au Sud par le massif cristallin des Eglab. Le bassin couvre une superficie de 140 000 km².
- Le bassin ou la cuvette de Sbâa, situé au Sud-Ouest du Sahara algérien, couvre une superficie de 32 683 km². Il est limité au Sud-Ouest, par les chaînes de l’Ougarta, au Sud, par la zone haute de Bled El Mass, au Nord-Est, par le bassin de Timimoune et à l’Est, par le bassin de l’Ahnet et la voûte d’Azzène.

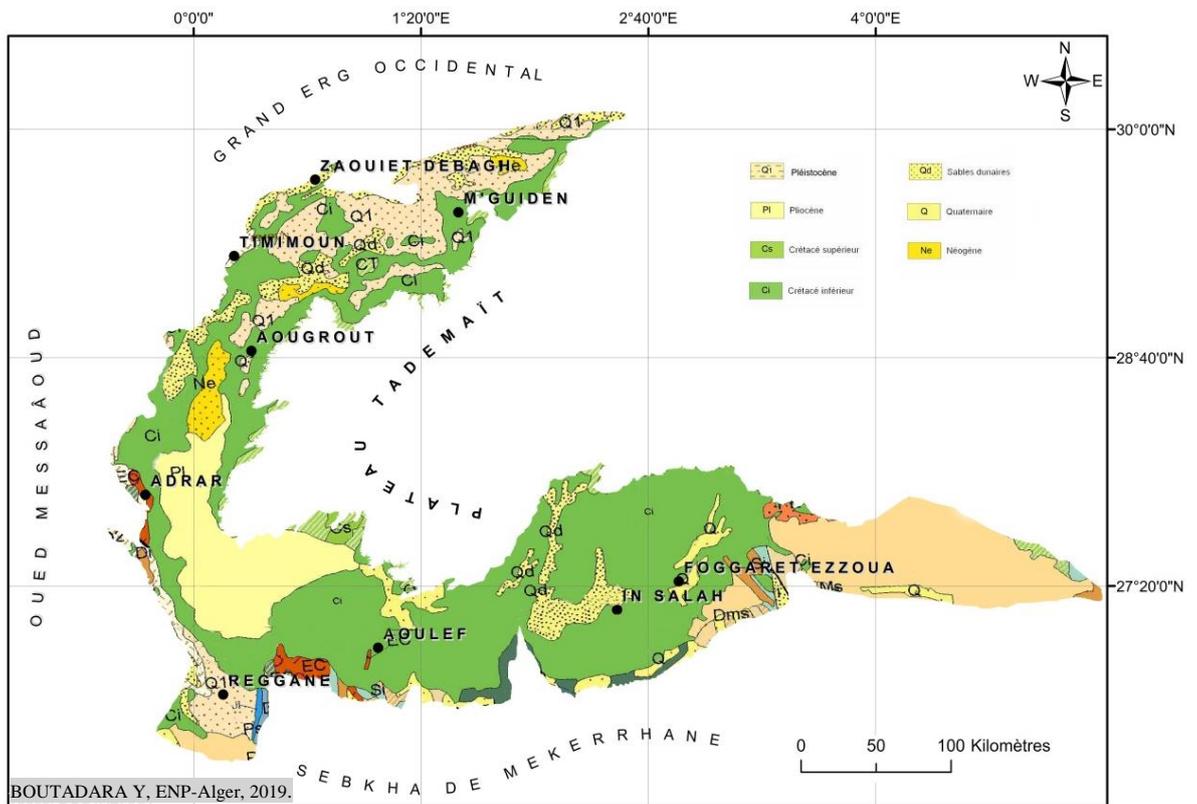


Figure 3-10: Carte géologique de la zone d'étude

3.4.1. Stratigraphie de la région d'étude

Sur la base des données recueillies, nous avons répertorié plusieurs couches stratigraphiques traversées. Certains ont été regroupés pour permettre une corrélation plus aisée des formations géologiques. Les étages datés du Primaire et les formations du socle, sont regroupés sous le nom du Paléozoïque, les séries datées du Lias au Malm ont été regroupées sous le Jurassique, les formations du Crétacé inférieur datées du Berriasien à l'Albien ont été regroupées sous le terme « Continental Intercalaire C.I ». Les formations géologiques de la région sont :

3.4.1.1. Le Quaternaire

Le Quaternaire est constitué de sable éolien et de sable argileux, représenté au Nord par l'Erg occidental et à l'Ouest et au Sud de la région par les dunes de l'Erg Chech et de la plaine du Tanezrouft.

3.4.1.2. Le Complexe Terminal

Les formations du Complexe Terminal affleurent la limite Ouest de la région d'étude par les formations du plateau de Tademaït. Elle comporte plusieurs étages géologiques assemblés dans une seule nappe, d'où provient le nom « complexe ».

3.4.1.3. Le Turonien

Il s'individualise en deux faciès :

- Le Turonien supérieur formé par des calcaires jaunes dolomitiques et d'argiles.
- Le Turonien inférieur formé par des calcaires blancs dolomitiques et marneux.

3.4.1.4. Le Cénomaniens

Le Cénomaniens est formé par une alternance de bancs de calcaire et dolomie, d'argile et d'évaporites (anhydrite ou sel). Son épaisseur est de 50 m, d'après la carte géologique de Timimoun, il forme la base du plateau de Tademaït. Nous constatons aussi que le Cénomaniens inférieur est argileux alors que le Cénomaniens supérieur est calcaire.

3.4.1.5. Le Continental Intercalaire

Les formations du Continental Intercalaire C.I affleurent en une auréole continue encerclant le massif du Tademaït, Nord Gourara jusqu'à l'Est d'In Salah, directement surmontées par les argiles du Cénomaniens. Au Nord-ouest, le CI affleure tout le long de l'Atlas Saharien,

au Sud et à l'Ouest, le CI repose directement sur les formations marines du Paléozoïque, qui forme en affleurement une ceinture continue de la vallée de la Saoura jusqu'à In Salah.

Cet ensemble comprend majoritairement des formations continentales grés-argileuses du Crétacé inférieur. On trouve les quatre couches de haut en bas :

- L'Albien : est constitué à la base par des grès et des sables dans lesquels s'intercalent des argiles et des argiles dolomitiques et au sommet par une dalle quartzitique.
- L'Aptien : est un bon repère géologique, généralement formé par un faciès calcaro-dolomitique appelé «barre aptienne» l'épaisseur de cet horizon est comprise entre 10 et 30 m.
- Le Barrémien : est constitué par des grès grossier à gravier, d'argile et des sables admettant des passées d'argiles.
- Le Néocomien : comprenant des argiles vertes et rouges avec de l'anhydrite en bancs massifs plus fréquents à la base, elles sont surmontées par une alternance de dolomie et d'argile. Dans notre région d'étude les horizons ci-dessus sont assemblés pour former une seule nappe homogène, le Continental Intercalaire au sens large, appelé aussi localement « la nappe Albienne ».

3.4.1.6. Le Jurassique

Cet étage est représenté par des argiles tendres légèrement sableuses parfois micacées admettant des passées de dolomie, grès et calcaire d'une épaisseur totale comprise entre 200 et 300 m. Le Jurassique inférieur et moyen (Lias-Dogger) comprend principalement des couches évaporitiques constituées essentiellement du sel et d'anhydrite. Les formations du jurassique supérieur sont formées par des intercalations d'argile, d'argile sableuse et de calcaire dolomitique.

3.4.1.7. Le Trias

Il est généralement représenté par une sédimentation de type lagunaire constituée d'argile, d'argile plastique, d'argile bariolée gypseuse, d'anhydrite parfois massive et de dolomie.

3.4.1.8. Le Paléozoïque

Les formations d'âges paléozoïques affleurent au Sud-Ouest de la ville d'Adrar vers l'oued Messâoud, elles plongent sous le recouvrement mésozoïque et cénozoïque jusqu'à son apparition à l'Est de Reggane. On trouve de haut en bas :

- Carbonifère : affleure près du ksar de Tiouririne par des couches de calcaire, d'argile et de gypse qui appartiennent au Namurien et par des grès, calcaire et argiles du Vasséen inférieur et supérieur, alors que le Tournaisien est représenté par des grès argileux.
- Le Dévonien : Il affleure essentiellement dans la région de Zaouiet Kounta sous forme de grès, de calcaire et d'argile.
- Le Silurien : est présent au Sud de la commune de Tamest par des argiles à graptolites.
- L'Ordovicien : Les formations d'âges ordoviciennes affleurent près du ksar de Tasfaout.

3.4.2. Les coupes géologiques

Pour plus de détails sur les diverses formations géologique dans cette zone, nous avons réalisé trois coupes géologique afin d'illustrer la géométrie et la disposition structurale des différentes couches géologiques.

L'examen de ces coupes montre :

- La continuité du découpage adopté d'un forage à l'autre.
- Les variations d'épaisseur des d'étages stratigraphiques. Ainsi les zones ayant un affleurement de la formation continental intercalaire sont celle de M'eguiden, la dépression du Touât, la région In Salah et Aougrout.
- La nappe du Continental intercalaire est en majeure partie libre et elle constitue de ce fait, une réserve en eau souterraine facilement accessible à l'aide d'ouvrages (Foggaras, puits et forages) de faible profondeur (quelques dizaines de mètres).

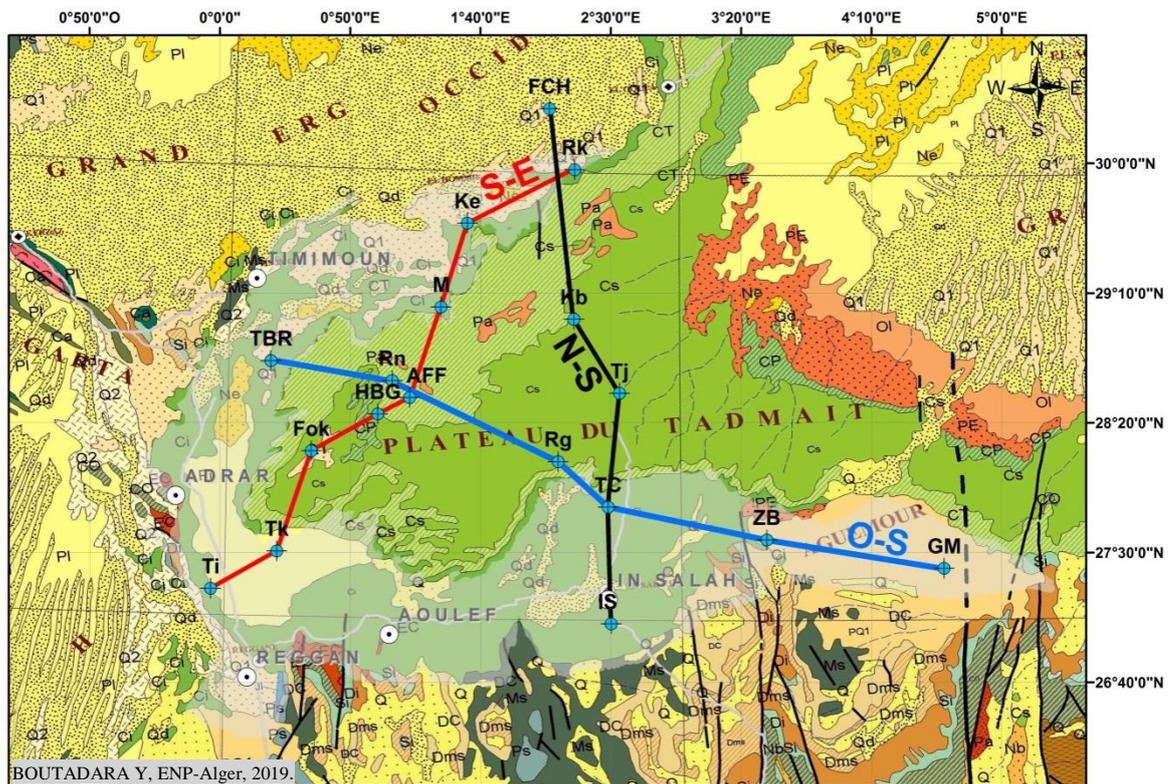


Figure 3-11: Coupes géologiques réalisées dans la zone d'étude

- **Coupe S-E** (Figure 3-11) : cette coupe traverse la partie Nord-Ouest de la région et montre le passage de la formation continental intercalaire vers le Sud-Ouest à Zaouiet Kounta. Elle affleure entre M - AFF au plateau M'eguiden et Tk -Ti à la dépression du Touat. Au plateau de Tademaït, elle présente une épaisseur qui varie jusqu'à 1500m.
- **Coupe N-S** (Figure 3-12) : elle traduit le passage du continental intercalaire à travers le plateau de Tademaït en son centre vers M'eguiden en présence des affleurements dans ces dépressions.
- **Coupe O-S** (Figure 3-13) : Un affleurement important du continental intercalaire à partir d'Aougrouit jusqu'à les limites où la dépression de Metarfa, cette formation constitue un réservoir aquifère important.

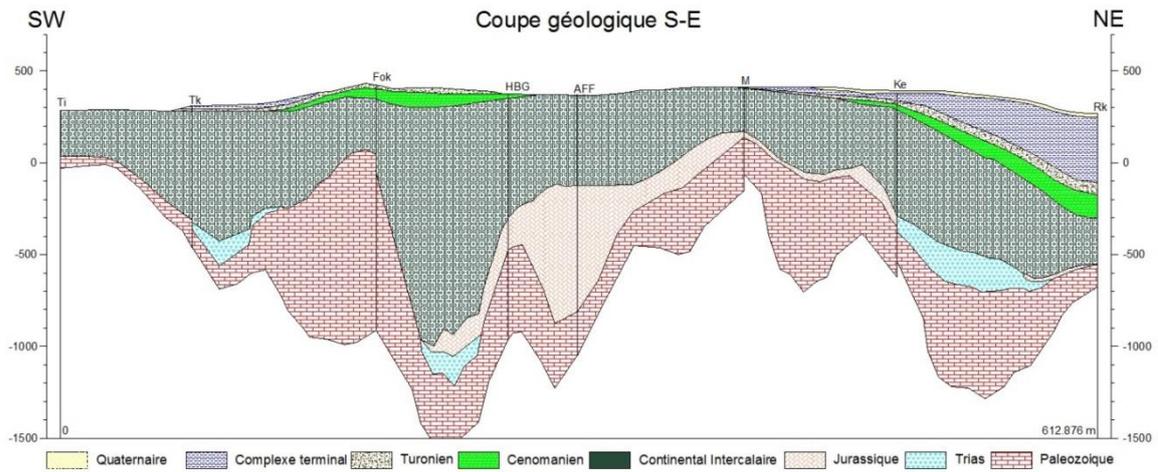


Figure 3-12: Coupe géologiques S-E dans la zone d'étude

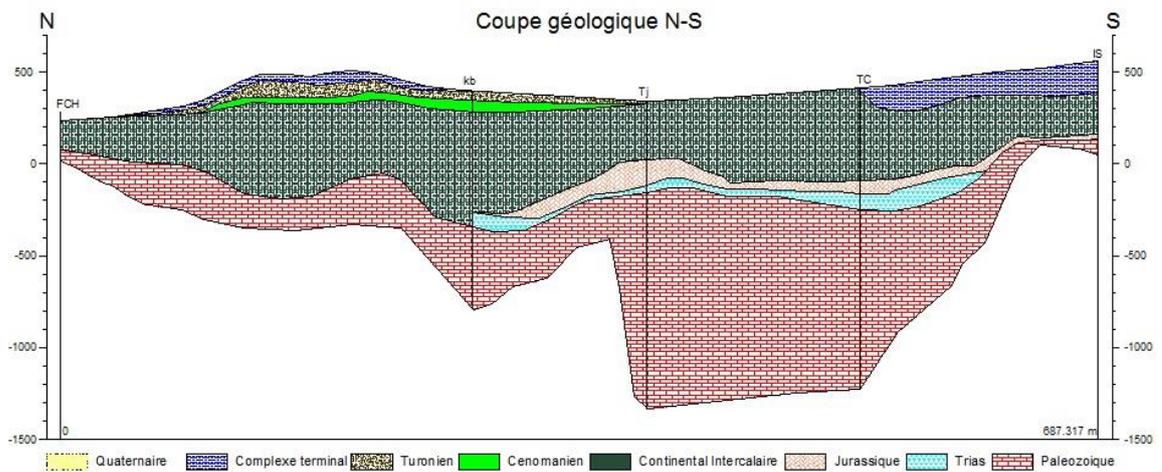


Figure 3-13: Coupe géologique N-S dans la zone d'étude

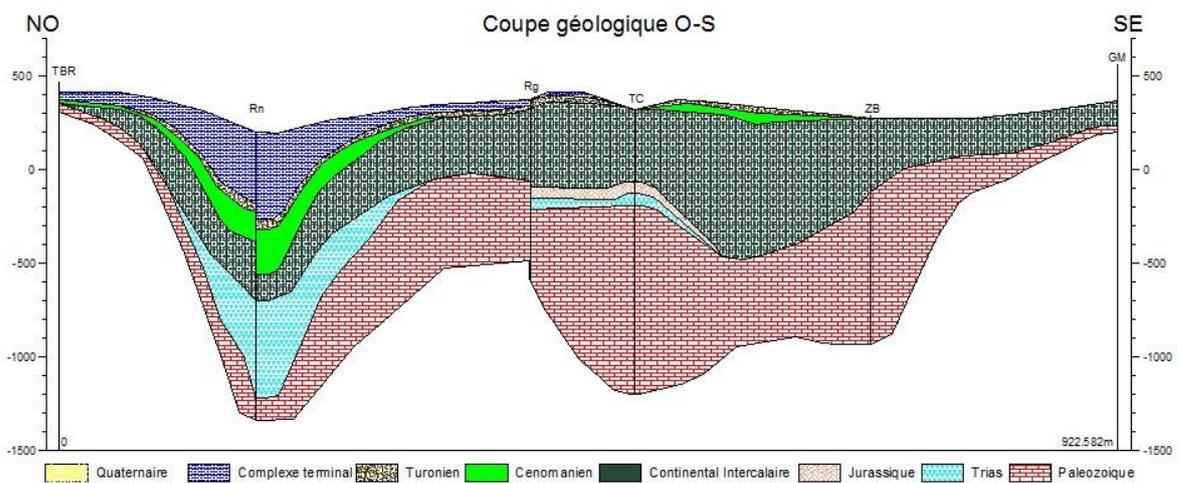


Figure 3-14: Coupe géologique O-S dans la zone d'étude

3.4.3. Profils géologiques

Les quatre profils géologiques P1, P2, P3 et P4 que nous avons élaboré (figure 3-14 et figure 3-15), montrent l’affleurement de la formation du Continental Intercalaire dans la partie Sud-Ouest du bassin et qu’elle repose directement sur des formations paléozoïques, ainsi que son prolongement vers l’Est sous la couverture du crétacé supérieur. Vers le Nord, le Continental Intercalaire affleure jusqu’à la limite des dépôts quaternaires de l’Erg Occidental où il est recouvert par les dunes de l’Erg.

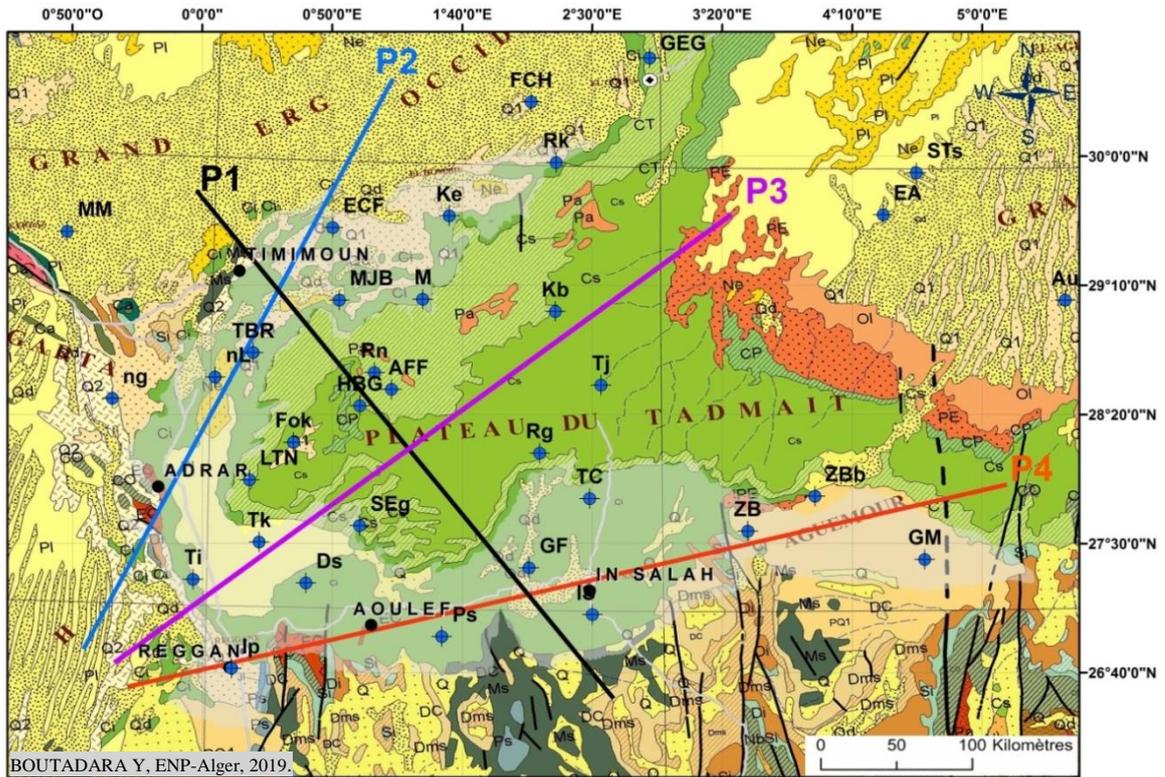


Figure 3-15: Profils géologiques dans la zone d’étude

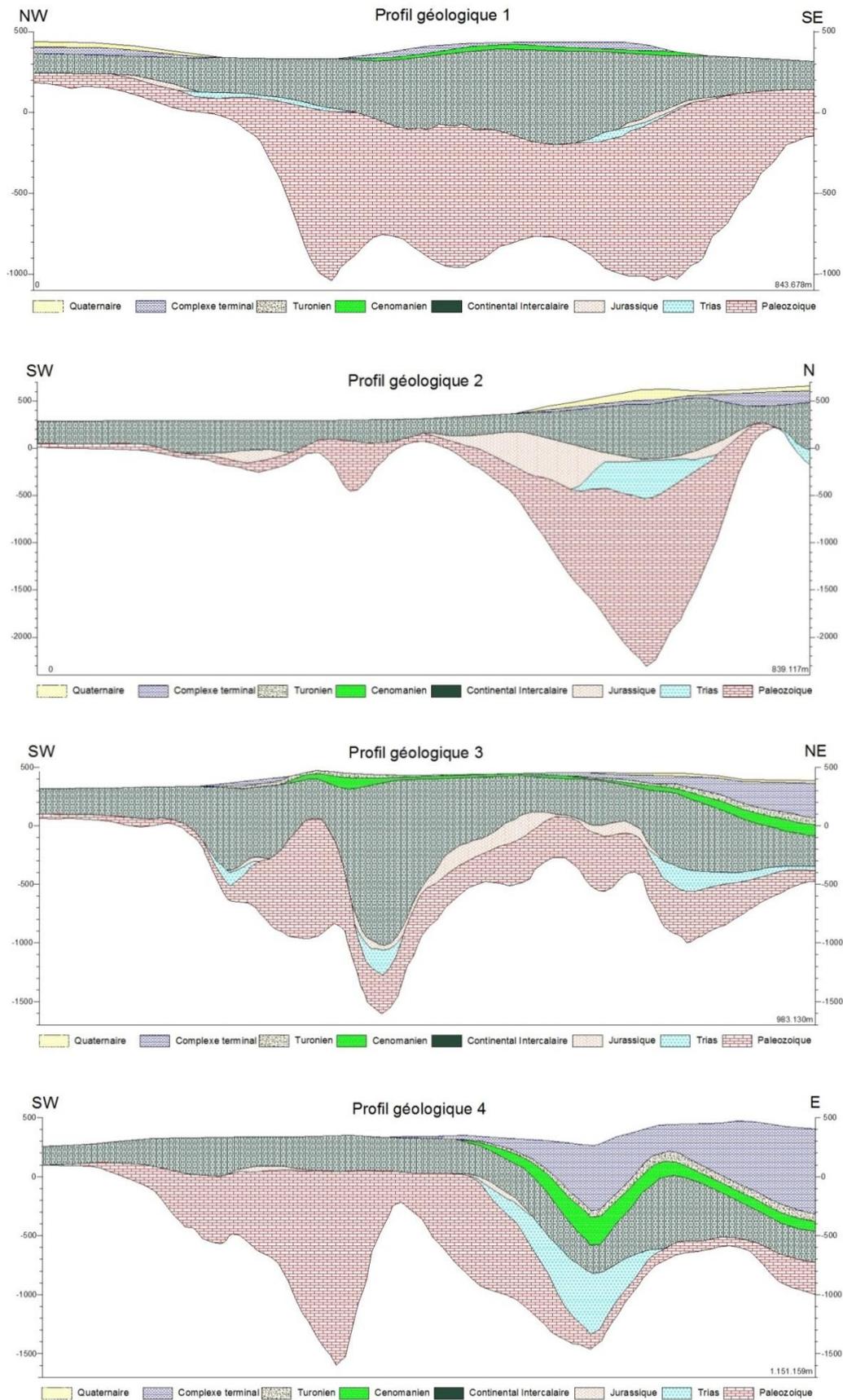


Figure 3-16: Profils géologiques de la zone d'étude

3.5. L'hydrogéologie de la zone d'étude

D'après les résultats des études UNESCO (1972) [53] et OSS (2003) [38], le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS), partagé par l'Algérie, la Libye et la Tunisie renferme des réserves d'eau considérables, qui sont cependant peu renouvelables et ne sont pas exploitables en totalité. Au cours des trente dernières années, l'exploitation par forages est passée de 0,6 à 2,5 milliards de m³/an. Cette exploitation se trouve aujourd'hui confrontée à de nombreux risques : salinisation des eaux, réduction de l'artésianisme, tarissement des exutoires, interférences entre pays.



Figure 3-17: L'extension des formations du SASS [51]

Le Système Aquifère Saharien désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes :

- a) La formation du Continental Intercalaire, CI, la plus profonde ;
- b) Le Complexe Terminal, CT.

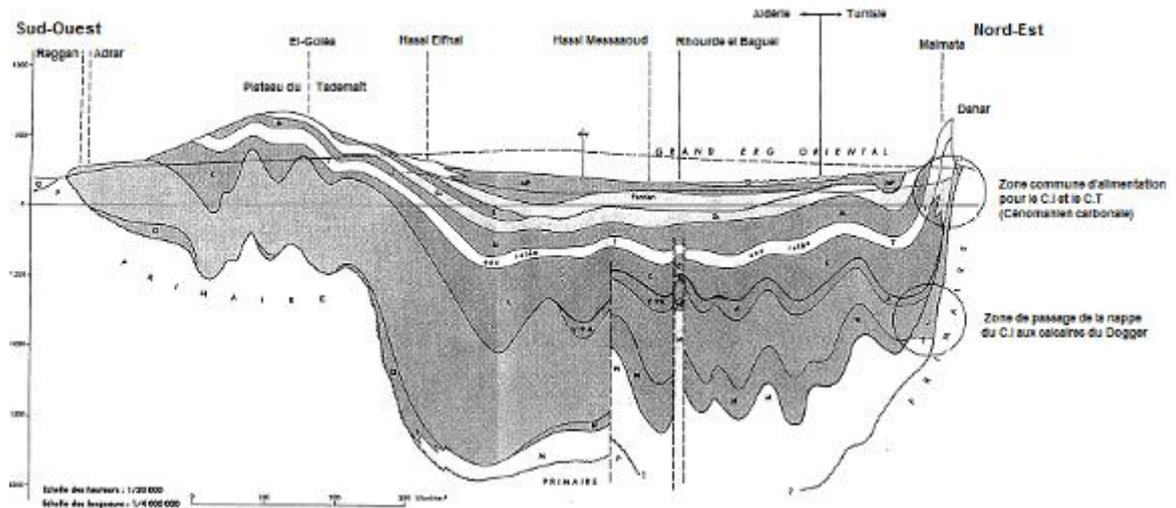


Figure 3-18: La coupe hydrogéologique à travers le Sahara [53]

Ce Système recouvre une étendue de plus d'un Million de km² dont 700 000 km² se trouvent en Algérie, près de 80 000 km² en Tunisie et 250 000 km² en Libye. Etant données les conditions du climat saharien, ces formations sont faiblement alimentées (environ 1 Milliard m³/an au total) et exploitées par près de 8800 points d'eau, forages et sources : 3500 au Continental Intercalaire et 5300 au Complexe Terminal. Par pays, ces points se répartissent ainsi : 6500 en Algérie, 1200 en Tunisie et 1100 en Libye.

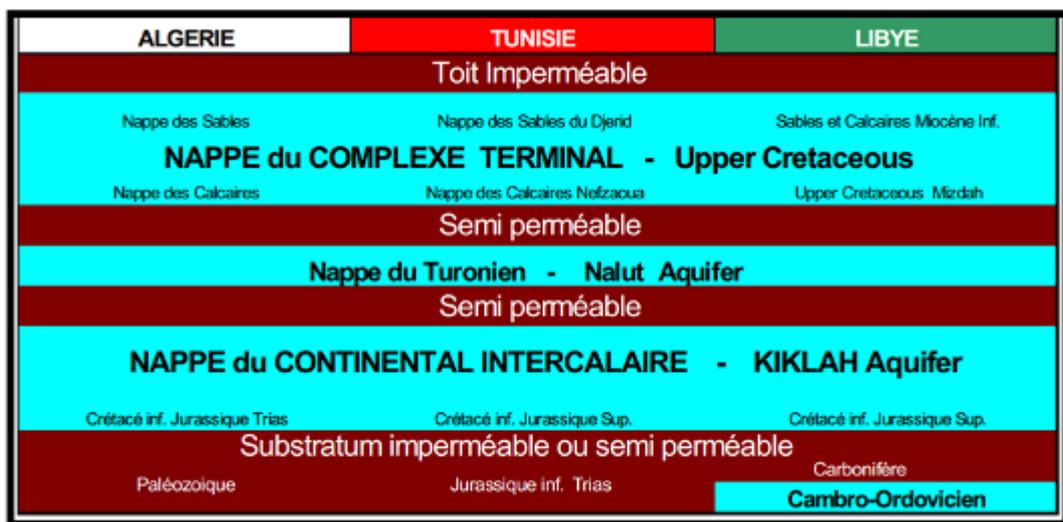


Figure 3-19: Schéma hydrogéologique du Système Aquifère du Sahara Septentrional [40]

3.5.1. La nappe du complexe terminal

Les formations du Complexe Terminal sont très hétérogènes. Elles englobent les assises perméables du Sénonien calcaire et du Mio-Pliocène sableux. On peut distinguer trois corps aquifères principaux qui sont séparés localement par des horizons semi-

perméables ou imperméables. Ces trois corps sont représentés par les calcaires et dolomies du Sénonien, les sables de l'Eocène Inférieur, les grès et les graviers du Pontien et les sables du Mio-Pliocène. La profondeur du Complexe Terminal est comprise entre 100 et 600 m.

Le volume des prélèvements dans le Complexe Terminal a atteint 16,3 m³/s pour le territoire algérien en 1998. Le niveau piézométrique est en baisse générale, ce rabattement deviendra catastrophique dans une trentaine d'années; il pourrait atteindre 200 m selon une étude réalisée conjointement par le ministère de l'agriculture, à travers le CDARS, et l'école Nationale Supérieure des Mines de Paris, C.I.G.

3.5.2. La nappe du Continental Intercalaire

Originellement, le terme « Continental Intercalaire » désigne dans l'histoire stratigraphique (Kilian), un épisode continental intercalé entre deux cycles sédimentaires :

- A la base, le cycle essentiellement marin du paléozoïque que clôt l'orogénèse hercynienne.
- Au sommet, le cycle marin que déclenche la transgression du Crétacé supérieur.

Cette nappe ainsi définie, occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base du Trias (localement Permo-Trias) et le sommet de l'Albien, est contenue dans des terrains argilo-gréseux qui forment sur la périphérie du bassin un ensemble géologique des bordures. Vers le centre du bassin on peut établir une séparation entre les couches et distinguer successivement des horizons crétacés (Albien, Aptien, Barrémien, Néocoinien), jurassiques et triasiques (Figure 3-18).

3.5.2.1. L'alimentation

La recharge actuelle du Continental Intercalaire s'effectue par infiltration :

- Ruissellements à la périphérie du domaine, tout au long et à l'extrémité des oueds qui descendent des massifs montagneux, notamment de l'Atlas saharien dans le nord-ouest et du Dahar à l'Est. Des ruissellements en bordure de plateau peuvent également participer à l'alimentation de la nappe, en particulier sur le bord occidental et méridional du Tademaït et sur le bord méridional du Tinrhert ;
- Des pluies d'années exceptionnelles sur le grand erg occidental, l'eau infiltrée traversant d'abord les sables dunaires, puis les formations perméables du complexe terminal avant

de rejoindre la nappe du Continental Intercalaire proprement dite. L'alimentation est facilitée dans cette région par l'absence de séparation imperméable (Sénonien inférieur et Cénomaniens) entre les deux systèmes aquifères.

Les isohyètes moyennes annuelles indiquées sur la carte (Figure 3-19), donnent une fausse idée des véritables possibilités d'alimentation de la nappe qui se produit au cours d'années à pluviométrie exceptionnelle pouvant atteindre jusqu'à 8 fois la valeur moyenne.

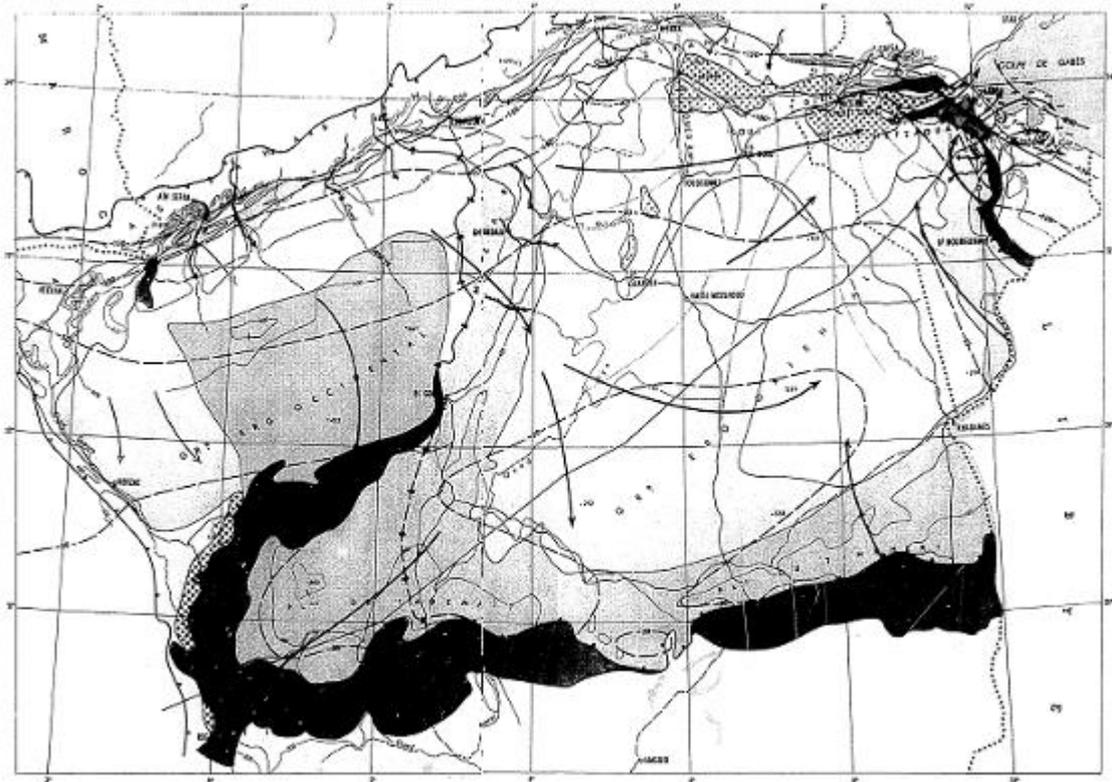


Figure 3-20: Carte hydrogéologique du SASS [53]

3.5.2.2. L'écoulement

Les directions de l'écoulement, matérialisées sur la carte (Figure 3-20) par des flèches montrent :

- Un écoulement ouest-est en provenance de l'Atlas saharien et en direction de l'étroit passage situé au nord-ouest de Medenine (exutoire Tunisie). Les eaux ayant franchi le passage, rejoignent les failles d'El Hamma et de Medenine, et la nappe de la zone côtière Tunisienne ;
- Un écoulement Nord-Sud, en provenance de l'Atlas saharien et en direction du Sud-Ouest du domaine (Touat, Gourara et Tidikelt) ;
- Un écoulement Sud-Nord, en provenance de la Libye et du Dahar Tunisien en direction également de l'exutoire Tunisien.

3.5.2.3. Les exutoires naturels

Actuellement, de véritables sources n'existent plus. Il est probable, cependant, que ce sont des sources qui sont à l'origine du creusement des foggaras dans la région d'étude Touat, Gourara et Tidikelt. Ces galeries drainantes ont un fonctionnement hydraulique analogue à celui des sources et constituent l'exutoire principal de l'écoulement nord-sud en provenance de l'Atlas saharien. Des analyses isotopiques ont montré cependant qu'une partie non négligeable de l'eau captée dans ces foggaras, avait une origine locale (présence importante de C14) et provenait de l'infiltration de l'eau sur les bordures du Tademaït.

Un autre exutoire naturel est constitué par des fuites verticales vers la nappe du complexe terminal et vers le Turonien, à la faveur des fractures qui jalonnent la dorsale d'Amguid-El biod.

Vers l'est, outre les percolations verticales dans la zone du Chott Fedjadj, l'exutoire principal est constitué par la nappe de la zone côtière tunisienne par l'intermédiaire des failles d'El Hamma et de Medenine.

3.5.2.4. Les exutoires artificiels

Ces sont ceux créés par l'homme :

- Les foggaras au sud-ouest qui peuvent être considérées comme des exutoires artificiels par suite de l'intervention de l'homme pour leur création ou comme des exutoires naturels par leur fonctionnement hydraulique ;
- Les forages dont le nombre est encore en augmentation, du fait de la très grande demande de captage dans la majeure partie du domaine.

3.5.2.5. La piézométrie

Jusqu'à les années 70 les débits d'exhaure sont restés constants dans la région des foggaras (Touat, Gourara et Tidikelt). Nous supposons donc que les niveaux piézométriques n'ont pas subi de fluctuation notable entre 1956 et 1970. Ces hypothèses ont d'ailleurs été vérifiées à posteriori à l'aide d'autres modèles en régime transitoire pendant cette même période [53].

D'après l'étude de l'OSS dans cette région, la baisse piézométrique observée entre 1956 et 2000 est souvent de quelques mètres : 5 à 20 m dans le Gourara, 3 à 28 m dans le Touat et de 5 à 10 m dans le Tidikelt.

La carte ci-après définit les écoulements de la nappe du Continental Intercalaire à l'état « naturel », peu ou pas influencé par les pompages. L'examen de la carte piézométrique de

référence du CI (Figure 3-20) met en évidence les zones d'alimentation, indiquées par les directions d'écoulement.

Les zones exutoires, suggérées par les points d'aboutissement des lignes de courant dessinées par la carte piézométrique sont :

- Le Touat-Gourara et le Tidikelt ;
- L'exutoire tunisien marqué par la faille d'El Hamma ;
- L'exutoire libyen au niveau d'Ain Tawargha.

L'anomalie piézométrique, sur la dorsale d'Amguid, ne peut être expliquée que par une drainance verticale vers le Complexe Terminal, à travers les failles de cette zone.

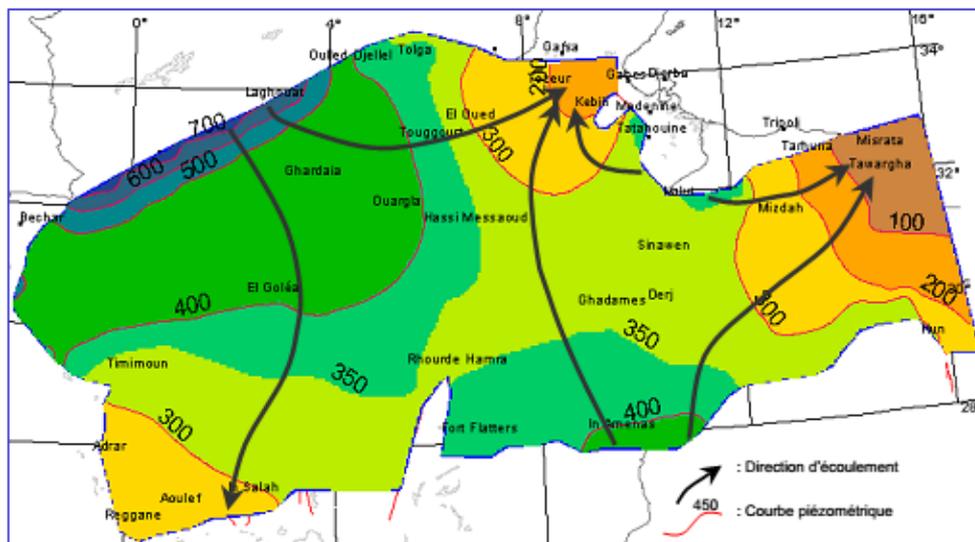


Figure 3-21 : Carte piézométrique de référence du Continental Intercalaire [40]

3.5.2.6. Conditions aux limites

Le long de notre région du Gourara, du Touat et du Tidikelt, il a été adopté une limite à potentiel imposé, afin de déterminer la transmissivité de cette zone mal connue par le calage en régime permanent (le calage devait restituer correctement les débits de l'exutoire constitué par les foggaras).

À l'est du Tidikelt, la carte piézométrique suggérait l'adoption d'une limite à flux nul qui a été prolongée le long de la dorsale d'Amguid, autour de la zone haute sans Continental Intercalaire.

3.5.2.7. La Transmissivité

Les forages captant le Continental Intercalaire ne pénètrent que partiellement le réservoir dont l'épaisseur dépasse parfois 500 m. En conséquence, les valeurs de la transmissivité déduites des essais hydrodynamiques varient en fonction de l'épaisseur de la formation captée et sont rarement représentatives de la transmissivité totale du réservoir. Pour cette nappe dans le bassin du grand Erg occidental, les valeurs de la transmissivité déterminées par pompage d'essai sur les forages sont généralement comprises entre 10 et $30 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Quelques valeurs plus faibles ont été enregistrées au Tidikelt.

3.5.2.8. Le Coefficient d'emmagasinement

Dans notre zone les valeurs du coefficient d'emmagasinement sont de l'ordre de $0,05$ dans la partie où le CI est libre et entre $0,005$ et $0,0004$ sous le Grand Erg Occidental et le plateau de Tademaït, là où le Continental Intercalaire s'enfonce et la nappe devient captive sous le recouvrement du crétacé supérieur du plateau de Tademaït.

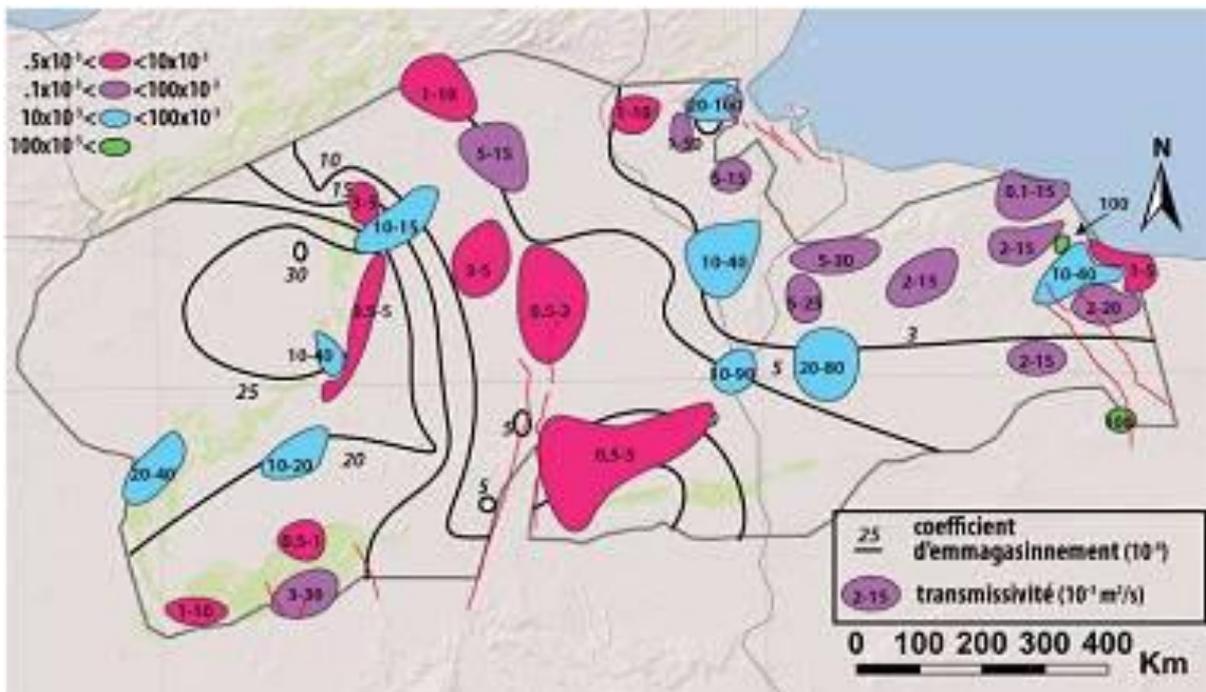


Figure 3-22: Carte de transmissivité et de coefficient d'emmagasinement [26]

3.5.3. Estimation de la recharge de la nappe du C.I

L'immensité du système aquifère du Continental Intercalaire C.I (plus d'un million de km^2) rend l'estimation de ses réserves très difficile. Plusieurs études ont été réalisées pour l'estimation de la capacité de son réservoir mais ces études ne tiennent pas compte de toute la partie du système aquifère. Concernant la recharge du Continental Intercalaire, elle s'effectue

d'une façon directe sur les zones d'affleurement du piémont de l'Atlas saharien au Nord-Ouest, du massif du Dahar à l'Est et des rebords Ouest du plateau de Tademaït et au Sud du plateau du Tinrhert, elle est estimée selon plusieurs auteurs à :

- L'étude BURGEAP (1963) : 15,25 m³/s [13];
- JADE ORIANE Petersen (2014): 15 m³/s [26];
- OULD BABA SY M, (2005) : 9,37 m³/s [42];
- OUALI S et al (2007) : 8,50 m³/s [41];
- BELLAL Sid-Ahmed et al (2017) 8,49 m³/s [7];
- SAHRI Lielaet al. (2017): 7,70 m³/s [50].

3.5.4. La géométrie du Continental Intercalaire

D'après l'étude de l'Unesco 1972, le terme continental intercalaire désigne dans l'histoire stratigraphique, un épisode continental intercalé entre deux cycles sédimentaires [53] :

- À la base, le cycle essentiellement marin du paléozoïque que clôt l'orogénèse hercynienne,
- Au sommet, le cycle marin que déclenche la transgression du crétacé supérieur.

Le continental intercalaire ainsi défini, occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base du Trias (localement Permo-trias) et le sommet de l'Albien.

Cependant, cette définition du continental intercalaire « *sensu largo* » a l'inconvénient d'englober d'importants volumes sédimentaires d'origine lagunaire ou marine, qui se sont déposés au Sahara au cours des incursions de la mer venant du golfe de Gabése et pénétrant plus ou moins profondément vers le sud-ouest. Ces dépôts lagunaires ou marins sont généralement imperméables ou bien sont remplis d'eau salée dans les quelques horizons aquifères existants.

Etant donnée le but poursuivi par l'étude qui est avant tout celui de définir les caractéristiques du réservoir profond à eau douce, il est apparu nécessaire de limiter le continental intercalaire aux seules formations classiques (argilo-gréseuses) véritablement continentales et susceptibles de constituer un ensemble aquifère homogène, tout au moins dans sa définition lithologique.

3.5.4.1. Le toit du Continental Intercalaire

Sur les bordures du Grand Erg occidental et sous les plateaux du Tademaït et du Tinrhert, le continental intercalaire est considéré comme Crétacé inférieur. Sur le plateau du Tinrhert, la

série d'In Akamil pose souvent un problème car elle est tantôt argilo-gréseuses, tantôt argilo-calcaire ou argilo-gypseuse ; contrairement à certains auteurs, on ne l'a fait entrer dans le continental intercalaire qu'aux forages où elle est à prédominance argilo-gréseuse.

Dans le reste du Sahara, le continental intercalaire débute presque toujours au toit de l'Albien. Deux exceptions toutefois : la zone de Belhirane où il comprend le Vraconien (période de transition entre l'Albien et le Cénomaniens) et l'est Tunisien où il commence dans l'Albien et même le Barrémien.

3.5.4.2. Le mur

Le mur du réservoir utile est, généralement, confondu avec le mur du continental intercalaire sur les bordures ouest, sud et Est du Sahara. Les deux niveaux s'écartent plus ou moins progressivement en allant vers le centre du bassin où ils sont séparés par toute l'épaisseur du Néocomien argileux et salé.

Au Nord-Ouest du réservoir, il est brutalement passé du Malm inférieur au Barrémien supérieur, par suite du développement des argiles.

Le mur du réservoir semble affecté par toutes les failles connues au mur du Continental Intercalaire. Certaines de ces failles ont des rejets très importants.

3.6. Conclusion

La zone d'étude c'est l'extension sud-ouest du Continental intercalaire et s'étend sur une grande superficie. Cette partie appartient au Bassin du Grand Erg occidental où ce bassin est en affleurement, il représente en majeure partie un aquifère libre et constitue de ce fait, une réserve en eau souterraine facilement accessible. Les formations du continental intercalaire ont des épaisseurs qui atteignent en moyenne 325 mètre sous les séries Albiennes du Tademaït et sont érodées sur ce plateau jusqu'à se qu'elles se terminent en biseau sur le paléozoïque affleurant dans les bordures par un chapelet de Sebkhass qui constituent l'exutoire des eaux souterraines autour desquelles la nappe, à faible profondeur de l'ordre de 10 à 30 m et qui dépasse les 100 m sous le recouvrement du plateau de Tademaït, est exploitée par forages, puits et foggaras dans l'axe reliant Gourara à Tidikelt. Plusieurs études hydrogéologiques ont montré que les zones de recharge du système aquifère du CI sont essentiellement localisées en Algérie au niveau de la chaîne de l'Atlas Saharien, du plateau du Tinrhert et du Grand Erg Oriental. Une recharge locale a été identifiée dans les affleurements du Crétacé localisés sur le dôme du Dahar en Tunisie.

Les exutoires sont des sources qui ont été à l'origine du creusement des foggaras dans la zone d'étude. Dans ces zones une partie du débit non capté par les foggaras est évaporée au niveau des sebkhas qui occupent le fond des dépressions ou des vallées et une autre partie s'échappe au sud-ouest de Reggane vers le bassin de Taoudeni [11].

*Chapitre 4: Conception d'une base de données sur les
ressources en eau souterraines*

Chapitre 4 : Conception d'une base de données sur les ressources en eau souterraine.

4.1 Introduction

L'étude du système traditionnel de captages des eaux souterraine (foggaras) d'une région qui appartient à un grand aquifère, nécessite d'abord la construction d'une base de données contenant toutes les informations acquises pour l'analyse et la maîtrise du système. La reconnaissance structurale et hydrogéologique de cette région se fait souvent par la réalisation des analyses et l'interprétation de certaines données piézométriques, de pompages d'essai, des altitudes, des profondeurs, des niveaux statiques et des niveaux dynamiques et des ouvrages d'exploitation des eaux souterraine.

L'estimation des paramètres hydrodynamiques de la nappe dans cette région et de sa productivité se fait sur la base de pompages d'essai au niveau des ouvrages (puits et forages). L'étude piézométrique s'est fait par le biais des données de l'agence nationale des ressources hydrique (ANRH) et des investigations réalisées sur terrain et suivies récemment par une caractérisation spatiale.

La conception d'une base de données cartographique des ressources en eau souterraine dans la région des foggaras répond parfaitement aux soucis de stockage, d'actualisation, de traitement, d'exploitation et de gestion des données et constitue aussi de véritables outils d'aide à la prise de décision. À ce propos, l'utilité des SIG, couplés avec la géostatistique, se sont avérés être des outils et des méthodes bien adaptés à l'identification et la gestion des ressources en eau souterraines.

L'objet de cette partie est l'actualisation et la synthèse de l'information rassemblée sur les ressources en eaux souterraine dans la zone d'étude située aux limites sud-ouest de la formation continentale intercalaire en Algérie. Cette partie a permis d'améliorer la connaissance hydrogéologique particulièrement au niveau de la partie d'affleurement de la nappe aux pieds du plateau de Tademaït où se trouvent ainsi les foggaras du Gourara, du Touât et du Tidikelt. Ces connaissances concernent à la fois la géométrie de la nappe, la répartition spatiale des points d'eau et les paramètres hydrodynamiques.

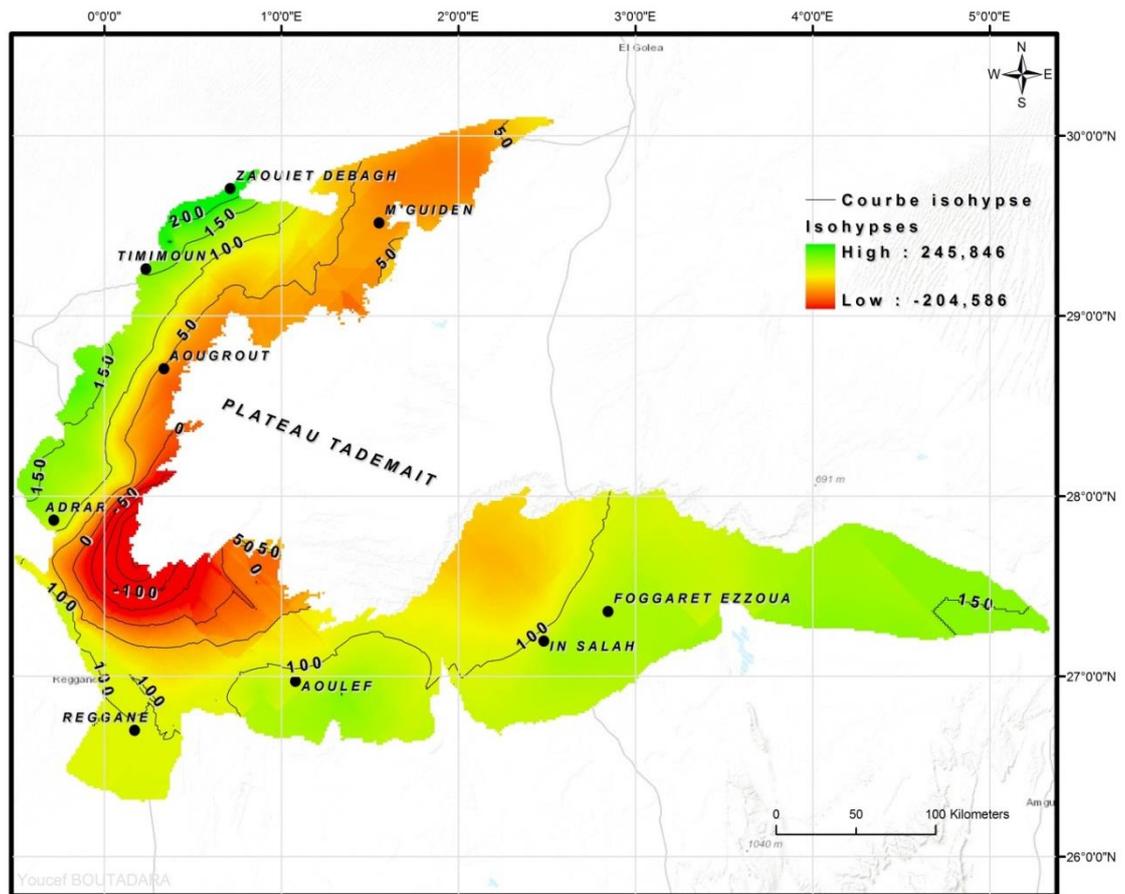
4.2 La géométrie du continental intercalaire dans la zone d'étude

La base de données sur la géométrie et la structure de l'aquifère dans la zone étudiée provient de l'ensemble des données géographique, géologiques et hydrogéologique analysées précédemment. Cette base de données nous a permis d'élaborer plusieurs cartes à savoir :

- Carte du toit du substratum ;
- Carte de l'épaisseur de la nappe ;
- Carte des isobathes.

4.2.1. Carte du toit du substratum

Dans la zone d'étude, le toit du continental intercalaire s'approfondit du sud-ouest vers le nord-est. La partie la moins profonde (100 à 200 m) se situe sur les bordures des biseaux Zaouit Debagh, Timimoun, Adrar, Reggane, Aoulef et In Salah. Il devient un peu plus profond à proximité du plateau de Tademaït 50m au Gourara, (0 à 250 m) dans le Touat et (80 à 60 m) au Tidikelt (Figure 4-1).



4.2.2. Carte de l'épaisseur de la nappe

L'épaisseur moyenne de la nappe est de l'ordre de 225 m. Elle est la plus importante (150 à 300m) dans la partie orientale de Gourara et Touat et 150 à 200 m dans la partie nord du Tidikelt. Sur le long des bordures Nord-Ouest et Sud de la zone, la nappe est au contraire caractérisée par de faibles épaisseurs (généralement inférieures à 50 m), résultat de la remontée du substratum dans cette zone (Figure 4-2).

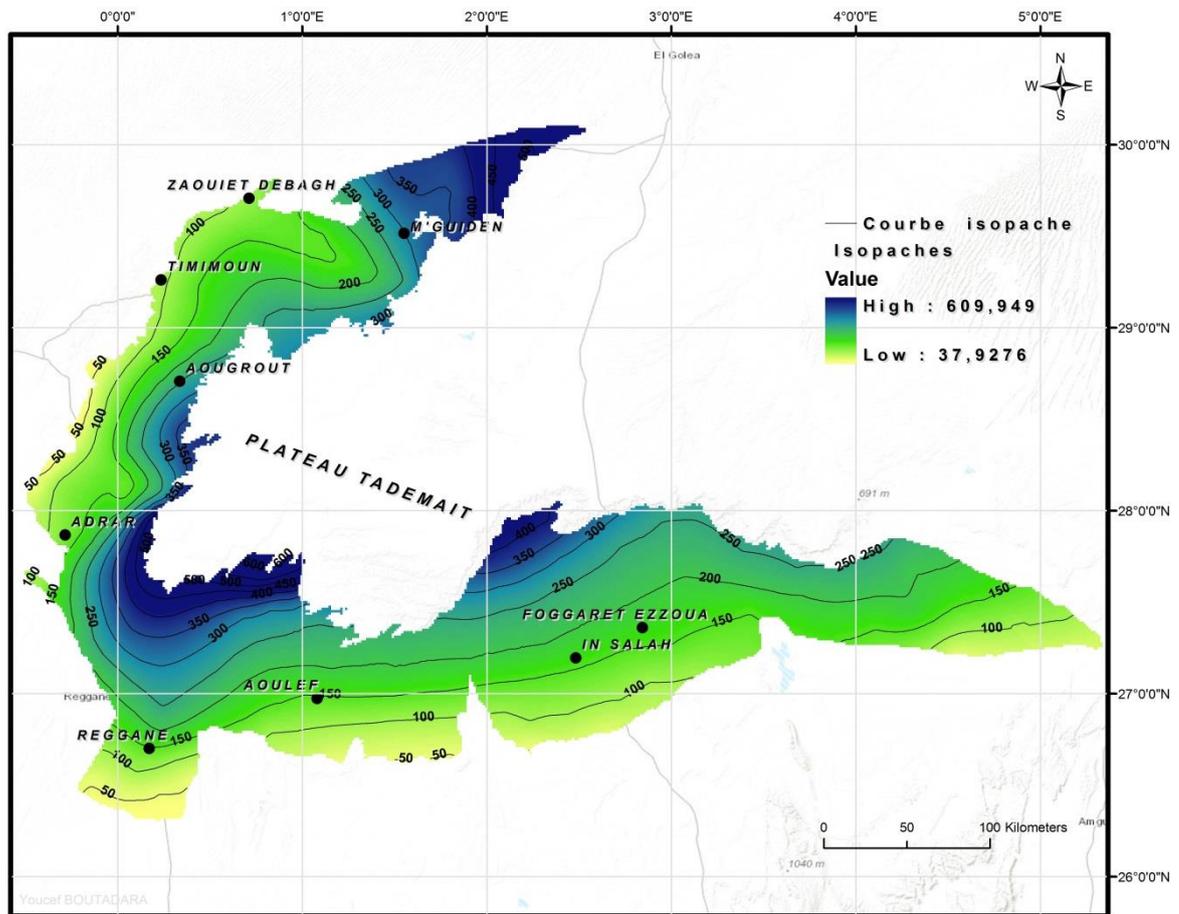


Figure 4-2: Carte de l'épaisseur de la nappe

4.2.3. Carte de la profondeur de la nappe

La carte (figure 4-3) montre que sur la majorité de ce territoire affleure la formation du continentale intercalaire renfermant une réserve en eau facilement accessible : des profondeurs de 10 à 20m à Zaouit Debagh, Timimoun, Aougrout et Adrar et des profondeurs 40 à 60m à M'guiden, Reggane, Aoulef et In Salah. Les ressources en eau souterraine sont donc importantes, mais le plus souvent à faible profondeur, ce qui les rend vulnérables à la pollution et à la salinité.

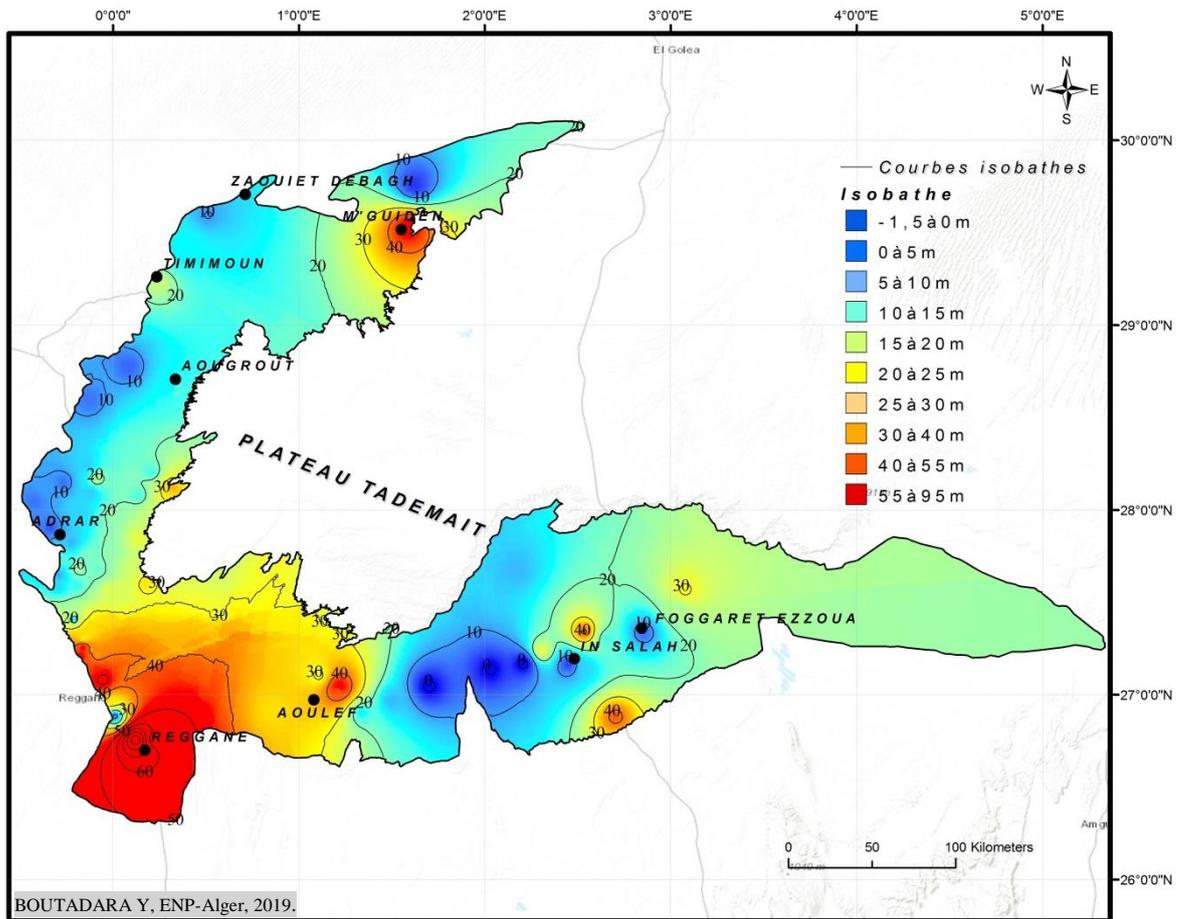


Figure 4-3: Carte de la profondeur de la nappe

4.3. Les données des foggaras

La base de données intègre 704 foggaras ainsi que leurs caractéristiques (longueur, distance et profondeur). L'inventaire et les rapports des investigations sur les foggaras fournies par l'observatoire de la foggara ont été menés pendant la période 2013 - 2016 en collaboration avec les associations des foggaras et ont été considérés comme base d'information sur le système d'exploitation des eaux souterraines.

Toutes les données des foggaras sont réparties sur la bordure de Ksour, où nous avons enregistré 496 Foggaras à Touât, 128 à Gourara et 80 à Tidikelt. Les données des puits des foggaras introduits dans la base de données sont au nombre de 97 018 (Figure 4-4) et se répartissent par commune comme indiqué dans le tableau ci-après.

Tableau 4-1: Répartition des foggaras par communes

Sous-région	Commune	Nombre Foggaras	Nombre Puits
Gourara	Timimoun	63	6 812
	Ouledsaid	9	3 360
	Aougrouit	28	1 429
	Deldoul	11	4 889
	Metarfa	17	5 148
Touat	Tsabit	26	4 904
	Sbaa	4	207
	Adrar	7	3 066
	Bouda	23	1 648
	O.A.timmi	16	653
	Tamentit	49	7 304
	Fenoughil	50	4 221
	Tamest	82	9 079
	Zetkounta	130	12 990
	Inzeghmir	39	3 105
	Sali	35	5 364
	Reggane	35	4 010
	Tidikelt	Aoulef	11
Timekten		22	6 956
Tit		6	851
Akbli		13	2 735
Inghar		11	2 864
In salah		17	2 831
Total		704	97 018

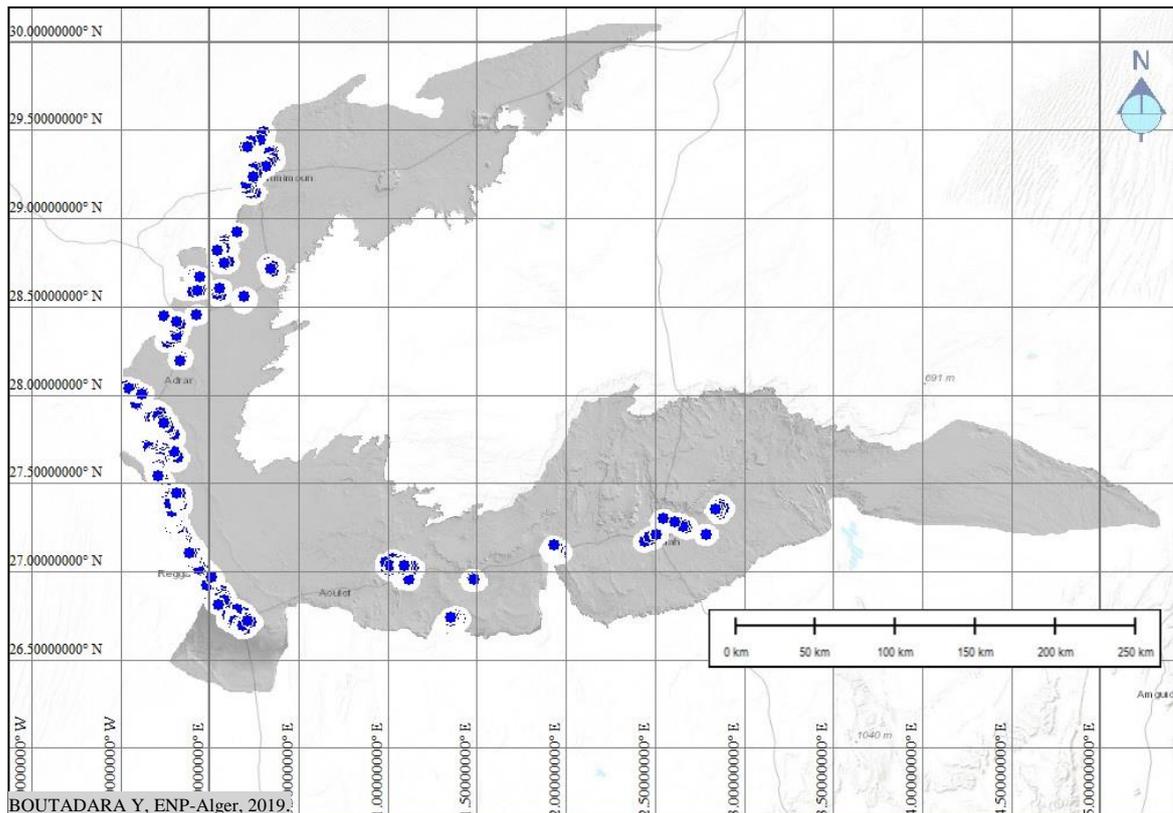


Figure 4-4: Répartition spatiale des données des foggaras

4.4. Les données piézométriques

Les données piézométriques utilisées en 2007 sont constituées des piézomètres, des puits de pâturage et des puits agricoles non exploités.

En 2016 à travers les inventaires des forages existants, nous avons sélectionné un ensemble défini de mesures piézométriques récentes qui nous ont permis de déterminer une série piézométrique comprenant 86 points mesurés en 2007 et 2016. Ces mesures ont été limitées uniquement aux zones ayant une importance agricole et urbaine. Les informations relatives à chaque ouvrage suivi (N°, nature, coordonnées Géographique X,Y et Z et la hauteur du repère) et les résultats des mesures (profondeur du niveau statique et date correspondante) sont consignés dans des tableaux et archivés.

Au vu des insuffisances enregistrées dans l'inventaire au sujet de la répartition piézométrique et qui ne couvre pas totalement le territoire étudié, nous avons effectué durant la période allant du 05/01/2016 à 20/10/2016 des enregistrements piézométriques dans les endroits qui représentent un manque d'information dans la base de données. Nous citons en particulier la zone de Oued Ghzala et Oued Zine à Adrar, le périmètre agricole de Timmi, la commune d'Ouled Said dans le Gourara, la zone pastorale de M'Guiden et la

localité de Tganet de la commune de Tinerkouk où nous avons pu ajouter 31 points de mesures piézométriques pour alimenter notre base de données et avoir une répartition spatiale qui couvre l'ensemble de la zone d'étude.

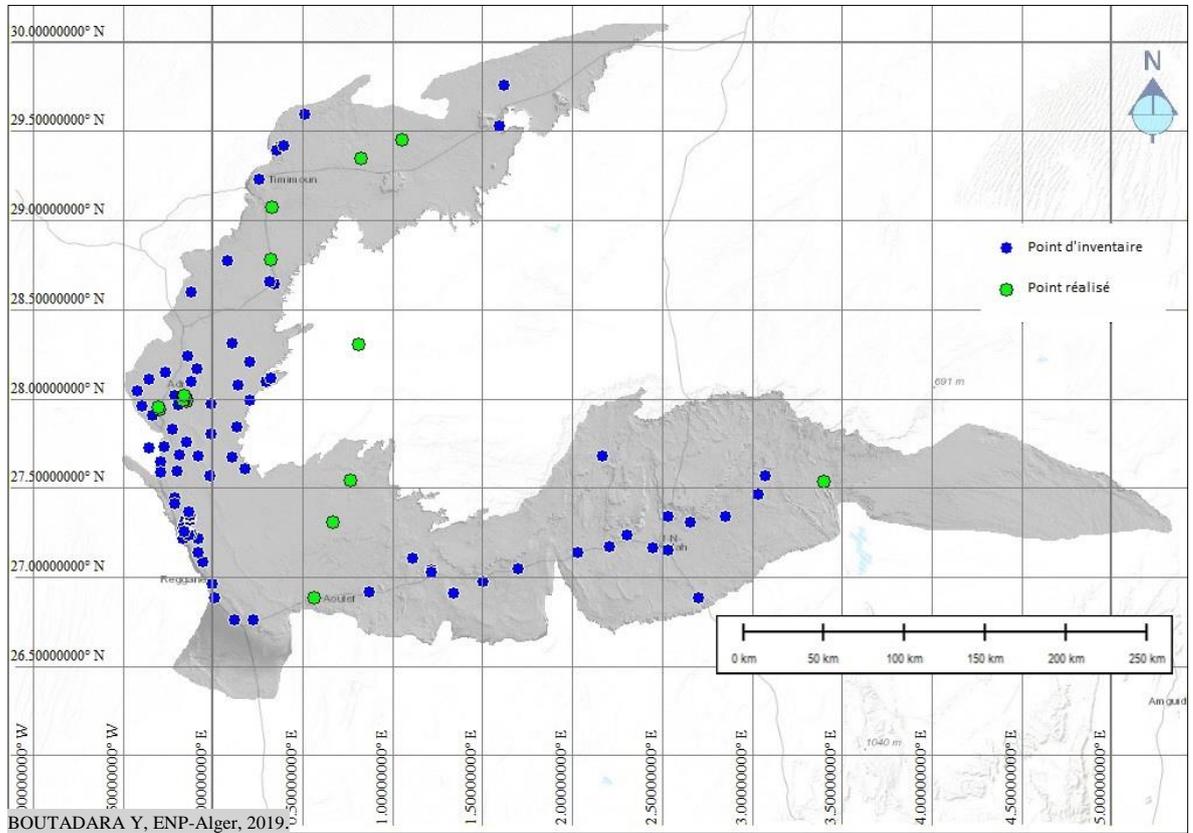


Figure 4-5: Répartition spatiale des points de mesures piézométriques

Les niveaux piézométriques sur la zone d'étude varient d'un maximum de 320 m vers M'guiden à un minimum inférieur à 200 m à Reggan. L'écoulement souterrain dans la nappe se fait du plateau de Tademaït vers les zones des exutoires sur les bordures de la zone d'étude, avec des variations locales causées principalement par le gradient hydraulique dans ces localités (figure 4-6).

Aux pieds du plateau de Tademaït dans la partie du Tidikelt, l'écoulement souterrain s'effectue dans le sens sud puis sud-ouest de deux dômes piézométriques vers les creux de Foggaret Ezzoua et d'In Salah. Dans la partie amont du Gourara et Touat, les niveaux piézométriques suivent généralement le gradient hydraulique de bassin du Grand Erg Occidental vers le Sud puis le Sud-Ouest.

Dans la partie aval, certaines dépressions sont encaissées dans les dépôts jusqu'à la Sebkhass et la carte piézométrique montre qu'elles agissent comme un drain sur l'aquifère dans l'axe reliant Adrar à Reggane et la bordure avale d'In Salah.

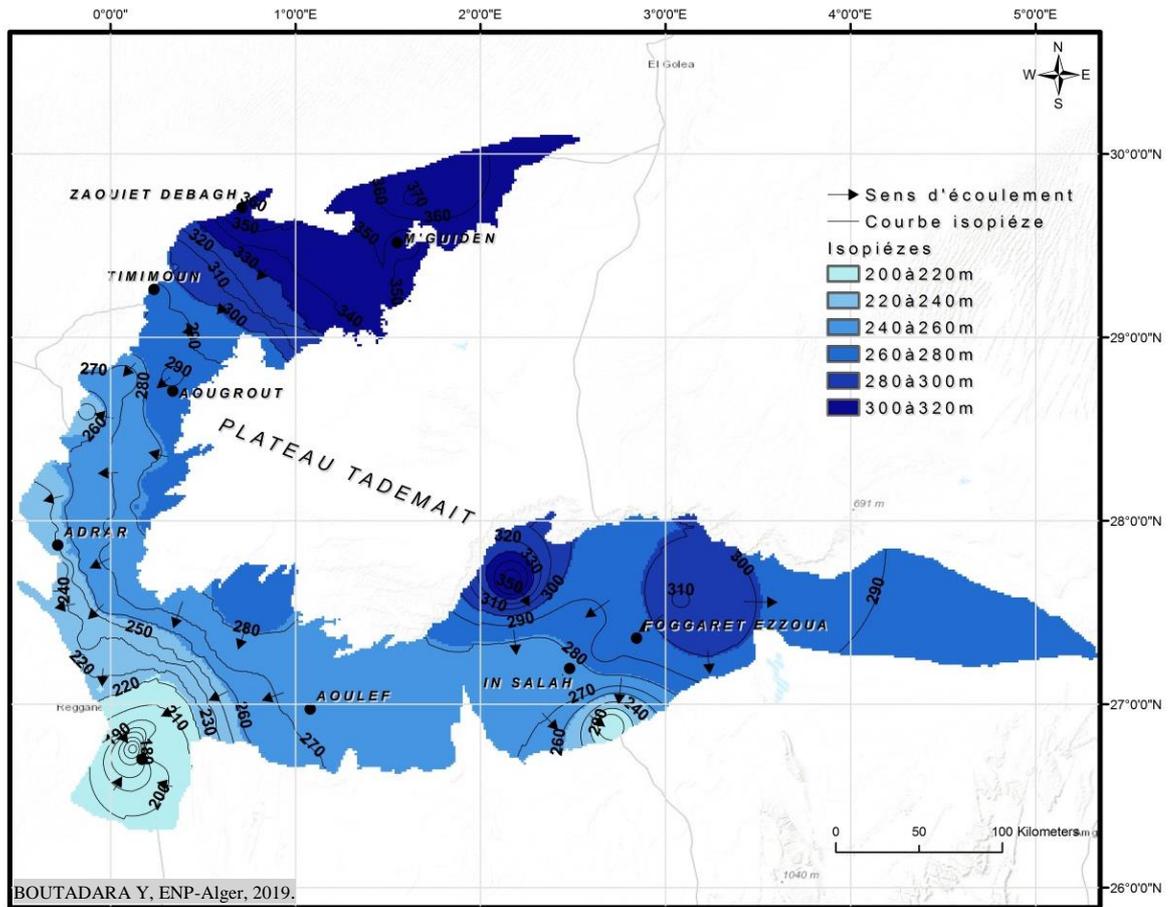


Figure 4-6: Carte piézométrique 2007

4.5. Les données hydrodynamiques

Les ouvrages testés par un pompage d'essai couvrent une partie importante du territoire de la région, répartis en 84 puits et 165 forages. La majorité des données se concentrent dans la zone de Touat où nous avons enregistré 187 points, 29 à Gourara et 33 à Tidikelt. La profondeur moyenne des ouvrages testés est d'environ 120 m pour les forages et 25 m pour les puits. Les débits moyens des pompages d'essai réalisés au niveau des points d'eau est de 132,54 m³/h. La durée des essais est répartie en 72 heures pour les forages et 18 heures pour les puits.

Après la structuration, nous avons traité les données des essais de pompage et les données de quatre (04) forages ont été annulées du fait de l'insuffisance des mesures enregistrées. Ces données ont, par la suite, fait l'objet des opérations de calculs afin de les rendre faciles

à analyser et déduire les paramètres hydrogéologiques comme la transmissivité et le coefficient d’emménagement obtenus par l’analyse de 245 échantillons.

4.5.1. La Transmissivité

Les valeurs résultantes des essais de pompage dans les sous-régions indiqués et leur répartition sur les lieux sont le résultat de divers motifs à savoir :

- Les différences lithologiques et stratigraphiques d’une région à une autre ;
- L’écart du temps entre les essais réalisés à travers des périodes différentes (entre 1987 / 2014) ;
- Les étapes périodiques enregistrées dans certains essais ne correspondent pas exactement avec la stabilité de niveau statique.

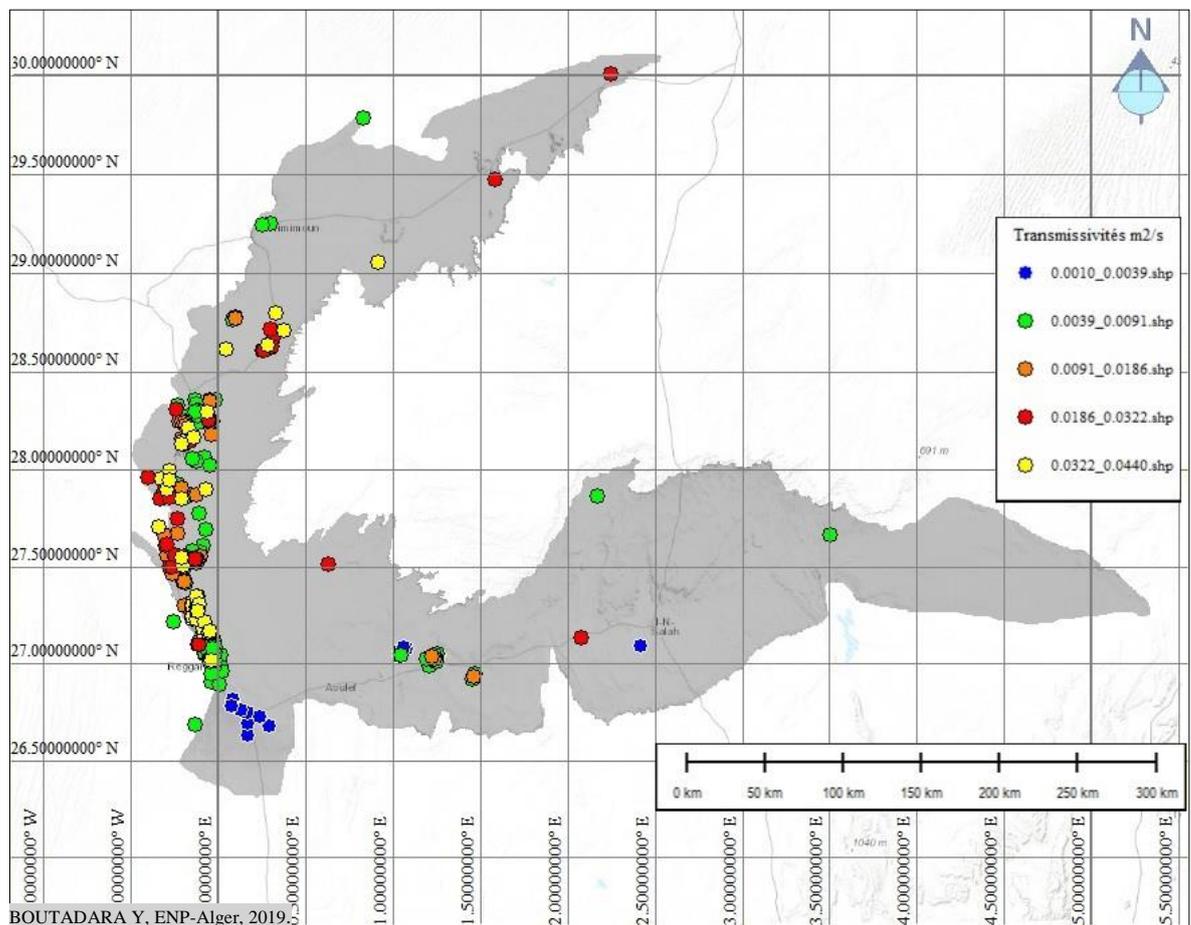


Figure 4-7: Répartition spatiale des données de la transmissivité

À travers les résultats de la transmissivité obtenue ; il apparait que le potentiel de production de la nappe dans la zone d’étude est de :

- 5 à 44 x 10⁻³ m²/s dans l'axe reliant Timimoun et Adrar;
- 1 à 14 x 10⁻³ m²/s dans l'axe reliant Reggan et Aoulef;
- 3 à 31 x 10⁻³ m²/s dans la région d'In Salah.

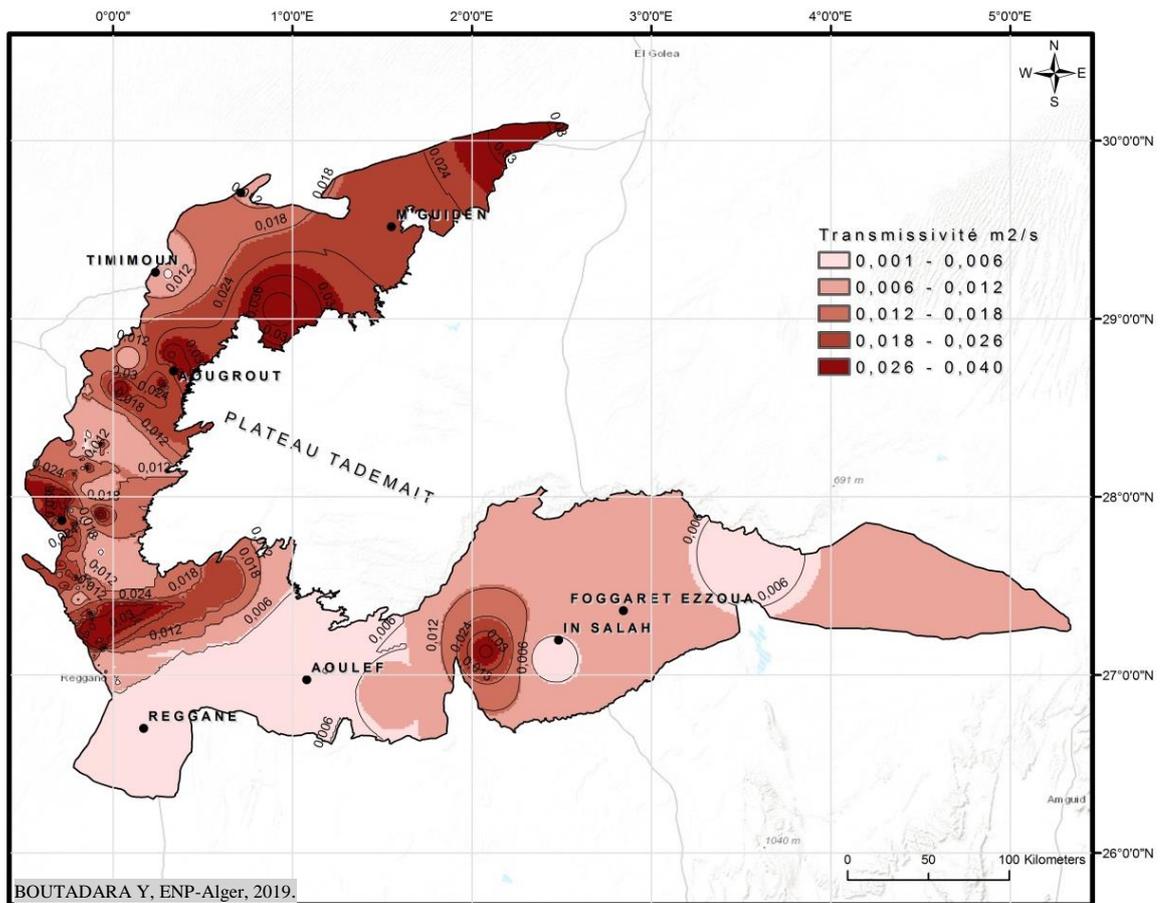


Figure 4-8: Carte de la Transmissivité

À travers l'analyse de la carte de transmissivité, nous avons constaté que les valeurs de la transmissivité de la nappe varient dans l'ensemble entre 0,001 à 0,040 m²/s. La valeur minimale est égale à : 0,00108, elle est enregistrée au niveau de forage d'Azrafil-01 dans la commune de Reggan. La valeur maximale de 0,044 est enregistrée au niveau du forage de Zaouiat Sidi Abdallah-22 dans la commune d'Aougrou. Quant à la valeur moyenne obtenue, elle est de 0,014576. Les plus fortes transmissivités sont localisées dans le Gourara sur l'axe reliant M'guiden et Aougrou (0,024 à 0,04 m²/s), l'axe centrale du Touat de direction SO – NE à Stah Azziet la bordure aval qui s'étend entre Bouda et Zaouit Konta (0,018 à 0,04 m²/s).

La plaine du Tidikelt entre In Ghar, Foggaret Ezzoua et plateau Tademaït représente des valeurs moyennes de 0,006 à 0,024 m²/s. Ces secteurs sont caractérisés généralement par un faible gradient hydraulique de la nappe. Par contre, la partie sud entre Reggan et

Aoulef est caractérisée par des transmissivités faibles comprises entre 0,001 m²/s et 0,006m²/s.

4.5.2. Le coefficient d’emmagasinement

Les valeurs des coefficients d’emmagasinement de la zone d’étude varient entre 1.00×10^{-4} et 1.98×10^{-3} (figure 4-10) , avec une valeur moyenne de 4.98×10^{-4} , où nous avons enregistré des valeurs plus faibles dans la région du Touat (1×10^{-4}) sur les forages de Zaouit Reggani-02, Tinourt-02, Fenoughil-14 et Sali-11, et des valeurs maximales enregistrées dans les forages de la régions de Touat et Tidikelt (1.90×10^{-3}) et les forages d’Aoulef-30, Aoulef-34, Azzi -09, Titaf-03, Zaglou-03 et Fenoughil-04.

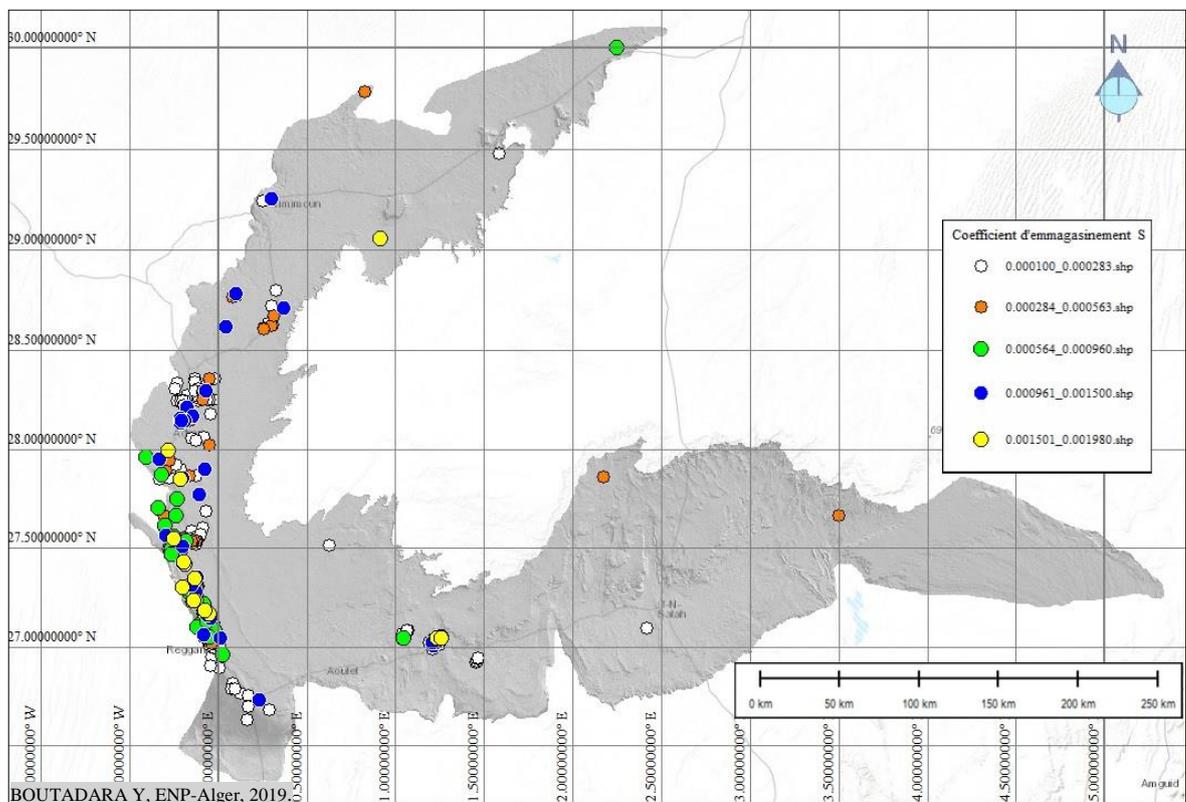


Figure 4-9: Répartition spatiale des données des coefficients d’emmagasinement

Les valeurs du coefficient d’emmagasinement varient entre 4.10^{-4} et 8.10^{-4} sur le territoire de M’Guiden à Timimoun et d’Adrar à Aoulef. Des valeurs moyennes $3,5.10^{-4}$ et $4,5.10^{-4}$ sont localisées d’Aougrouit à Adrar et dans le sud de Reggane. Dans le territoire Nord d’In Salah les valeurs sont comprises entre $2,5 .10^{-4}$ et $4,5 .10^{-4}$. Les faibles valeurs dans notre zone d’étude sont localisées le long de la bordure avale d’In Salah.

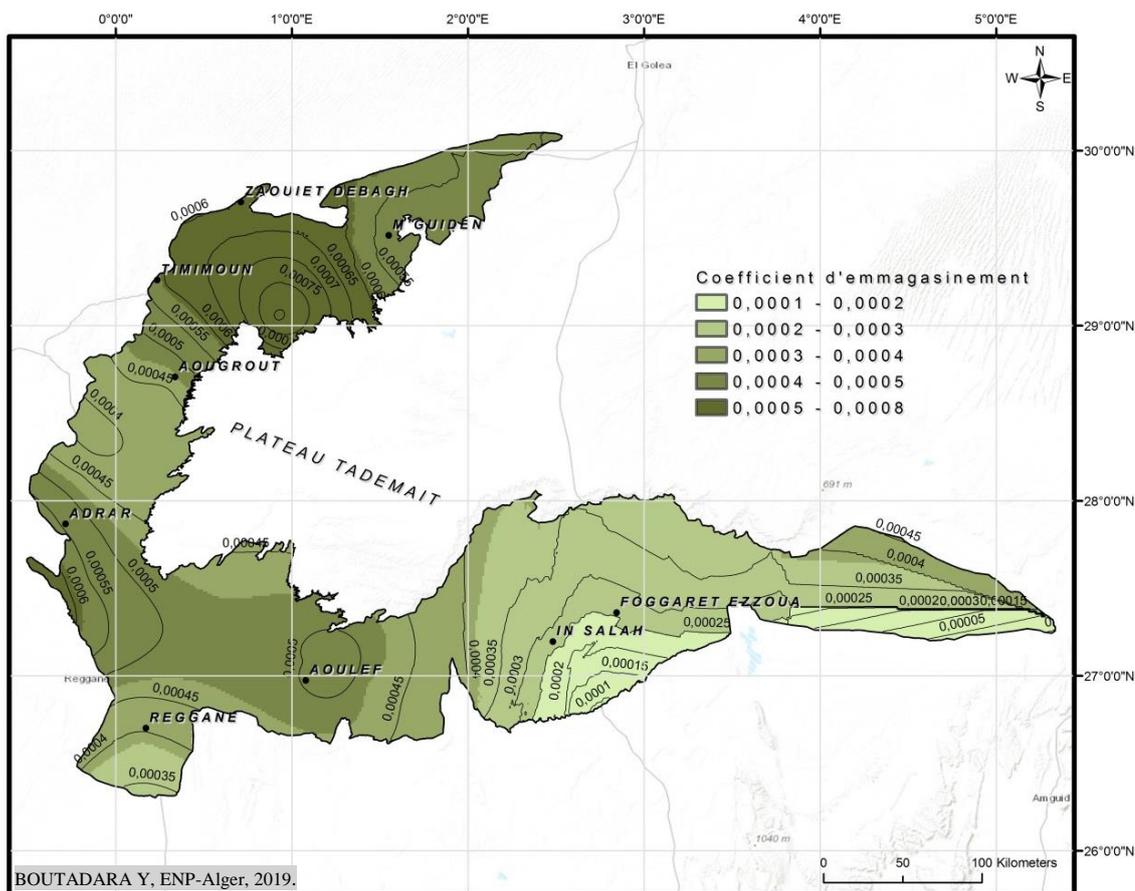


Figure 4-10: Carte de coefficient d'emmagasinement

4.5.3. Le débit spécifique

Pour préciser la répartition de la valeur des débits spécifiques à travers la nappe aquifère dans la région, nous avons dressé la carte de perméabilité (Figure 4-11). La majorité des valeurs se situent entre 10 et 15 m³/h/m ce qui prouve que la nappe aquifère est constituée dans sa majorité de grès Albien et de sable argileux. On en déduit également à travers la répartition spatiale des données des débits spécifiques que la valeur minimale de 0,12 m³/h/m a été enregistrée au niveau des forages de Samjane et que la valeur maximale de 49,84m³/h/m a été enregistrée au niveau des forages P-01 et F-17 de la zone de Stah Azzi.

La plupart des valeurs déduites à partir des valeurs des perméabilités sont inférieures à 5.10⁻⁴ m/s. Les plus fortes perméabilités de la nappe [2 .10⁻⁴ à 4 .10⁻⁴ m/s] sont situées au centre de Touat, au sud de Gourara et dans la zone d'In Ghar au Tidikelt (figure 4-12).

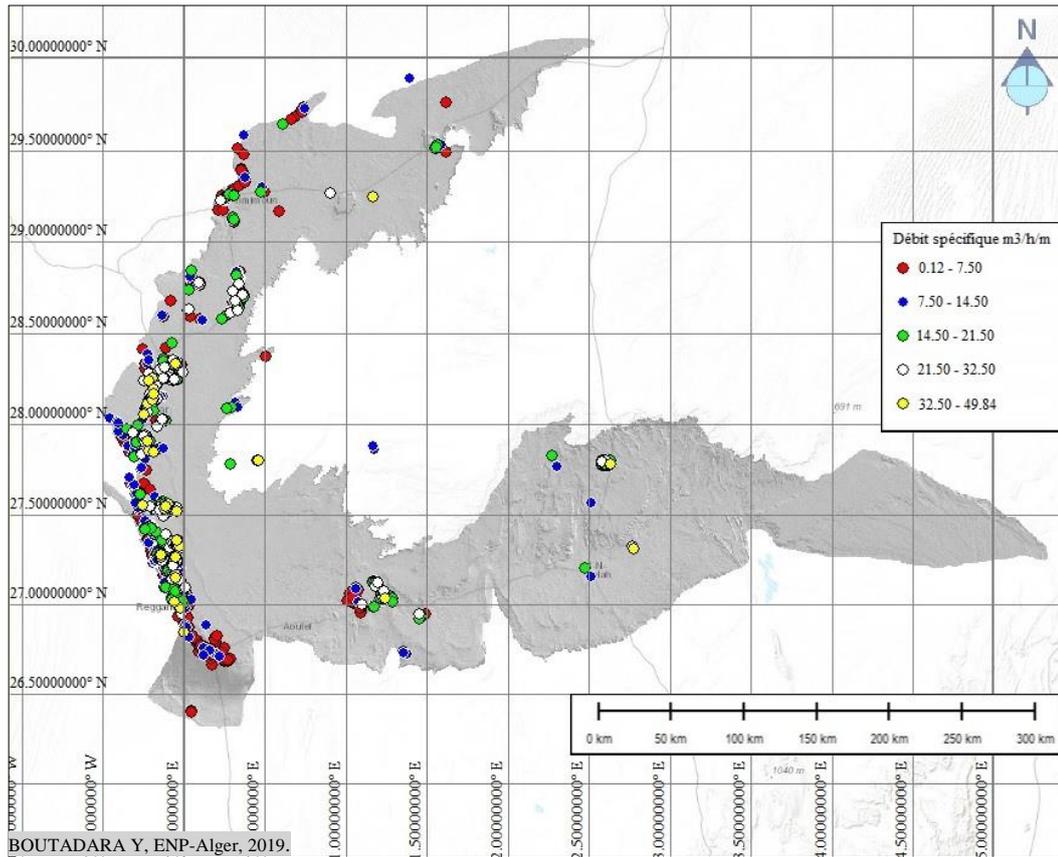


Figure4-11: Répartition spatiale des données des débits spécifique

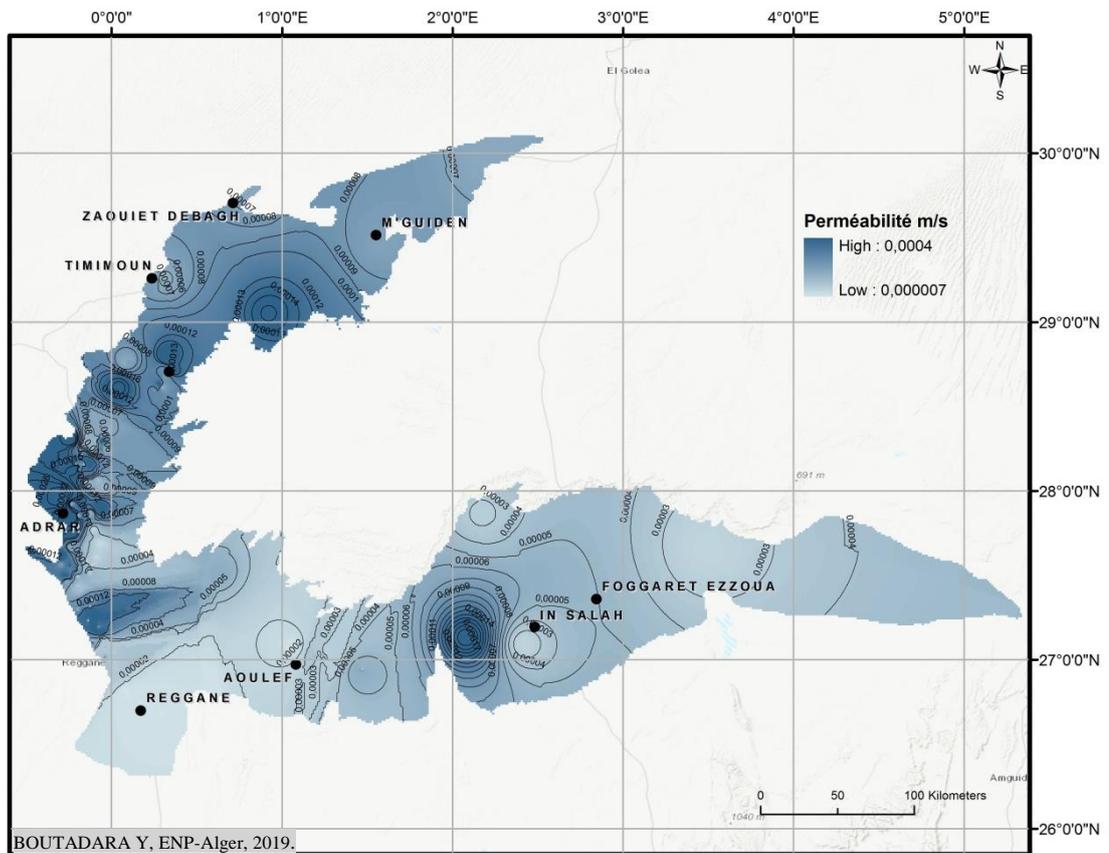


Figure4-12 : Carte de la perméabilité

4.6. Données des prélèvements d'eau souterraine

La connaissance des quantités prélevées, leur localisation géographique, ainsi que des usages auxquels l'eau est destinée, est donc très importante en vue de gérer au mieux la disponibilité de la ressource. Dans cette recherche, l'information sur les volumes prélevés au cours de l'année 2014 est présentée pour chacun des grands usages (agricole, alimentation en eau potable et industriel), selon un découpage géographique basé sur les sous-régions définies dans notre thèse.

Les données sur les prélèvements dans la nappe de la région d'étude sont constituées essentiellement par les débits drainés au niveau des foggaras, des puits et forages pour l'utilisation agricole, les prélèvements industriels et les prélèvements d'eau potable.

Dans le territoire d'étude, l'importance des prélèvements résulte surtout de développement de la production agricole céréalière dans les périmètres de la grande mise en valeur. En 2014, l'essentiel des volumes d'eau souterraine exploités est prélevé en amont des champs de captage des foggaras et représentent 55 % du total de l'eau prélevée dans la zone.

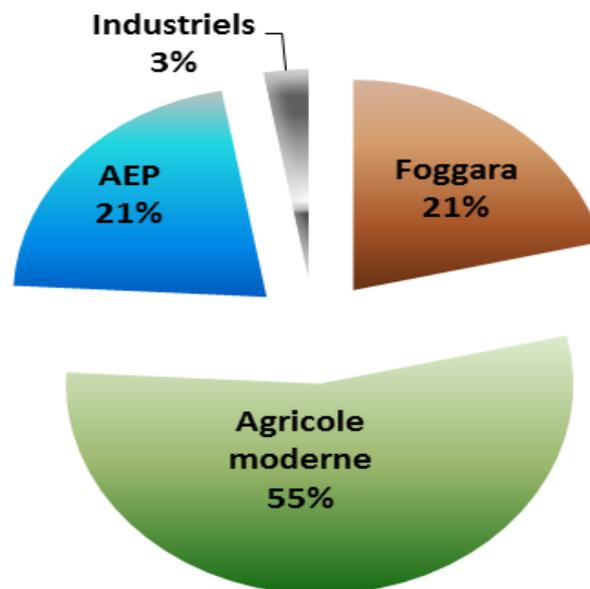


Figure4-13: Répartition des prélèvements d'eau pour les divers usages en 2014

4.6.1. Les prélèvements dans les foggaras

Plusieurs jaugeages des débits de foggaras réalisés en 1932, 1950 et 1960 ont servi à l'étude Unesco 1972 pour présenter une première évaluation des prélèvements de ces systèmes de foggaras. Nos trois compagnes de mesure ont montré que les débits de chaque foggara variaient et les débits globaux par palmeraie restaient à peu près constants. Le

débit global prélevé sur la nappe par foggaras est estimé en 1960 à 3,6 m³/s reparté par sous-région comme indique dans le tableau ci-après.

Tableau 4-2 : Débit des foggaras par sous-région en 1960

Sous-région	Gourara	Touat	Tidikelt	Total
Débit (m ³ /s)	0,887	2,085	0,693	3,665

L'actualisation de l'inventaire de débits des foggaras a été réalisée en 2011 par l'agence nationale des ressources hydrique (ANRH Adrar). Cet inventaire montre que les foggaras dans cette région exploitent un débit global de 1,776 m³/s. Les valeurs de débit sont indiquées dans le tableau ci-après.

Tableau 4-3: Débit des foggaras par sous-région en 2011

Sous-région	Gourara	Touat	Tidikelt	Total
Débit (m ³ /s)	0,443	1,103	0,230	1,776

Par comparaison, la baisse de débit entre 1960 et 2011 est de 1,889 m³/s soit une diminution de 50% sur l'ensemble des foggaras de la zone d'étude. Cette situation résulte de la prolifération du nombre de points d'eau et elle se traduit par des prélèvements globaux en 2000 qui sont quatre fois plus forts qu'en 1980 [38].

4.6.2. Les prélèvements agricoles

En agriculture, l'eau prélevée est principalement utilisée pour l'irrigation. Bien que cette eau ne soit pratiquée que sur 8 % de la surface agricole utile du territoire d'étude, l'irrigation mobiliserait au moins 80 % des prélèvements d'eau agricoles. Les prélèvements agricoles ont fait l'objet de plusieurs enquêtes et estimations réalisés par les service de DSA (747 captages inventoriés). Les fiches établies lors de ces enquêtes sont archivées au niveau des services ANRH. Les demandes d'autorisation de prélèvement d'eau souterraine sont consignées et archivées à la direction des ressources en eau (DRE).

Les prélèvements agricoles à travers l'agriculture moderne et les foggaras constituent la part la plus importante des exploitations des eaux souterraine de la nappe dans la région (64 % en 2014). En effet, d'après les services de l'agriculture [18], les débits estimés ont changé entre 3,84 m³/s en 1980 et 11,62 m³/s en 2014. L'utilisation de cette eau

souterraine se fait en particulier dans les exploitations de la grande mise en valeur agricole (211 ouvrages prélevant 5,19 m³/s en 2014).

Tableau 4-4: Prélèvements agricoles en 2014

Sous-région	Gourara	Touat	Tidikelt	Total
Débit (m ³ /s)	0,429	6,446	1,481	8.356

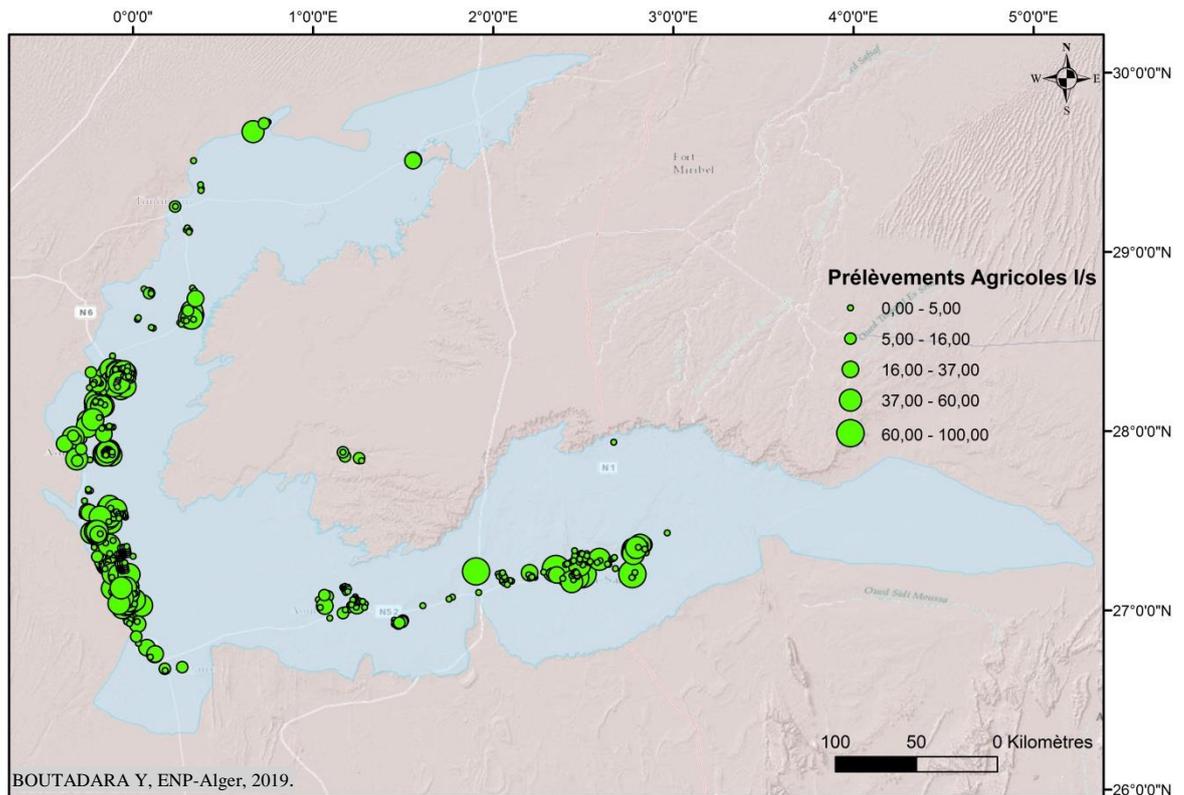


Figure 4-14: Répartition spatiale des prélèvements agricoles

4.6.3. Les prélèvements d'AEP

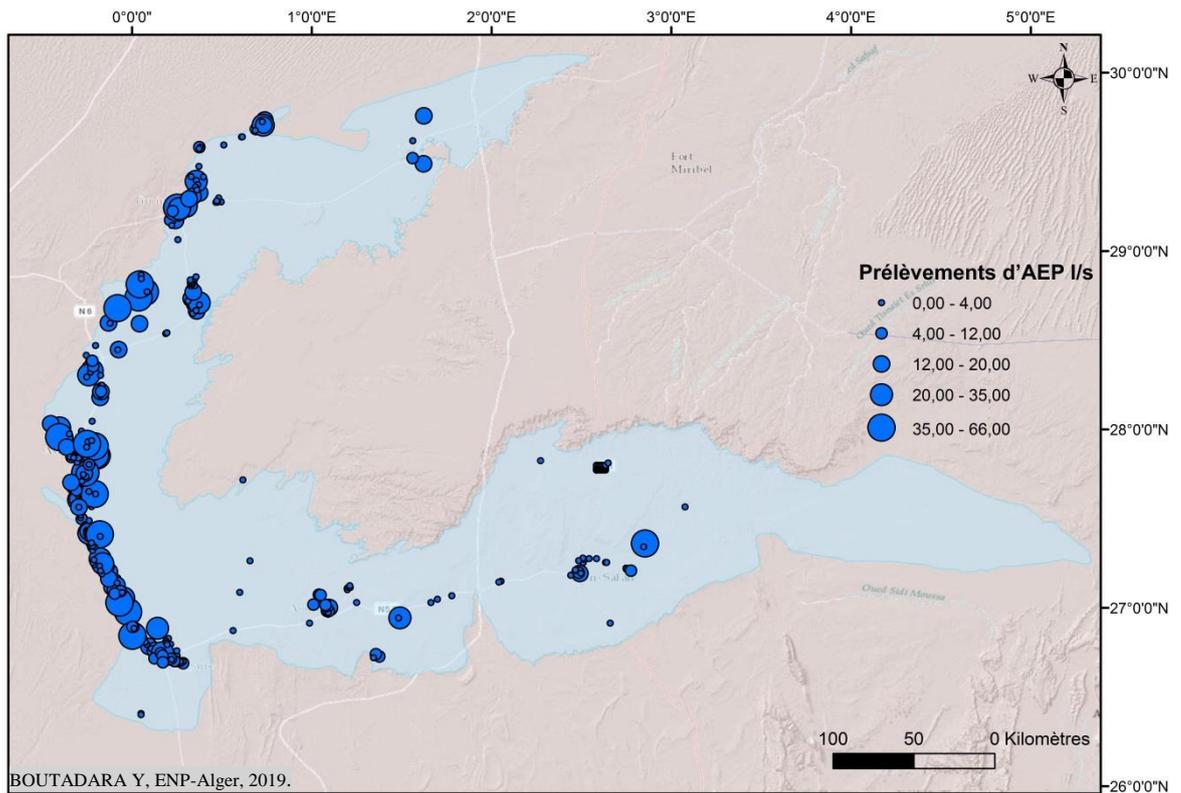


Figure4-15: Répartition spatiale des prélèvements d'AEP

Les forages d'AEP qui alimentent les villes d'Adrar, Timimoun, Charouin, Aougrout, Reggan, Aoulef et In Salah et leurs communes rurales, sont au nombre de 589 ouvrages dont 184 puits, 405 forages. Ces ouvrages sont exploités et suivis par les services de la DRE, de l'ADE et les APCs; leurs débit s'établit en 2014 à environ 3,26 m³/s.

Tableau 4-5: Prélèvements d'AEP en 2014

Sous-région	Gourara	Touat	Tidikelt	Total
Débit (m ³ /s)	1,088	1,927	0,247	3,262

4.6.4. Les prélèvements industriels

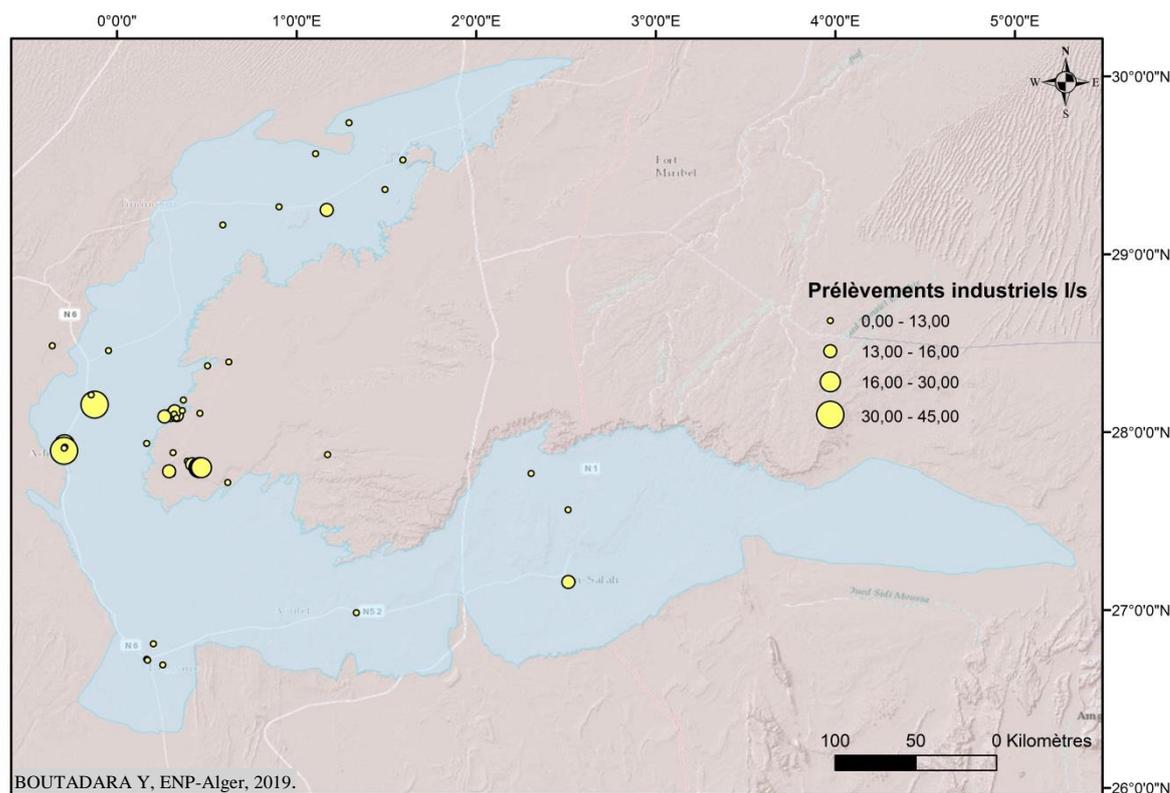


Figure 4-16: Répartition spatiale des prélèvements industriels

En 2014, sur un total de $13,83 \text{ m}^3/\text{s}$ de prélèvements des eaux souterraine pour les différentes usages, $0,43\text{m}^3/\text{s}$ soit 2,80 % de ce volume est prélevé par les entreprises industrielles. Ces dernières utilisent l'eau soit comme solvant (électrolyse, homogénéisation de mélange, nettoyage de matières premières, de composants ou d'équipements), comme matière première (boisson, briqueterie...) ou comme fluide caloporteur (vapeur ou refroidissement, le cas de La raffinerie de Sbaa - Adrar). Une petite fraction du volume des prélèvements enregistrés dans cette catégorie est utilisée pour des usages similaires aux usages domestiques (robinet, sanitaires).

Tableau 4-6 : Prélèvements industriels en 2014

Sous-région	Gourara	Touat	Tidikelt	Total
Débit (m^3/s)	0,025	0,299	0,112	0,436

4.7. Les données recueillies sur terrain

Vu certaines insuffisances enregistrées dans les inventaires relatifs aux forages et aux foggaras, nous avons effectué des missions sur les lieux concernés afin de les compléter et enregistrer celles dont nous ne disposons pas, notamment la localisation des points d'eau, les mesures piézométrique et le jaugeage des débits. Cela a été réalisé selon le calendrier suivant :

Tableau 4-7 : Calendrier des missions effectuées sur terrain

Destination	Date	Résultat	N° photo
Oued Ezzine	05/08/2013	Inventaire deux (02) forages industriel	Photo 4-1
Fenoughil	18/06/2014	Inventaire de la foggara Hamou Targui	Photo 4-2
Timmi	18/03/2013	Inventaire de 06 puits	Photo 4-3
Bouda	24/03/2015	Inventaire de 33 foggaras de Bouda	Photo 4-4
Adgha	14/05/2015	Inventaire de foggara Massini	Photo 4-5
Oufran	16/09/2015	Jaugeage et localisation de la foggara	Photo 4-6
Sali	01/09/2015	Localisation de la foggara Djoubre	Photo 4-7
Deldoul	15/09/2015	Inventaire des foggaras de Deldoul	Photo 4-8
Timoktene	21/10/2015	Inventaire des foggaras de Timoktene	Photo 4-9
In Salah	07/04/2016	Localisation 63 foggaras d'In Salah	Photo 4-10
Tinerkouk	20/10/2013	Inventaire puits pâturage	Photo 4-11
Zt-Kounta	03/11/2014	Localisation 10 forges à Stah Azzi	Photo 4-12
M'eguiden	22/10/2013	Inventaire puits pâturage	Photo 4-13
OuledSaid	24/10/2013	Mesures niveau piézométrique de 02 puits	Photo 4-14
Oued Ghzala	20/04/2014	Inventaire de 13 forages	Photo 4-15
Tamentit	18/06/2015	Inventaire de la foggara Adjmtane	Photo 4-16
Kseibat	04/02/2018	Inventaire de la foggara El Hadj Amer Lekbir	Photo 4-17
Bouda	05/02/2018	Jaugeage de des foggaras de Bouda	Photo 4-18



Photo 4-1 : Mission Oued Ezzine



Photo 4-2 : Mission Fenoughil



Photo 4-3 : Mission Timmi



Photo 4-4 : Mission Bouda



Photo 4-5 : Mission Adgha



Photo 4-6 : Mission Oufran



Photo 4-7 : Mission Sali



Photo 4-8 : Mission Deldoul



Photo 4-9 : Mission Timoktene



Photo 4-10 : Mission In Salah



Photo 4-11 : Mission Tinerkouk



Photo 4-12 : Mission Zt-Kounta



Photo 4-13 : Mission M'eguiden



Photo 4-14 : Mission Ouled Said



Photo 4-15 : Mission Oued Ghzala



Photo 4-16 : Mission Tamentit



Photo 4-17 : Mission Kseibat



Photo 4-18 : Mission Bouda

4.8. Conclusion

Dans la banque de données de notre recherche, 90 950 ouvrages (foggaras, puits et forages) ont été collecté au niveau des institutions du secteur des ressources en eau (DRE, OF et ANRH) et des services agricoles (DSA, INSID et CDARS). 6 185 ouvrages ont été visités sur terrain avec des experts locaux. Ainsi, leurs positions géographiques ont été localisées et corrigées, leurs types et profondeurs ont été déterminées et une mesure de niveau d'eau et jaugeage de débit a été réalisée sur certains d'entre eux. La principale difficulté rencontrée sur terrain est la localisation de certains puits des foggaras disparus et forages agricole mal situés. Au final, ces données ont été structurées, analysées et représentées sous forme des cartes thématiques. L'ensemble a permis de créer un outil d'information géographique performant qui répond aux besoins de notre étude.

***Chapitre 5: L'évolution de la piézométrie dans la zone
d'étude***

Chapitre 5 : L'évolution de la piézométrie dans la zone d'étude

5.1. Introduction

Les cartes piézométriques peuvent être considérées comme l'outil de base de l'hydrogéologie quantitative. Elles permettent d'identifier la morphologie de la surface libre d'une nappe souterraine, les zones de rabattement et les zones de prélèvement. Dans ce chapitre, la comparaison dans le temps (2007-2016) des cartes piézométriques permet d'observer les évolutions de la nappe (haute eaux et basses eaux) ainsi que les impacts liés à l'exploitation de la ressources en eau souterraine.

Afin d'élaborer des différentes cartes piézométriques, nous avons souligné un manque d'informations sur certains endroit. Ainsi, nous avons adopté une approche de la géostatistique qui permet de combler ces lacunes mais également, et surtout, de modéliser la surface libre de la nappe sur l'ensemble de la zone d'étude. La géostatistique offre des concepts et des approches qui pourraient contribuer à enrichir les techniques de simulation des données et d'élaborer des cartes piézométrique afin de dresser une cartographie fiable et plus représentative.

5.2. Analyse exploratoire des données piézométriques

Avant leur traitement, il est nécessaire de faire une analyse détaillée des données existantes pour conduire à une interpolation qui soit la plus représentative du phénomène étudié. Cette étape représente un ensemble de techniques d'analyse exploratoires de données spatiales qui permet de visualiser et d'analyser les données selon des techniques statistiques. Cette approche offre une large gamme de possibilités permettant la détection de tendances ou de dérives dans les données, le repérage des valeurs anormales et l'étude des corrélations spatiales de ces données.

Il est ici rappelé que la variable d'intérêt étudiée est la cote piézométrique de la nappe, issue de deux campagnes de mesures effectuées en 2007 et en 2016 sur l'ensemble des 51 piézomètres, 34 forages abandonnés et 32 puits de pâturage.

L'ensemble des données piézométriques sont issues d'un réseau composé de 117 points d'eau mesurés en 2007 et en 2016 (Figure 5-1).

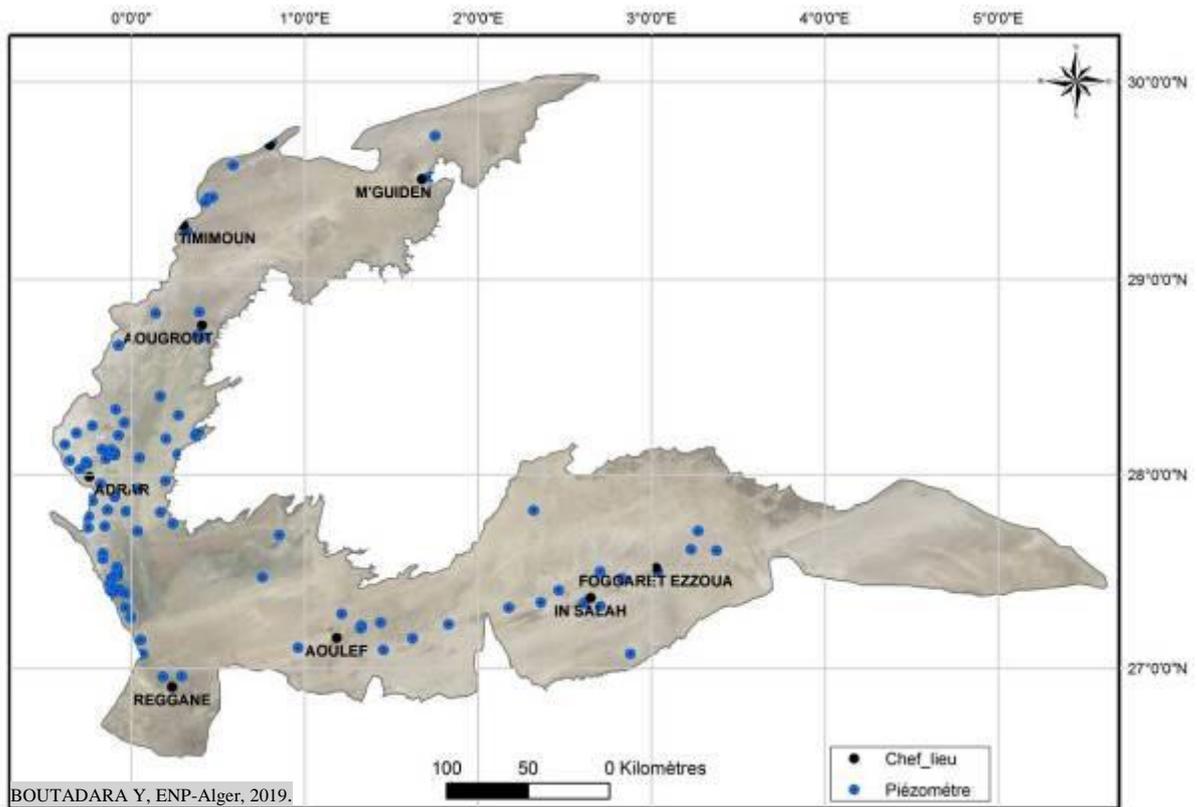


Figure 5-1: Carte d'implantation des données piézométriques

5.3. Traitement des données piézométriques

Avant l'exploitation de ces données, nous avons déterminé les altitudes de chaque ouvrage inventorié. Pour cela, nous avons utilisé le Modèle Numérique du Terrain (MNT) sous ArcGIS, puis nous avons validé ces altitudes à l'aide de la carte topographique. En parallèle, un grand nombre de mesures piézométriques a été collecté. Toutes n'étant pas exploitables pour réaliser la carte piézométrique, il a fallu effectuer un traitement et un tri de ces données. Cette phase a permis de garder 105 points validés sur un ensemble de 117 points inventoriés pour les deux années 2007 et 2016.

5.4. Méthode de réalisation des cartes piézométriques 2007 et 2016

Pour élaborer les cartes piézométriques pour les deux années 2007 et 2016, plusieurs essais avec des logiciels d'interpolation et de cartographie ont été réalisés. Le logiciel ArcGis comprend une suite d'applications intégrées : ArcMap, ArcCatalog, Arctoolbox et Geostatistical Analyst [17]. À l'aide de ces applications, il est possible d'effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la gestion des données, l'analyse géographique, la mise à jour des données, le géo-traitement, la cartographie et la géostatistique. Dans notre cas, la méthode de krigeage avec le modèle de semi-variogramme qui a été choisie pour réaliser les deux cartes piézométriques visées.

Un krigeage est une technique géostatistique de modélisation spatiale permettant à partir d'un nombre limité de points d'avoir une représentation de valeurs sur toute la surface de la zone étudiée [31]. Cela permet dans le cas de cette carte piézométrique d'estimer l'altitude piézométrique en dehors des points de mesure. Cette technique a été choisie car elle tient compte de la distance entre les points de mesure [35]. Le krigeage se base sur l'hypothèse que deux données qui sont proches dans l'espace tendent à posséder des caractéristiques similaires. Pour ces raisons, elle est la méthode d'estimation la plus précise [31].

Sur l'ArcGIS, l'assistant géostatistique est un environnement guidé et détaillé qui permet de construire et valider des modèles d'interpolation par krigeage avec modèle de semi-variogramme de façon autonome [21]. À chaque étape du processus de création du modèle, nous avons effectué des choix décisifs qui affecteront la carte piézométrique finale. La première étape pour créer une carte piézométrique est de réaliser l'histogramme des données pour représenter la répartition de la variable de l'altitude piézométrique (Figure 5-2) et (Figure 5-3).

Dans les histogrammes, les valeurs des niveaux piézométriques en 2007 et en 2016 centrent successivement autour des moyennes 264,31 m et 263,60m. Ces valeurs sont réparties également entre un minimum égal à 108,50m, et 370,90 comme valeur maximale. La majorité des observations 2007 et 2016 indiquent des altitudes piézométriques comprises dans l'intervalle [263,45 m et 287,90 m]. Ces données sont réparties selon une loi normale centrée autour de la moyenne. La répartition s'approche en effet d'une courbe gaussienne. Il est donc possible de se servir d'un modèle statistique pour réaliser l'interpolation des données par krigeage. Le krigeage est une méthode d'estimation linéaire qui teste pour chaque point quelle valeur a le plus de chances d'être en x et génère le moins de variance avec les points autour de x .

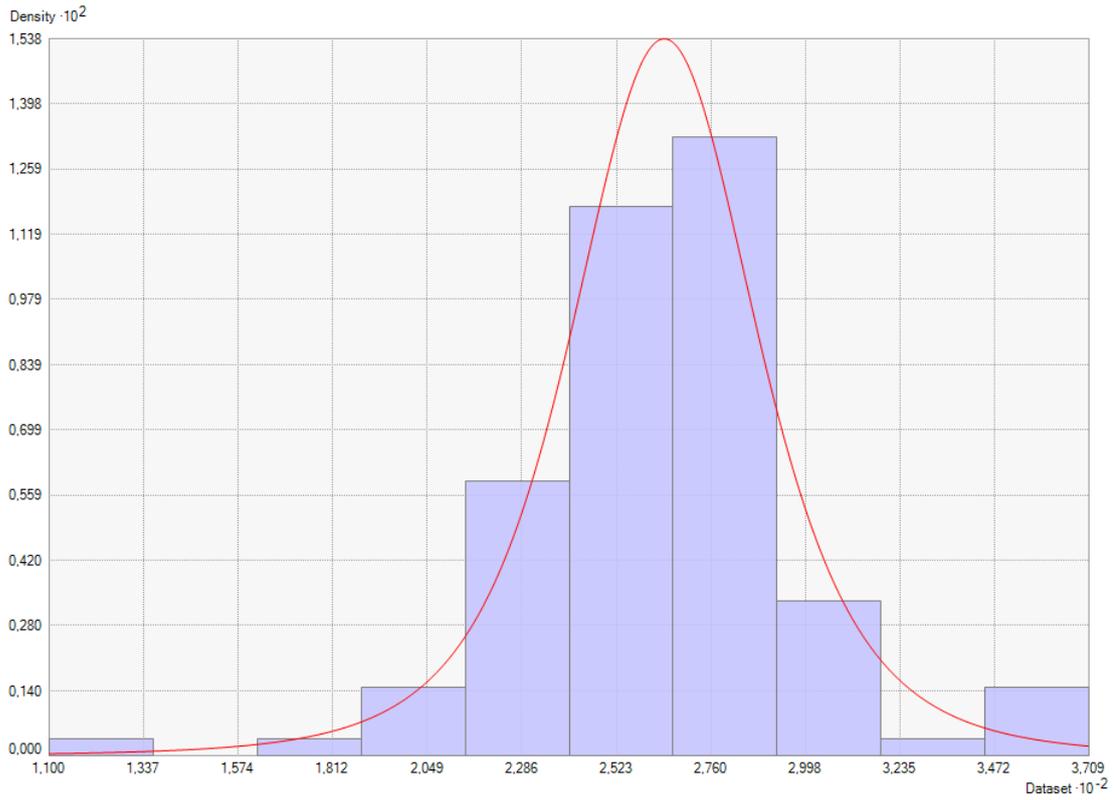


Figure5-2: Histogramme en fréquence des données piézométriques 2007

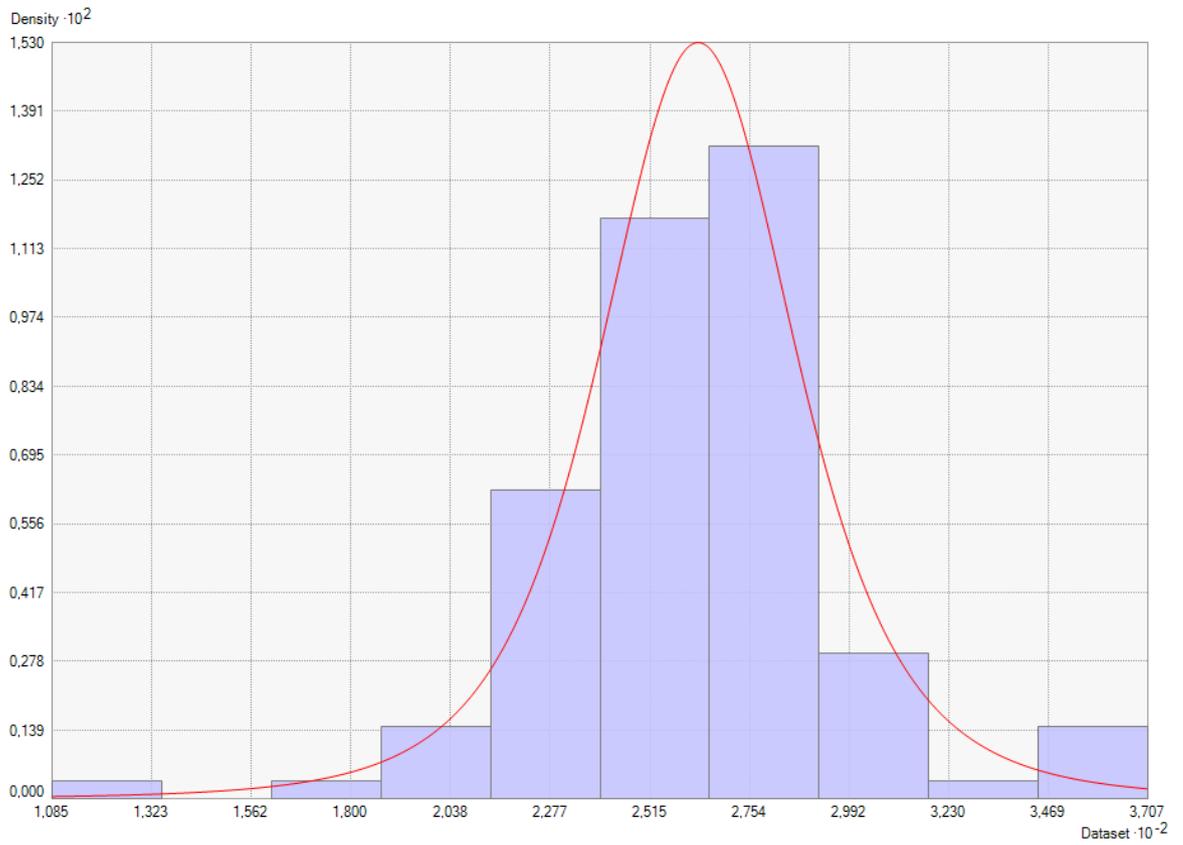


Figure5-3: Histogramme en fréquence des données piézométriques 2016

Ensuite, nous avons tracé les Semi-variogrammes des variables des niveaux piézométriques 2007 et 2016 (Figure 5-4) et (Figure 5-5). Ces Semi-variogrammes comparent les mesures en fonction de leur interdistance. Nous remarquons une bonne corrélation entre les points proches et certains points se détachent particulièrement du nuage. En effet, la proximité géographique des points fait que leurs valeurs piézométriques sont proches. Nous avons ajusté le modèle de semi-variogramme (en bleu). Cela permettra d'interpoler les valeurs du niveau piézométrique au niveau des zones où il n'y a pas eu de mesures. Les semi-variogrammes réalisés regroupent les valeurs initiales (points rouges) et les valeurs dont la moyenne est calculée (croix bleues).

En observant le modèle de semi-variogramme, nous avons remarqué que le modèle se stabilise à une distance de portée de 16 km. Ainsi, les points de mesures piézométriques situés à une distance inférieure à 16 km sont spatialement auto-corrélés alors que les points de mesures séparés par une distance supérieure à cette distance ne le sont pas. Face à ce constat, nous avons décidé de limiter l'interpolation aux 16 premiers kilomètres autour de chaque point interpolé.

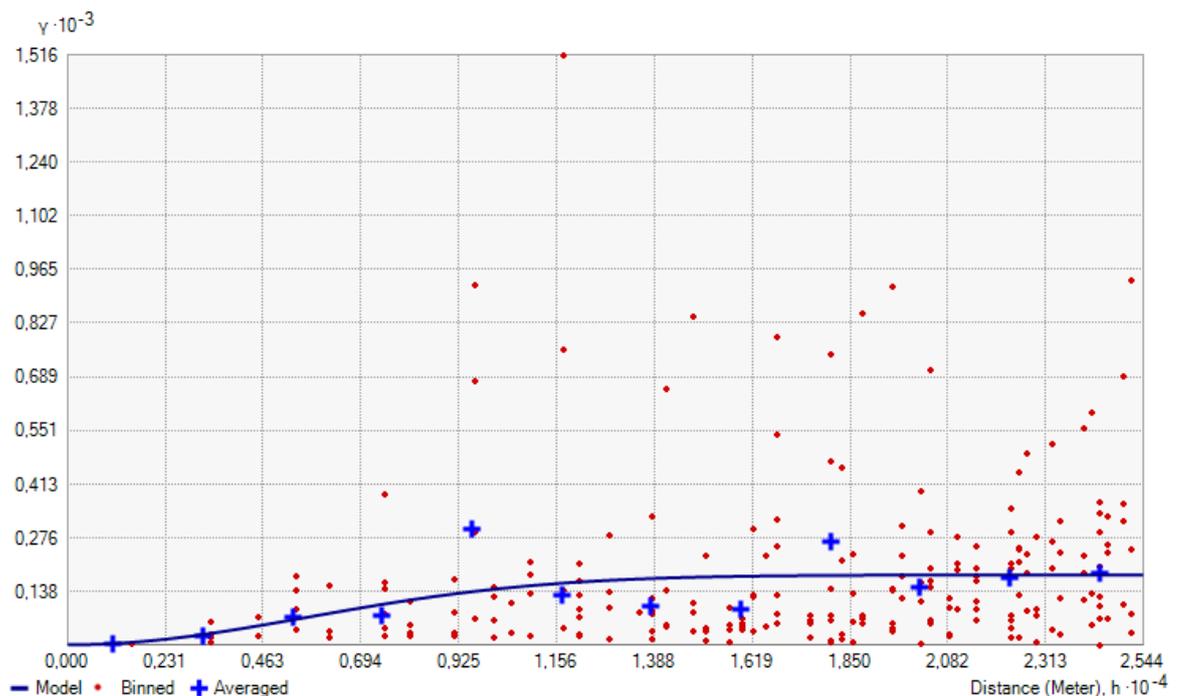


Figure 5-4: Semi-variogramme expérimental 2007

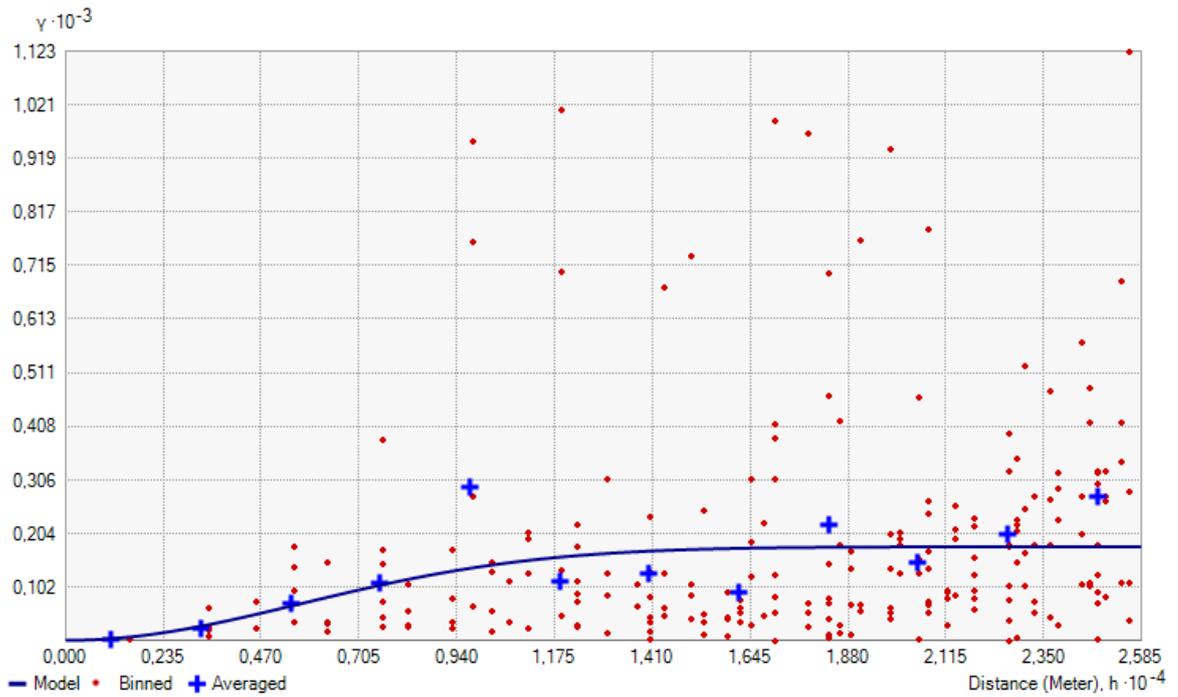


Figure5-5: Semi-variogramme expérimental 2016

Une étape de validation croisée est nécessaire pour estimer la fiabilité du modèle et vérifier qu'il est bien représentatif du jeu de données (Figure 5-6). Dans ce sens, la courbe de validation croisée que nous avons réalisée offre un diagnostic numérique et graphique qui nous permet d'estimer statistiquement la validité de notre modèle d'interpolation. De plus, cette étape permet de se rendre compte de la présence ou pas de points aberrants. Par exemple, une faute avait été commise lors de la saisie des données sur ordinateur. Elle a pu être retrouvé et corrigé grâce à la validation croisée.

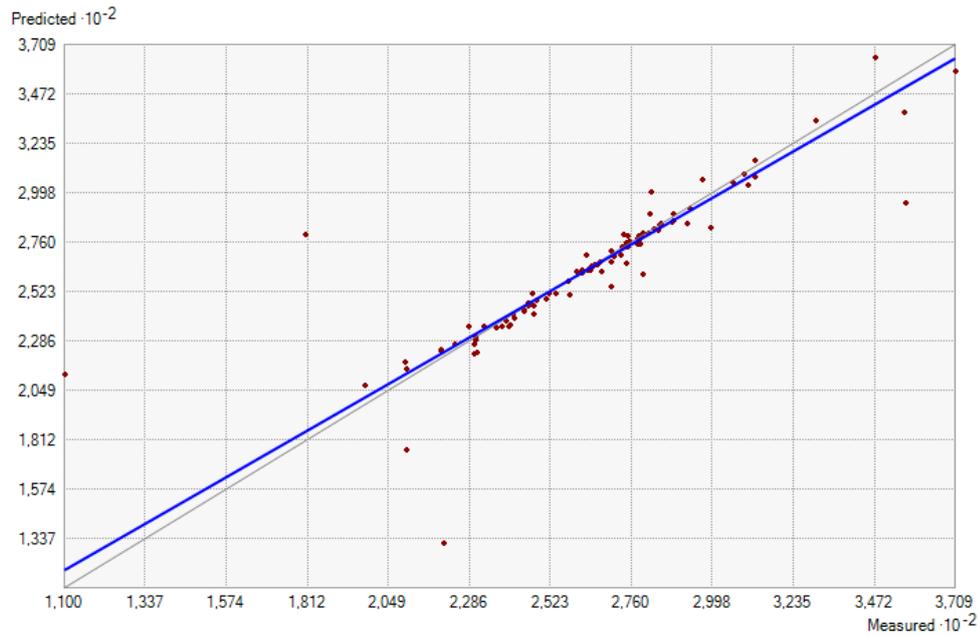


Figure5-6: Validation croisée des données piézométrique 2007 et 2016

Concernant le modèle de semi-variogramme choisi, la validation croisée a donné de bons résultats, en effet le coefficient de corrélation entre l'altitude de la nappe calculée et l'altitude réelle est de 0,126. Le modèle de variogramme est donc validé, il sera la base du krigeage permettant la réalisation des cartes piézométriques.

5.5. Cartes piézométriques 2007 et 2016

Une fois l'ensemble des étapes géostatistiques réalisées, la dernière étape est le tracé des cartes piézométriques à partir d'un krigeage avec les modèles de semi-variogramme choisis précédemment. Nous avons obtenu des cartes piézométriques finales pour les deux années 2007 et 2016 présentées sur les (Figure 5-7) et (Figure 5-8).

Pour faciliter l'analyser des cartes piézométriques, les principaux niveaux piézométriques ont été annotées par des couleurs différentes. Nous remarquons que les sens d'écoulements sont majoritairement orientés vers le Sud-Ouest, bien qu'au Sud de la zone on retrouve 2 axes drainant vers le Sud et l'Ouest.

Tous les axes de la partie aval s'orientent vers Aougrout, Adrar, Reggan, Aoulef et In Salah. Ces zones d'exutoire de l'aquifère sont plus présentes dans les parties sud et ouest. Il s'agit des parties les plus basses de la surface piézométrique, où les hydroisopièzes donnent des valeurs de 110m en 2007 et 108,50 en 2016. La partie d'Adrar et la partie nord de Reggan et Aoulef présentent des gradients beaucoup plus forts que les

parties nord de Timimoune et la partie nord-est d’In Salah, où les courbes piézométriques sont bien plus espacées.

La comparaison de la carte piézométrique 2007 avec celle 2016 permet de mettre en évidence les éventuelles modifications de comportement, des secteurs ayant évolués ou étant restés stables neuf ans plus tard. De manière générale, les directions des écoulements en 2016 n’ont pas changées par rapport à celles de 2007. L’orientation générale est toujours de l’Est vers l’ouest et du nord vers le Sud ou le Sud-Ouest.

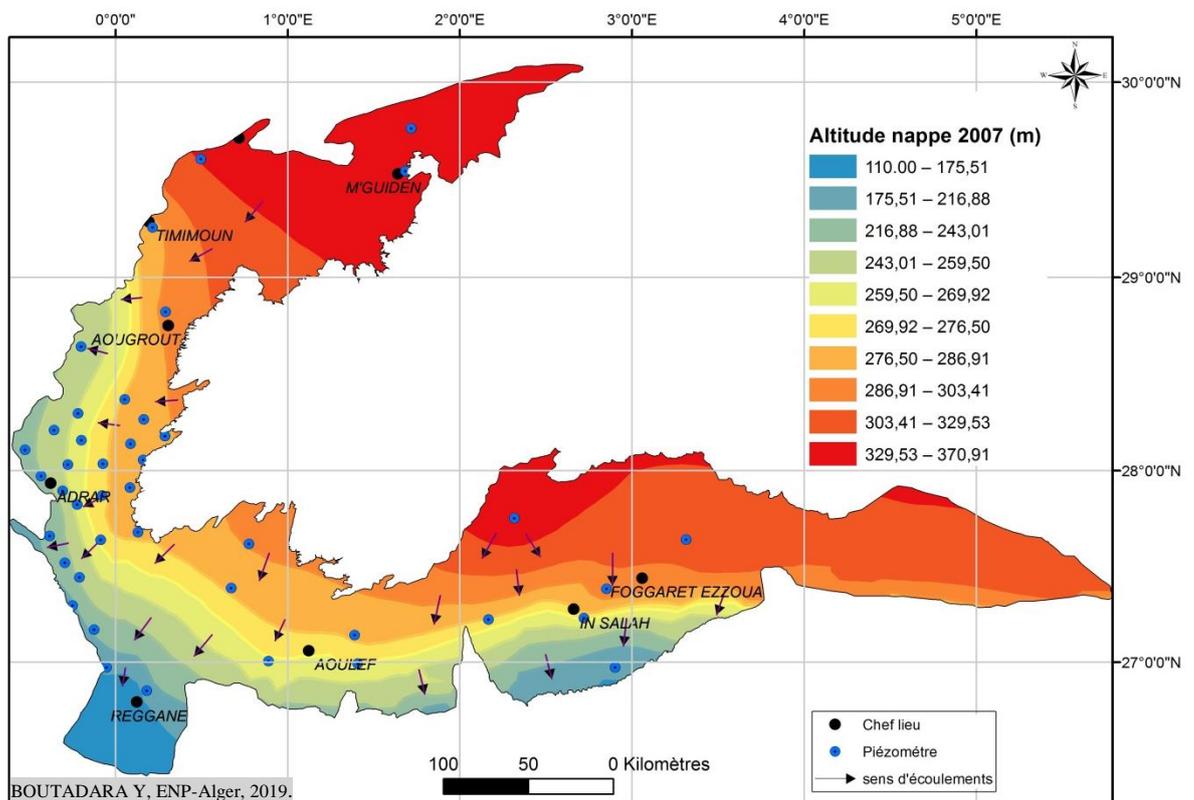


Figure 5-7 : Carte piézométrique 2007

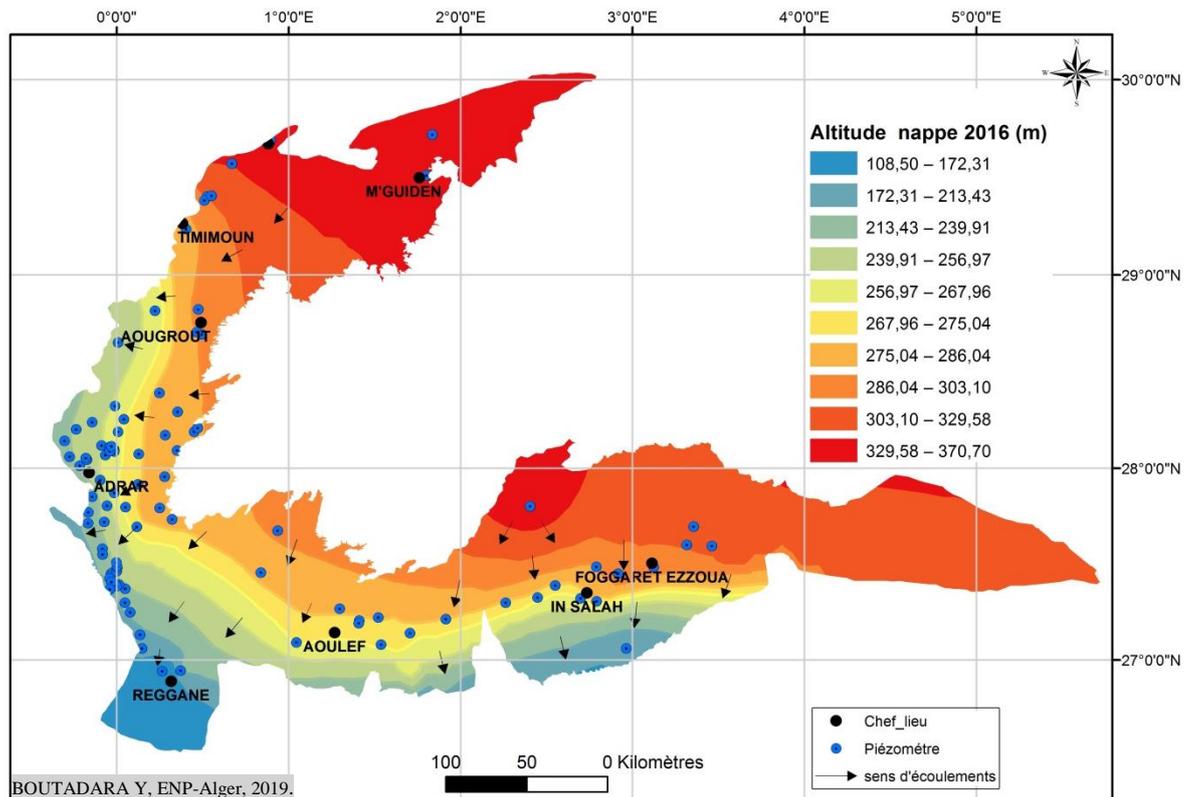


Figure 5-8: Carte piézométrique 2016

5.6. Le rabattement dans la zone d'étude entre 2007 et 2016

La différence piézométrique entre les deux dates a été cartographiée. La carte élaborée représente la différence de niveau de la nappe entre les deux années 2007 et 2016, soit sur une période de 9 ans. Pour ce qui est du niveau piézométrique, une baisse significative de l'ordre de 1,20 m est observée entre 2007 et 2016 au niveau des zones d'activités agricoles et industrielles à Timimoun, Aougrou, Adrar, Reggan, Aoulef et In Salah, plus légèrement jusqu'à 0,60 m dans la vallée de M'guiden, les zones inexploitées au pied du plateau de Tademaït. À l'est d'In Salah, la piézométrie ne semble pas avoir diminué.

La carte de rabattement réalisée montre des baisses de niveaux piézométriques qui peuvent localement atteindre 1,80m. Nous constatons également qu'il existe une très bonne corrélation entre la baisse de niveau et les zones d'activité : les points présentant la baisse de niveau la plus importante (1,00 à 1,80 mètres) sont autour des localités de prélèvement (AEP ou agricoles). Sur la carte de rabattement, nous avons distingué clairement trois zones d'influence différentes :

- Une classe d'influence forte de prélèvement, correspondant à des baisses de niveau de nappe de 1 à 1,80 mètre.

- Une classe d'influence moyenne des prélèvements sur la nappe, correspondant à des baisses de niveau de nappe de 0,27 à 1,00 mètre.
- Une classe d'influence négligeable à nulle des prélèvements sur la nappe, correspondant à des variations de niveau de nappe inférieurs à 27 cm, observée aux pieds du plateau de Tademaït et la zone d'Amguid à l'Est de In Salah.

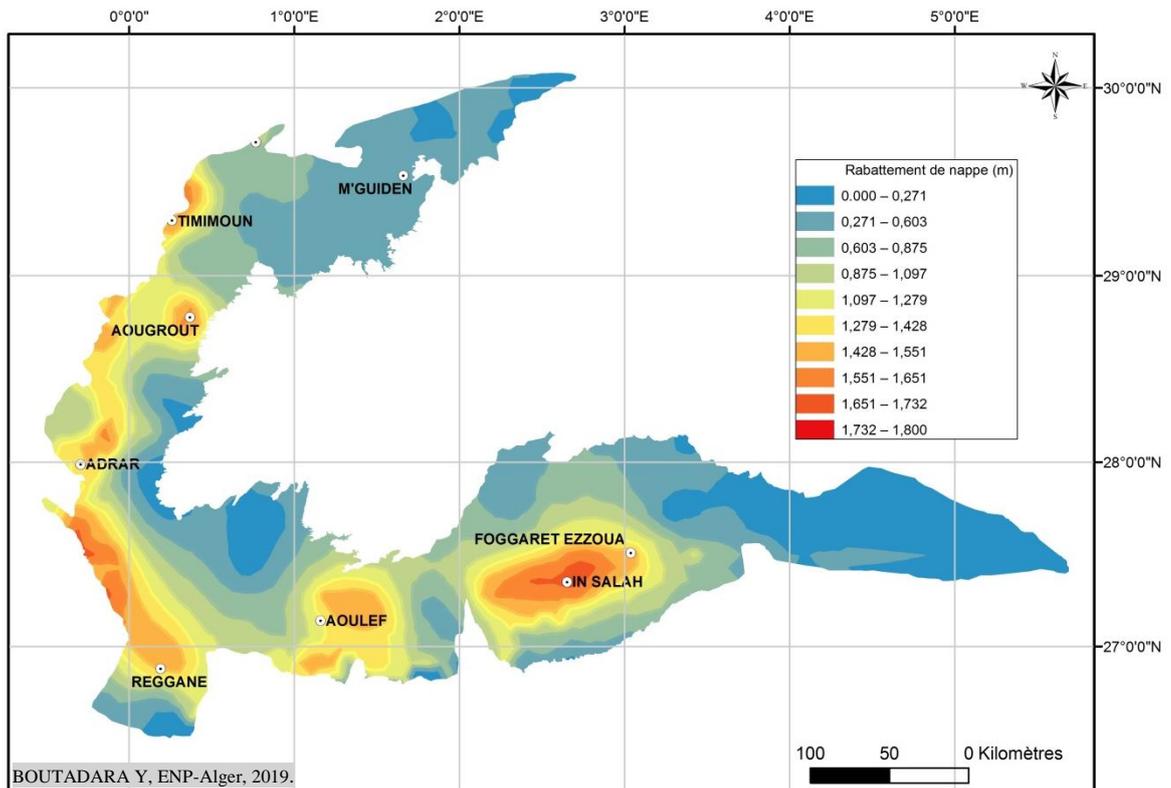


Figure 5-9: Carte du rabattement entre 2007-2016

5.7. Conclusion

La carte de rabattement élaborée dans ce chapitre a été dressée à partir de la superposition de deux cartes piézométrique élaborées pour 2007 et 2016. Cette carte montre les zones qui ont connu une baisse de niveau. En général, un rabattement significatif du niveau de la nappe a été observé dans les champs d'exploitation où les activités agricoles et industrielles sont développées ou dans les zones qui connaissent une grande expansion urbaine à savoir : Timimoun, Aougrout, le groupement des ksours entre Metarfa jusqu'à Reggane, les zones d'Aoulef et In Salah. De manière générale, nous avons constaté clairement, sur cette carte, l'influence des pompages sur les niveaux de la nappe. Les baisses significatifs du niveau peuvent atteindre 1,8 m dans les champs de captage et ne dépassent pas 0,20 m en dehors de ces zones, sachant que les foggaras dans la zone d'étude

sont souvent situées dans les aires d'influences des champs de captage et étant particulièrement sensibles à toute baisse du niveau de la nappe, et ce même à des valeurs de l'ordre de 0,10 m.

*Chapitre 6: L'influence de l'évolution des niveaux de la
nappe sur les foggaras - Cas des Oasis de Bouda*

Chapitre 6 : L'influence de l'évolution des niveaux de la nappe sur les foggaras – Cas des oasis des Bouda

6.1. Introduction

Ces dernières décennies, dans un contexte d'accroissement des prélèvements agricoles et d'AEP, le niveau de la nappe du Continental Intercalaire a baissé de plusieurs dizaines de centimètres dans la zone d'influence des foggaras. Cette situation représente un des principaux facteurs de tarissement des foggaras, celles-ci étant particulièrement sensibles à toute baisse du niveau de la nappe. En effet, les champs de captage des galeries de foggaras se caractérisent par une lame d'eau qui varie de 0,5m à 3,0 m, correspondant à la partie superficielle de la nappe.

Ce chapitre a pour but d'étudier et d'analyser un échantillon des foggaras situées dans la commune de Bouda. Nous nous intéressons à l'influence du rabattement de la nappe entre les années 2007 et 2016 et la remontée de la nappe entre les années 2016 et 2018 sur le système des foggaras.

La question de durabilité du système de foggara a été largement évoquée dans la littérature, ainsi la question qui se pose souvent est : peut-on aujourd'hui déclasser la foggara au détriment des nouvelles techniques de captage, puisque l'installation des forages à la périphérie du champ de captage des foggaras a provoqué un rabattement de la nappe [23]. Une telle situation a engendré une diminution du débit de certaines foggaras et d'autres ont été carrément asséchées [48].

En plus du problème de l'héritage qui mène au morcellement successif des parcelles agricoles et des parts d'eau des paysans, l'apport de nouvelles techniques dans les oasis reste un problème épineux dont les conséquences est l'abandon du système hydraulique millénaire [49]. Alors peut-on trouver un compromis entre les deux techniques (ancienne et moderne) et une sorte de cohabitation. D'ailleurs, le phénomène de la remontée de la nappe provoquée ces dernières années dans l'oasis de Bouda, n'est qu'une réponse à cette interrogation. C'est à travers cette contribution que nous essayons d'apporter quelques informations sur l'effet des forages installés dans le champ de captage des foggaras de l'oasis de Bouda.

6.2. Localisation et situation des oasis de Bouda

Le territoire de cette localité se situe à l'extrême ouest de la nappe continentale intercalaire à 25 km au nord-ouest du chef-lieu d'Adrar. La situation de Bouda constitue un cas d'exemple pour discuter de la compatibilité entre patrimoine fragile et le développement dans divers secteurs.

Dans les oasis de Bouda, 116 foggaras ont été creusés durant plus de 10 siècles. Aujourd'hui, il reste uniquement 19 foggaras en service qui continuent à prouver leur capacité à trouver un équilibre socio-environnemental dans un écosystème fragilisé par les conditions rugueuses du climat hyperaride.

La carte ci-dessous (figure 6-1) illustre la situation des foggaras de Bouda. On y distingue principalement les foggaras pérennes, dégradées et tarées. Nous constatons Une diminution des foggaras fonctionnelles pour des multiples raisons.

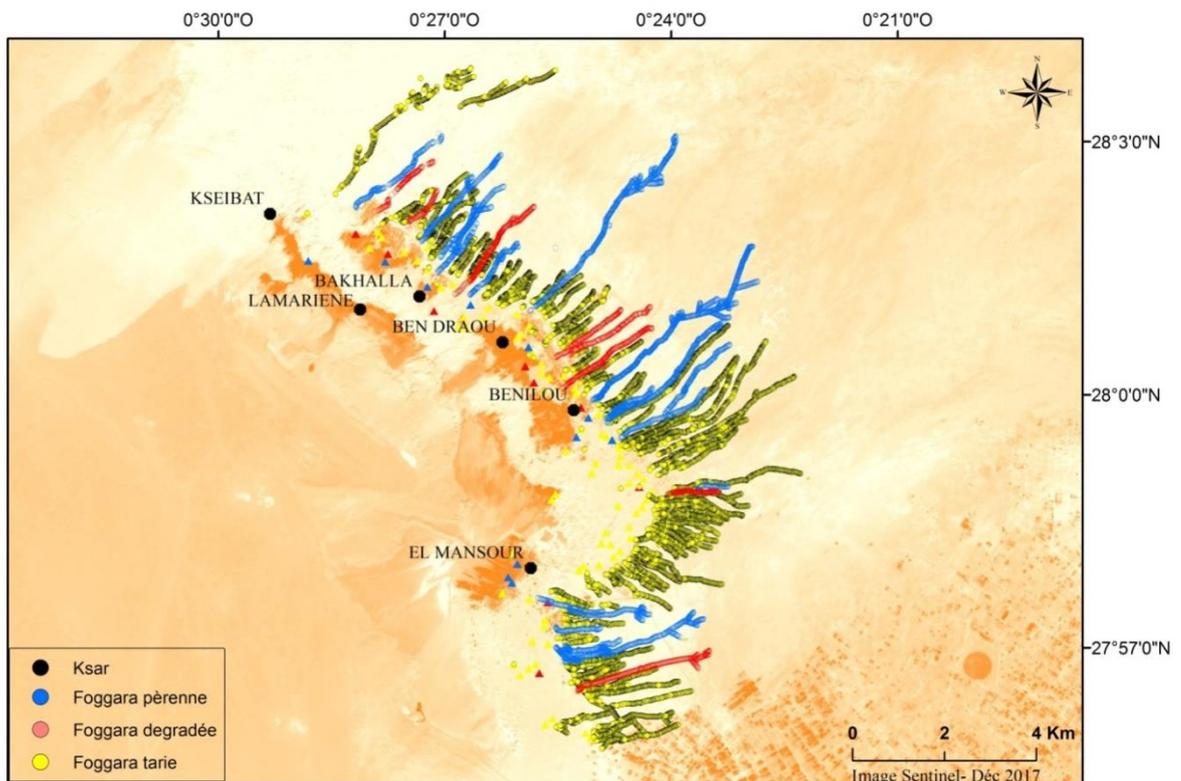


Figure 6-1: Carte de situation des foggaras de Bouda

6.3. L'état quantitatif de la nappe

L'état de la nappe est établi par les mesures périodiques de niveaux piézométriques effectuées dans les différents points d'eau présents sur la zone d'étude.

6.3.1. Rabattements des essais de pompage

Les mesures de niveaux de nappes dans les forages d'AEP effectuées lors des essais de pompage réalisés sur ces ouvrages, permettent d'évaluer les niveaux dynamiques dans les ouvrages en conditions d'exploitation.

Sur la carte ci-dessous (figure 6-2), nous constatons des rabattements de nappe dus aux forages d'AEP qui peuvent dépasser 14,34 m dans le forage de Bouda-IV et 35,80 m au forage El Mansour. Ces valeurs sont significatives et constituent un premier indicateur de l'influence non-négligeable des prélèvements sur les niveaux de nappe.

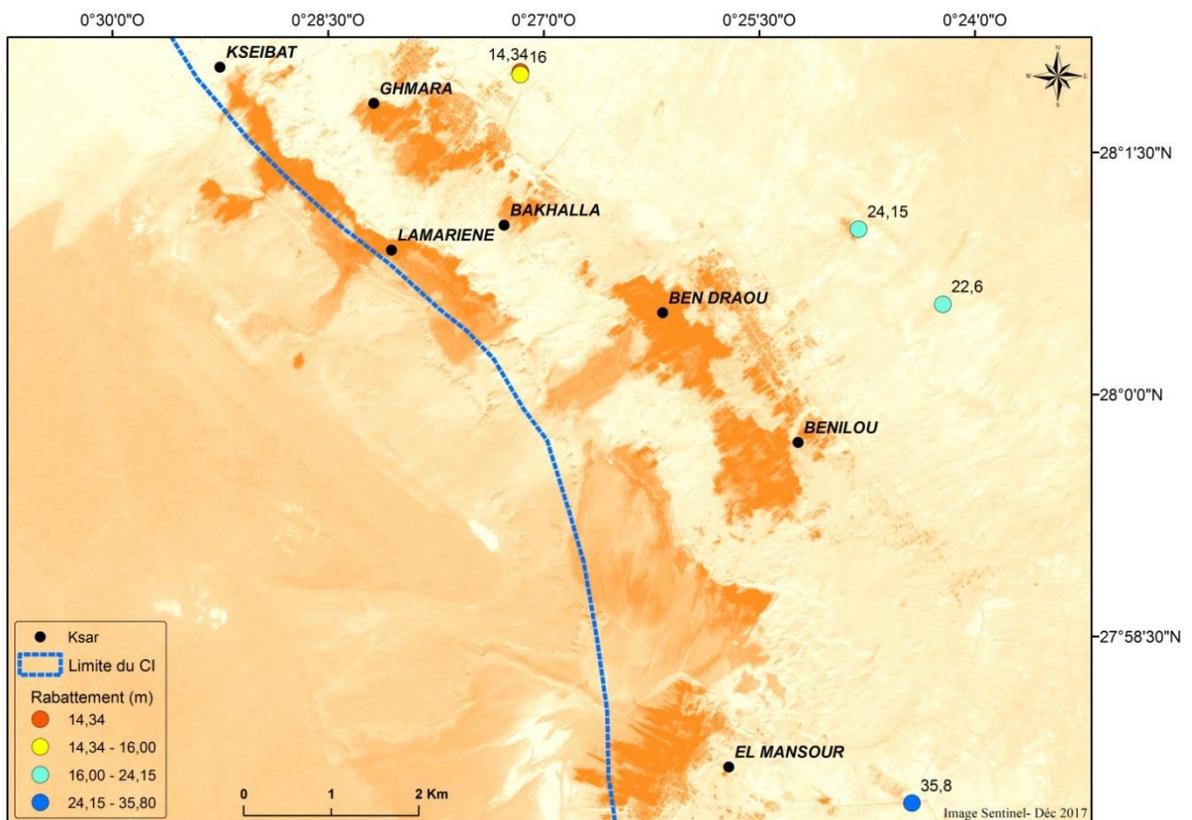


Figure6-2 : Carte des rabattements en conditions d'exploitation à Bouda

6.3.2. Profondeur et l'évolution des niveaux de la nappe

Les enregistrements des mesures de niveaux de la nappe à partir des points d'eau de la zone permettent de suivre l'évolution spatio-temporelle de ces niveaux. Des données sont disponibles pour les campagnes de mesures réalisées en 2007, 2016 et 2018. Le tableau ci-dessous montre les valeurs des profondeurs de la nappe mesurées lors de ces campagnes (Tableau 6-1).

Tableau 6-2: Profondeurs de la nappe entre 2007 et 2018

N°	Nom du Forage	Profondeur de la nappe (m)			Différence (m)	
		2007	2016	2018	2007_2016	2016_2018
1	Bouda IV (Laghmara)	6,68	7,70	7,56	-1,02	+0,14
2	Bouda EL Mansour	7,28	8,65	7,61	-1,37	+1,04
3	Bouda Ben Draou II	7,02	8,20	7,85	-1,18	+0,35
4	Bouda Laghmara Bis I	6,68	7,70	7,56	-1,02	+0,14
5	Bouda Ben Draou I	6,59	7,72	7,45	-1,13	+0,27
6	Piézomètre PZ1	5,95	6,97	6,87	-1,02	+0,10

Les cartes ci-dessous (figure 6-3) illustrent les mesures périodiques des profondeurs de la nappe effectuées durant les années 2007, 2016 et 2018.

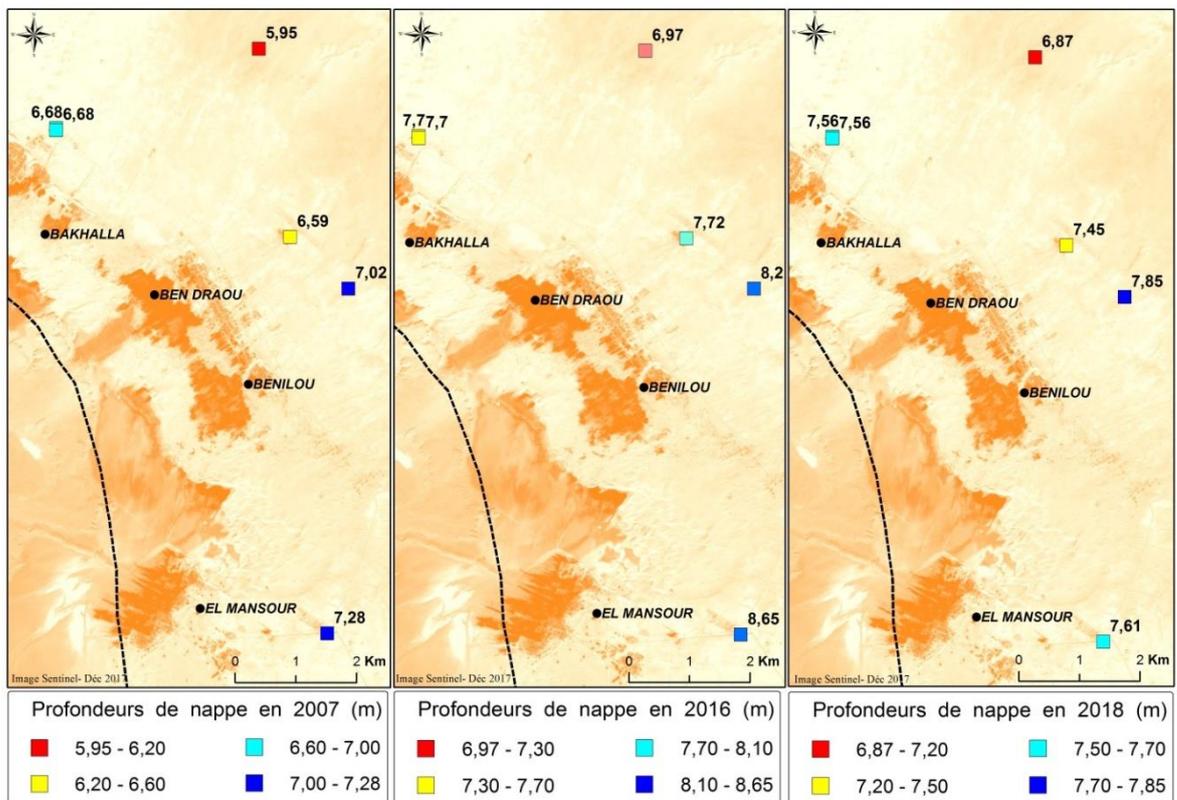


Figure 6-3: Carte des profondeurs de nappe

De l'analyse de ces cartes, il en ressort que :

- En 2007 : les profondeurs de la nappe sont de l'ordre de 7,28 m en amont des oasis El Mansour, 6,59 à 7,00 m dans la partie centrale en amont des oasis Ben Draou et Benilou, et de 5,95 à 6,68 en amont des oasis de Kseibat et Bakhalla.
- En 2016 : nous avons noté une baisse de niveau de la nappe de 1,02 à 1,37 mètre, où la profondeur atteint 8,65 m en amont des oasis El Mansour, des profondeurs de 7,72 à 8,20 m dans la partie centrale en amont des oasis Ben Draou et Benilou, des profondeurs de 6,97 à 7,70 en amont des oasis de Kseibat et Bakhalla.
- En 2018 : nous avons observé une remontée du niveau de la nappe d'environ 0,10 à 1,04 mètre.

6.4. L'impact de l'évolution du niveau de la nappe sur les foggaras de Bouda

6.4.1. Le rabattement de niveau de la nappe 2007 - 2016

Cinq forages destinés à l'alimentation en eau potable de la commune de Bouda ont été réalisés durant la période : 1987-1994, avec un débit total de refoulement égal à 160 l/s, et le niveau dynamique varie jusqu'à 35,80 m. Selon l'inventaire effectué par l'Agence Nationale Ressources Hydriques en 1998, les foggaras de la région de Bouda soutiraient de la nappe du Continental intercalaire un débit de 86 l/s, soit environ les 50% du total pompé par les 5 forages. Ce débit des foggaras a été revu à la baisse en 2011, date d'un jaugeage effectué par l'ANRH, il est descendu à 70 l/s.

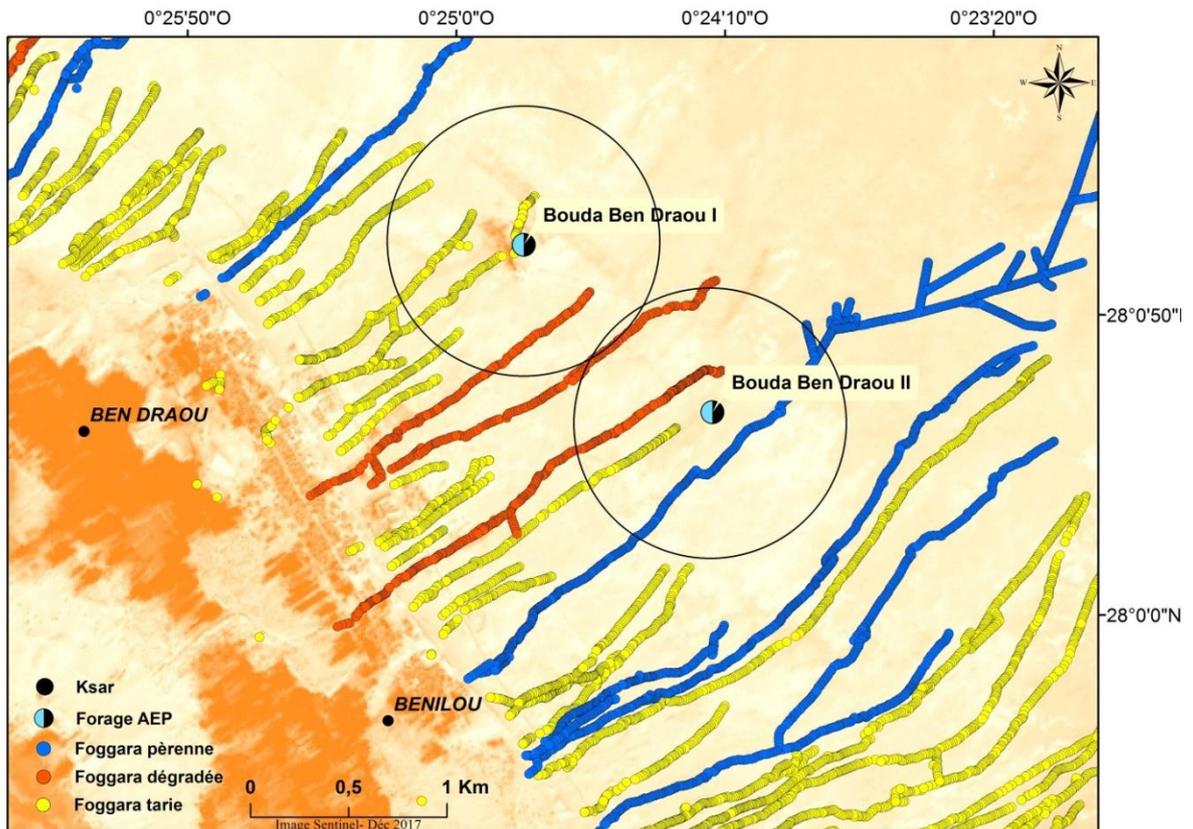


Figure 6-4: Exemple de situation des forages d’AEP par rapport aux foggaras

À titre d’exemple, la distance entre deux forages Ben Draaou I et II situés dans les champs de captage de plusieurs foggaras dégradées et tarées (Ouled Mohamed, Ouled El Brbouchi, Ouled Ghanem, Cheikh Ben Oumar, Yakbine, Ait Amrane, Abdouline et Adouche Djedid) ne dépasse pas les 600 m ce qui engendre une diminution du débit de ces foggaras (figure 6-4).

La carte ci-dessous (figure6-5) présente la situation des foggaras de les oasis de Bouda par rapport au rabattement de niveau de la nappe entre les années 2007 et 2016. Nous constatons qu’il existe une corrélation entre la baisse de niveau de la nappe et le tarissement des foggaras. Les foggaras présentant un état de tarissement sont les plus proches des points de prélèvement et situées dans leur rayon d’influence.

Nous distinguons clairement :

- Un fort rabattement de niveau de la nappe de 1,10 à 1,33 m autour de forage El Mansour à un rayon de 3,90 km.

- Un rabattement moyen de 0,80 à 1,00m, correspondant aux prélèvements des deux forages Ben Draou-I et II, est observé à un rayon de 600 m.
- Un rabattement de 0,60 à 0,80 m, correspondant au prélèvement des deux forages Bouda-IV et Laghmara Bis-I, est observé à un rayon de 3,48 km.

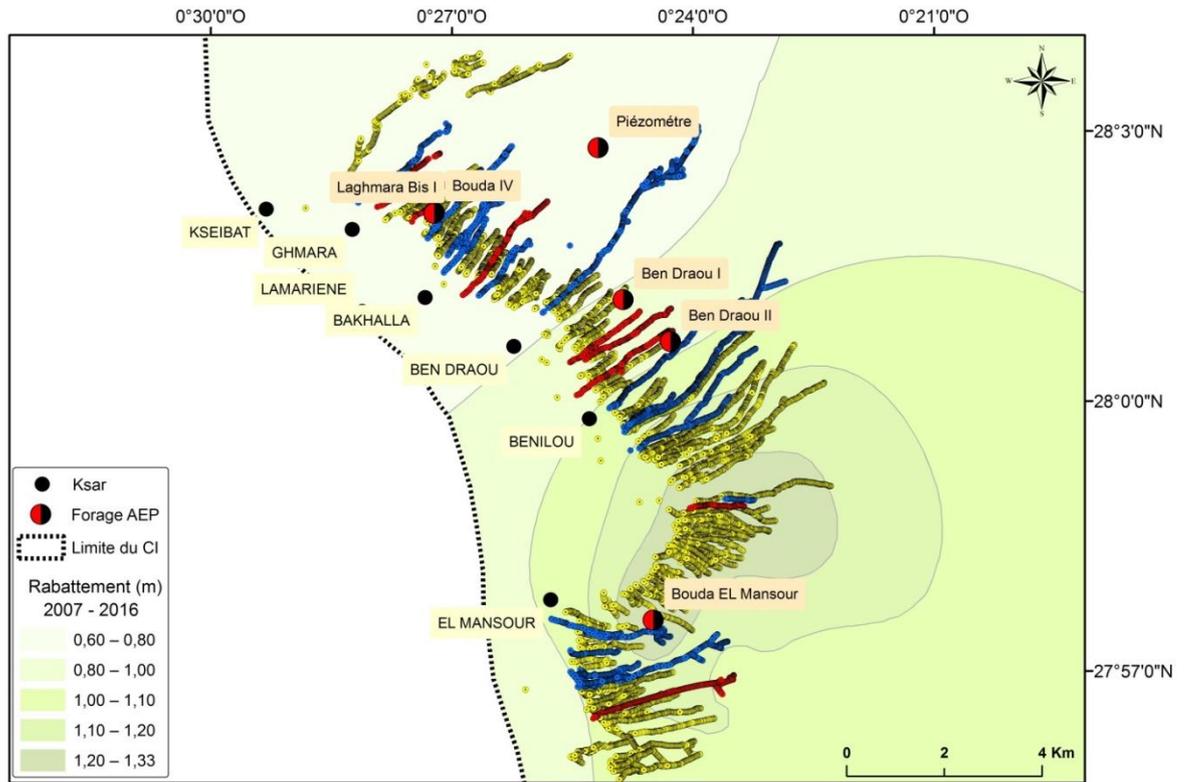


Figure 6-5: Carte du rabattement 2007-2016

6.4.2. La remontée de niveau de la nappe 2016 – 2018

Dans le cadre d'un projet de transfert qui avait pour objectif d'améliorer la qualité des eaux d'alimentation en eau potable de la commune de Bouda, les services des ressources en eau ont décidé d'arrêter au mois de mars 2016 le fonctionnement des 5 forages d'AEP situés à Bouda et de mettre en service deux forages réalisés dans la zone d'oued Ghzala à 25 km à l'Est de Bouda et loin du champ de captage des foggaras.

L'arrêt de pompage dans les cinq forages situés au niveau de champ de captage de Bouda a provoqué un déséquilibre de l'écoulement dans l'ensemble des foggaras. Environ 50% des foggaras (8 sur 19) ont vu leurs débits augmentés et dépassant largement ceux de 2011. À titre d'exemple, les débits des foggaras de Hadj Amar Kebir et Yellou ont augmenté de

50% par rapport à ceux de 2011. Le débit de la foggara d'Igmou a augmenté de 100% par rapport au dernier jaugeage (2011).

Cette nouvelle situation engendrée par le retour à l'état initial (sans pompage) n'était pas prévisible. Les propriétaires des foggaras ont constaté l'évolution du débit des foggaras juste après l'arrêt des forages (en 2016), mais après une année (en 2017) la situation est devenue préoccupante puisque elle est passée de la phase de croissance du débit à la phase de la remontée de la nappe après 2016. Personne ne s'attendait à cet excès d'eau. Personne ne peut prévoir l'arrêt et la stabilisation de cette remontée. Une telle situation provoquera certainement une accélération de la salinisation des sols et l'asphyxie de plusieurs palmiers dattiers. Profitons de cette situation, les services des ressources en eau ont lancé un projet de réhabilitation de 4 foggaras. Il s'agit de Taier, El Hadjadj, Adouche Djedid et Mohamed Abdellah.

Cette situation inattendue a provoqué chez les agriculteurs une scène de psychose et de peur et qui leur a permis de trouver des solutions urgentes et rapides. Comme première solution, plusieurs tronçons de seguias ont subi des modifications de la part des oasiens pour permettre à l'eau de se déverser avant d'atteindre la palmeraie. Ceci justifie la gravité de l'importance de l'eau de la foggara qui a largement dépassée son débit initial (son débit de naissance). Aujourd'hui, la section du canal n'arrive plus à véhiculer le nouveau débit (photo 6-1). Dans l'état actuel personne ne peut maîtriser l'eau de la foggara, l'eau est partout où même des lacs d'eau se sont formés dans la partie basse de la palmeraie (photo 6-2). La force de l'écoulement a même causé des dégâts matériels comme la destruction des ouvrages hydrauliques (Photo 6-3).



Photo 6-1: Segua de la foggara El Hadjadj [12]



Photo 6-2: La sebkha de Bouda (22/01/2017) [12]



Photo 6-3: Exutoire de la foggara Hadj Amar Lekbir (22 février 2017)

Les graphiques présentées ci-dessous présentent la remontée de nappe au niveau de deux piézomètres situés à proximité des champs captages AEP de Bouda.

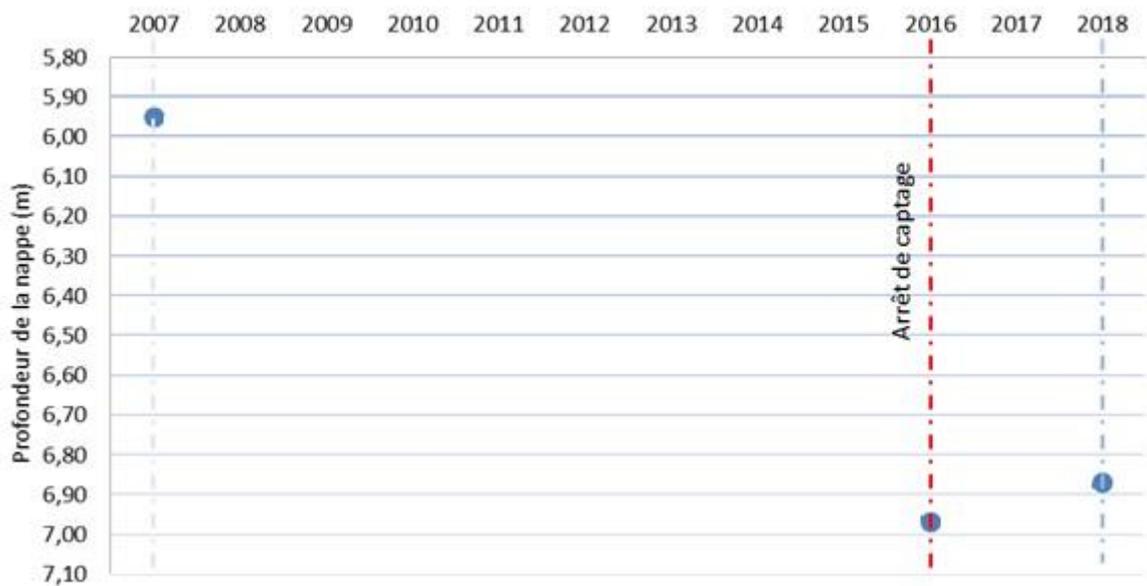


Figure 6-6 : Observation de la nappe au piézomètre PZ1

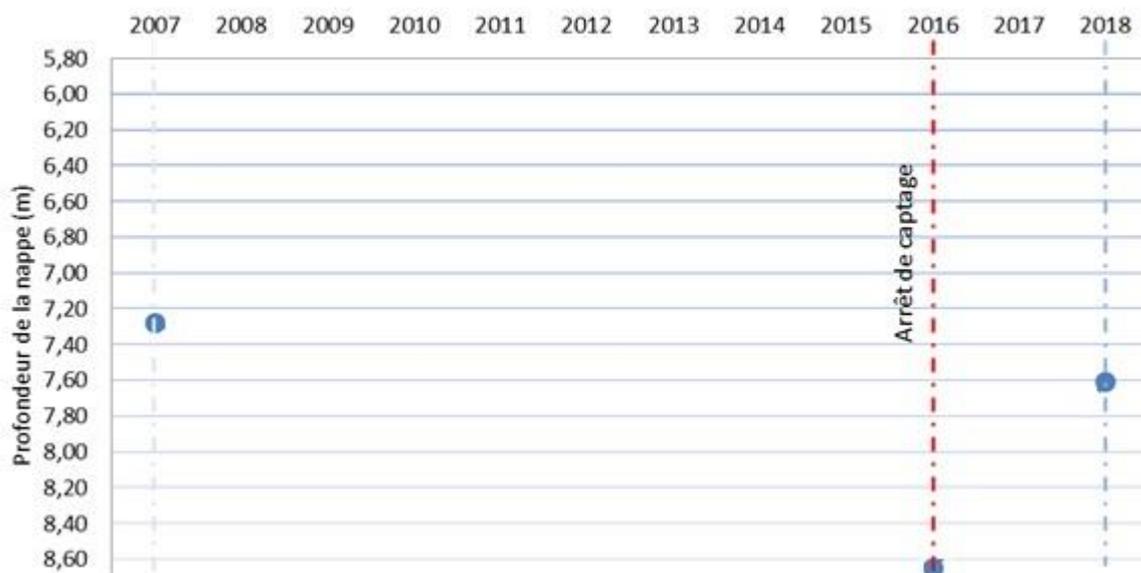


Figure 6-7 : Observation de la nappe au piézomètre PZ2

Nous constatons clairement une remontée de nappe aux deux piézomètres PZ-1 de l'ordre 0,10 m, et PZ-2 de l'ordre 1,04 m entre 2016 et 2018. Cette remontée de nappe constitue un indicateur objectif de l'influence significative des prélèvements par pompage sur les niveaux de nappe. Elle permet également de quantifier l'impact des prélèvements sur les foggaras de Bouda, dans la mesure où les piézomètres sont situés à proximité des champs de captage des foggaras de Bouda. La lecture des deux figures permet de distinguer deux causes probables d'influence. La première est due à l'effet direct de pompage dans les cinq forages abandonnés, et cela peut être confirmé par la remise au niveau de la nappe dans le piézomètre PZ-2 situé dans le champ de captage d'El Mansour. L'autre partie de rabattement est due à d'autres facteurs externes à la zone de Bouda. Cela peut être justifié par la remontée de la nappe qui n'a pas pu atteindre son niveau initial dans le PZ-1 situé un peu plus loin du champ de captage de Bouda.

Nous nous attendions donc à une augmentation des débits des foggaras de Bouda à partir de 2016, et c'est exactement le cas (photo 6-3) qui a été rencontré durant la période 2016-2018. Des enquêtes ont été menées auprès des agriculteurs et de la population locale pour avoir des informations sur le phénomène de la remontée de la nappe depuis Mai 2017. Un suivi rigoureux de l'évolution des débits des foggaras de Bouda a été réalisé et basé sur des jaugeages.

Tableau 6-3 : Débits des foggaras jaugés en 2018 dans l'oasis de Bouda

N°	Commune	Palmeraies	Foggara	Etat de foggaras	Débit 2011 (l/s)	Débit 2018 (l/s)	Différence	Observation
1	Bouda	El Mansour	Bakka Youcef	Pérenne	0,8	0	↓ -0,8	Ensablée
2	Bouda	El Mansour	Igmou	Pérenne	3,9	8,1	↑ 4,2	
3	Bouda	Ben Yellou	Aadjouch	Pérenne	4,9	8,4	↑ 3,5	
4	Bouda	Ben Yellou	El Djadida	Pérenne	4,9	1,6	↓ -3,3	Ensablée
5	Bouda	Ben Yellou	Yellou	Pérenne	4,3	6,28	↑ 1,98	
6	Bouda	Ben Draou	Hammou	Pérenne	0,2	1,9	↑ 1,7	
7	Bouda	Laghmara	Taier	Pérenne	1,4	-	— 0	En réhabilitation
8	Bouda	Laghmara	El Hadjadj	Pérenne	2,6	-	— 0	En réhabilitation
9	Bouda	Ksieba	Hadj Amar Kebir	Pérenne	10	16,1	↑ 6,1	
10	Bouda	Ksieba	Ahmed Seghir (el bour)	Pérenne	1,3	1,1	↓ -0,2	Ensablée
11	Bouda	Zaouiet Sidi Hida	Terbzou	Pérenne	0,4	0,4	— 0	
12	Bouda	Zet Cheikh Ben Oumar	Adouche Djedid	Pérenne	3,5	-	— 0	En réhabilitation
13	Bouda	Zet Cheikh Ben Oumar	Ait Amrane Abdouline	Pérenne	4,2	1,4	↓ -2,8	Ensablée
14	Bouda	Zet Cheikh Ben Oumar	Tamlal	Pérenne	14,3	14,5	↑ 0,2	
15	Bouda	Aghrem Ali	Guer Mekar	Pérenne	2,1	1,4	↓ -0,7	Ensablée
16	Bouda	Bakhala	Mohamed Abdellah	Pérenne	0,8	-	— 0	En réhabilitation
17	Bouda	Ben Yellou	Guemma	Pérenne	0	5,4	↑ 5,4	
18	Bouda	Ouariene	Bouزيد	Pérenne	8,5	8,5	— 0	
19	Bouda	Ouariene	Boukhzer	Pérenne	0	2,6	↑ 2,6	

6.5. L'influence du niveau de la nappe sur les foggaras de Bouda

Afin d'éclairer l'effet de la fluctuation de niveau de la nappe (rabattement 2007-2016 et remontée 2016-2018) sur le fonctionnement des foggaras de Bouda, nous avons choisi trois foggaras différentes dans les zones de Bouda pour l'objet d'une étude plus détaillée.

a) La foggara Hadj Amar Lekbir

La foggara Hadj Amar Lekbir se caractérise par un débit permanent qui est passé de 10 l/s en 2011 à 16,10 l/s le 25/02/2017. Elle compte 365 puits d'aération, composée d'une galerie de pente moyenne de 4‰ et de longueur égale à 2 669,57 m et de 1 568,47 m du canal principal aboutissant à une Kasria principale sur une altitude du terrain de 232,77 m.

Le tableau ci-après illustre les différentes valeurs de la profondeur de la nappe dans la foggara extraites à partir des cartes piézométriques 2007 et 2016 élaborées dans le chapitre précédent et les mesures de la campagne 2018.

Tableau 6-4: Caractéristiques de la foggara Hadj Amar Lekbir

Point observé	Distance cumulée	Profondeur radier (m)	Profondeur (m)			Rabatement de la nappe (m)	Remontée de la nappe (m)	Lame d'eau (m)			Longueurs de galerie		
			2007	2016	2018			2007	2016	2018	2007	2016	2018
Kasria	0,00	0,00	16,69	17,29	17,15	0,60	0,14	▼16,69	▼17,29	▼17,15	Galerie adductrice 1676,12 m	Galerie adductrice 3613,64 m	Galerie adductrice 3567,76 m
P_001	1568,47	4,69	21,40	22,08	21,94	0,68	0,14	▼16,71	▼17,39	▼17,25			
P_006	1616,14	4,83	5,43	6,11	5,97	0,68	0,14	▼-0,60	▼-1,28	▼-1,14			
P_008	1636,64	4,89	5,28	5,96	5,82	0,68	0,14	▼-0,38	▼-1,07	▼-0,93			
P_009	1646,93	4,92	5,27	5,95	5,82	0,68	0,13	▼-0,34	▼-1,02	▼-0,90			
P_010	1665,93	4,98	5,22	5,90	5,78	0,68	0,13	▼-0,24	▼-0,92	▼-0,79			
P_011	1676,12	5,01	5,06	5,74	5,62	0,68	0,13	▼-0,05	▼-0,73	▼-0,60			
P_012	1690,62	5,05	5,00	5,69	5,56	0,68	0,13	▲0,05	▼-0,63	▼-0,50			
P_024	1806,93	5,40	4,99	5,68	5,56	0,69	0,12	▲0,41	▼-0,28	▼-0,16			
P_046	1984,32	8,55	8,13	8,83	8,71	0,70	0,12	▲0,42	▼-0,28	▼-0,16			
P_060	2111,35	11,09	10,92	11,62	11,50	0,71	0,12	▲0,17	▼-0,53	▼-0,41			
P_095	2403,73	15,87	15,69	16,41	16,29	0,72	0,12	▲0,18	▼-0,54	▼-0,42			
P_123	2821,04	16,55	16,35	17,09	16,97	0,74	0,12	▲0,20	▼-0,54	▼-0,42			
P_177	3331,03	16,80	16,58	17,35	17,23	0,77	0,12	▲0,22	▼-0,55	▼-0,43			
P_178	3338,28	16,81	16,58	17,35	17,23	0,77	0,12	▲0,22	▼-0,55	▼-0,43			
P_198	3567,76	16,92	16,30	17,08	16,96	0,77	0,12	▲0,62	▼-0,16	▼-0,04			
P_199	3580,90	16,92	16,27	17,04	16,92	0,77	0,12	▲0,66	▼-0,12	▲0,00			
P_203	3613,64	16,94	16,18	16,96	16,84	0,78	0,12	▲0,76	▼-0,02	▲0,10			
P_204	3625,96	16,95	16,15	16,93	16,81	0,78	0,12	▲0,79	▲0,01	▲0,13			
P_222	3857,36	17,06	15,57	16,37	16,25	0,79	0,12	▲1,49	▲0,69	▲0,81			
P_223	3872,39	17,07	15,54	16,33	16,23	0,79	0,10	▲1,53	▲0,74	▲0,84			
P_230	3973,23	17,12	15,28	16,08	15,98	0,80	0,10	▲1,83	▲1,03	▲1,13			
P_234	4145,04	17,20	14,85	15,65	15,55	0,80	0,10	▲2,35	▲1,55	▲1,65			
P_235	4156,13	17,21	14,83	15,63	15,53	0,80	0,10	▲2,38	▲1,58	▲1,68			
P_239	4196,17	17,23	14,73	15,53	15,43	0,80	0,10	▲2,50	▲1,70	▲1,80			
P_365	4238,04	17,25	14,62	15,42	15,32	0,80	0,10	▲2,62	▲1,83	▲1,93			

En particulier, le tableau reprend l'évaluation de la production en eau de la foggara par le calcul des différentes lames d'eau dans la galerie drainante entre l'année 2007, 2016 et l'année 2018.

Le tableau reprend également la détermination de deux parties de drainage et d'adduction des eaux de la nappe en fonction des années d'observations, nous distinguons clairement :

- En 2007 : une longueur de 2 561,92 m qui pénètre dans la nappe ;
- En 2016 : une diminution significative dans la partie drainante jusqu'à 624,40m de longueur ;
- En 2018 : la récupération dans la longueur de la partie de production est d'environ 670,28m.

b) La foggara Aït Amrane

Cette foggara située au niveau de l'oasis de Ben Draaou qui se prolonge entre deux forages d'AEP (Ben Draaou-I et II), se caractérise par un débit réduit brusquement de 4,20 l/s en 2011 à 1,40 l/s en 2018. Elle compte 173 puits liés entre eux par une galerie inclinée avec

une pente de 3,70 ‰ et de longueur de 2 551,14 mètre, se termine par kasria principale sur une altitude de 230,69m.

Le tableau ci-après illustre les Caractéristiques de la foggara Aït Amrane en 2007, 2016 et 2018.

Tableau 6-5 : Caractéristiques de la foggara Aït Amrane

Point observé	Distance cumulée	Profondeur radier (m)	Profondeur (m)			Rabattement de la nappe (m)	Remontée de la nappe (m)	Lame d'eau (m)			Longueurs de galerie		
			2007	2016	2018			2007	2016	2018	2007	2016	2018
Kasria	0,00	0,19	14,68	15,81	15,54	1,13	0,27	▼-14,49	▼-15,62	▼-15,35	Galerie adductrice 1644,55 m	Galerie adductrice 1902,62 m	Galerie adductrice 1853,62 m
P_1	683,20	2,38	11,04	12,18	11,91	1,15	0,27	▼-8,66	▼-9,80	▼-9,53			
P_2	713,72	2,39	10,77	11,92	11,65	1,15	0,27	▼-8,38	▼-9,53	▼-9,26			
P_12	872,87	2,64	9,59	10,74	10,46	1,15	0,28	▼-6,95	▼-8,10	▼-7,82			
P_61	1456,33	4,04	5,74	6,89	6,58	1,15	0,31	▼-1,70	▼-2,85	▼-2,54			
P_73	1559,44	4,30	5,07	6,22	5,91	1,15	0,31	▼-0,77	▼-1,92	▼-1,61			
P_81	1644,55	4,56	4,56	5,72	5,41	1,15	0,31	▼-0,01	▼-1,16	▼-0,85			
P_102	1853,62	7,40	6,65	7,80	7,49	1,15	0,31	▲ 0,75	▼-0,40	▼-0,09			
P_103	1865,21	7,73	6,89	8,04	7,73	1,15	0,31	▲ 0,84	▼-0,30	▲ 0,01			
P_107	1902,62	8,82	7,68	8,83	8,52	1,15	0,31	▲ 1,14	▼-0,01	▲ 0,30			
P_108	1911,15	9,07	7,85	9,01	8,70	1,15	0,31	▲ 1,21	▲ 0,06	▲ 0,37			
P_109	1924,60	9,46	8,14	9,29	8,98	1,15	0,31	▲ 1,32	▲ 0,17	▲ 0,48			
P_111	1970,92	10,38	9,11	10,26	9,95	1,15	0,31	▲ 1,27	▲ 0,12	▲ 0,43			
P_113	1994,73	10,86	9,61	10,76	10,45	1,15	0,31	▲ 1,25	▲ 0,10	▲ 0,41			
P_116	2029,16	11,55	10,33	11,48	11,17	1,15	0,31	▲ 1,21	▲ 0,06	▲ 0,37			
P_118	2049,58	11,96	10,76	11,91	11,60	1,15	0,31	▲ 1,19	▲ 0,05	▲ 0,36			
P_121	2080,50	12,57	11,41	12,56	12,25	1,15	0,31	▲ 1,16	▲ 0,02	▲ 0,33			
P_122	2091,91	12,80	11,65	12,80	12,49	1,15	0,31	▲ 1,15	▲ 0,00	▲ 0,31			
P_123	2113,23	13,23	12,10	13,25	12,94	1,15	0,31	▲ 1,13	▼-0,02	▲ 0,29			
P_153	2407,22	19,11	18,27	19,42	19,11	1,15	0,31	▲ 0,84	▼-0,31	▲ 0,00			
P_154	2415,95	19,28	18,46	19,61	19,30	1,15	0,31	▲ 0,83	▼-0,32	▼-0,01			
P_165	2506,64	21,10	20,36	21,51	21,20	1,15	0,31	▲ 0,74	▼-0,41	▼-0,10			
P_169	2525,69	21,48	20,76	21,91	21,60	1,15	0,31	▲ 0,72	▼-0,43	▼-0,12			
P_171	2537,21	21,71	21,00	22,15	21,84	1,15	0,31	▲ 0,71	▼-0,45	▼-0,14			
P_172	2545,00	21,86	21,17	22,32	22,01	1,15	0,31	▲ 0,70	▼-0,45	▼-0,14			
P_173	2551,14	21,99	21,29	22,43	22,12	1,14	0,31	▲ 0,69	▼-0,44	▼-0,13			

Pour cette foggara, nous constatons ce qui suit :

- En 2007 : la foggara Aït Amrane pénétrait dans la nappe sur une longueur productive de 906,59m ;
- En 2016 : la foggara Aït Amrane a perdu 459,23m de la longueur de sa galerie productive ;
- En 2018 : la foggara a récupéré 364,31m de production en eau sur la partie drainante, ceci est dû à la remontée de la nappe après 2016.

c) La foggara Abnkour

La foggara Abnkour de l'oasis de Ben Yellou a été classée tarie selon l'inventaire réalisé par l'ANRH en 2011. Le diagnostic que nous avons réalisé en 2018, nous a permis de

constaté la présence d'eau dans l'amont de la foggara et que son tarissement déclaré par l'ANRH est dû à un manque d'entretien. Cette foggara est formée par une série de 209 puits d'aération reliés entre eux par une galerie de 1 995,42m de longueur. Cette dernière acheminait l'eau sur une pente de 2‰ jusqu'à la kasria principale située sur une d'altitude de 231,3 m.

Les caractéristiques de la foggara Abnkour sont données dans le tableau ci-après.

Tableau 6-6: Caractéristiques de la foggara Abnkour

N° puits observé	Distance cumulée	Profondeur radier (m)	Profondeur (m)			Rabattement de la nappe (m)	Remontée de la nappe (m)	Lame d'eau (m)			Longueurs de galerie		
			2007	2016	2018			2007	2016	2018	2007	2016	2018
Kasria	0,00	1,10	8,64	9,95	9,21	1,31	0,74	▼-7,54	▼-8,85	▼-8,11	Galerie adductrice 418,75 m	Galerie adductrice 489,77 m	Galerie adductrice 444,64 m
P_1	84,65	1,35	8,15	9,46	8,72	1,31	0,74	▼-6,80	▼-8,11	▼-7,37			
P_12	193,30	3,51	8,14	9,46	8,72	1,31	0,74	▼-4,63	▼-5,95	▼-5,21			
P_15	229,94	3,87	7,78	9,09	8,35	1,31	0,74	▼-3,91	▼-5,22	▼-4,48			
P_16	301,92	4,58	7,06	8,37	7,63	1,31	0,74	▼-2,47	▼-3,78	▼-3,04			
P_24	376,87	5,33	6,31	7,62	6,88	1,31	0,74	▼-0,98	▼-2,29	▼-1,55			
P_26	396,70	5,52	6,11	7,42	6,68	1,31	0,74	▼-0,59	▼-1,90	▼-1,16			
P_27	408,29	5,64	5,99	7,31	6,57	1,31	0,74	▼-0,36	▼-1,67	▼-0,93			
P_28	418,75	5,74	5,89	7,20	6,52	1,31	0,68	▼-0,15	▼-1,46	▼-0,78			
P_29	428,62	5,84	5,79	7,10	6,42	1,31	0,68	▲0,05	▼-1,26	▼-0,58			
P_31	444,64	6,00	5,63	6,94	6,26	1,31	0,68	▲0,37	▼-0,94	▼-0,26	Galerie drainante 1576,67 m	Galerie drainante 252,04 m	Galerie drainante 1323,54 m
P_32	460,79	6,16	5,47	6,78	6,10	1,31	0,68	▲0,69	▼-0,62	▲0,06			
P_35	489,77	6,42	5,18	6,49	5,81	1,31	0,68	▲1,24	▼-0,07	▲0,61			
P_36	498,46	6,50	5,09	6,40	5,72	1,31	0,68	▲1,40	▲0,09	▲0,77			
P_50	619,05	7,58	6,13	7,44	6,76	1,31	0,68	▲1,45	▲0,14	▲0,82			
P_51	629,50	7,68	6,23	7,54	6,92	1,31	0,62	▲1,44	▲0,13	▲0,75			
P_53	644,69	7,81	6,38	7,69	7,07	1,31	0,62	▲1,43	▲0,12	▲0,74			
P_63	733,30	8,57	7,25	8,56	7,94	1,31	0,62	▲1,32	▲0,01	▲0,63			
P_64	741,81	8,64	7,33	8,64	8,02	1,31	0,62	▲1,31	▲0,00	▲0,62			
P_65	748,92	8,70	7,40	8,71	8,09	1,31	0,62	▲1,30	▼-0,01	▲0,61			
P_76	851,29	9,59	8,40	9,72	9,10	1,31	0,62	▲1,18	▼-0,13	▲0,49			
P_168	1688,40	11,49	10,40	11,71	11,17	1,31	0,54	▲1,09	▼-0,23	▲0,31	Galerie tariée 1253,61 m	Galerie tariée 227,24 m	
P_178	1768,18	11,49	10,39	11,70	11,16	1,31	0,54	▲1,09	▼-0,22	▲0,32			
P_179	1774,66	10,84	10,46	11,77	11,23	1,31	0,54	▲0,39	▼-0,92	▼-0,38			
P_198	1916,57	11,02	10,66	11,97	11,43	1,31	0,54	▲0,36	▼-0,95	▼-0,41			
P_207	1982,27	11,28	10,66	11,96	11,42	1,31	0,54	▲0,62	▼-0,68	▼-0,14			
P_208	1988,59	11,31	10,66	11,96	11,42	1,31	0,54	▲0,65	▼-0,66	▼-0,12			
P_209	1995,42	11,33	10,66	11,96	11,42	1,31	0,54	▲0,68	▼-0,63	▼-0,09			

D'après le tableau, nous distinguons clairement que :

- En 2007 : la foggara se caractérisait par une partie drainante à l'amont où s'effectue la collecte des eaux souterraine sur une longueur de 1576,67m. Cela correspond à une lame d'eau moyenne d'ordre 0,95m ;
- En 2016 : en raison du rabattement significatif, Abnkour a perdu en amont une grande partie de sa galerie productive de l'ordre de 1324,63m ;
- En 2018 : après la remontée, une longueur de 253,13m de la galerie drainante a été récupérée avec une lame d'eau moyenne égale 0,56m.

6.6. Conclusion

Sous l'influence des prélèvements d'AEP, les niveaux de la nappe du CI ont sensiblement fluctué ces dernières années dans la zone de Bouda. Entre 2007 et 2016, les niveaux de la nappe ont baissé de plus de 1,37 m en certains points d'observation situés dans les champs de captage. Entre 2016 et 2018 dans les mêmes points d'observation, les niveaux de nappe ont remonté jusqu'à 1,00 m.

Les cartes piézométriques élaborées dans le cadre de ce travail de recherche et les observations périodiques ont permis de prouver une relation entre la baisse du rendement des foggaras et les prélèvements dans son champ de captage. Cette situation est particulièrement préjudiciable pour les foggaras, dont le mode de fonctionnement est très vulnérable aux baisses - mêmes minimales - de niveaux de nappe dans leur zone d'alimentation. Nous constatons ainsi que des rabattements minimaux peuvent engendrer la diminution des débits des foggaras et qu'un remonté d'une dizaine de centimètres peut faire augmenter leur production.

CONCLUSION GENERALE

Face au développement dans les différents secteurs économiques, la ressource en eau unique et fossile dans la région du Gourara, Touat et Tidikelt subit une surexploitation durant ces quatre dernières décennies. Par conséquent, le système de captage traditionnel (foggara) connaît une désorganisation remarquable due au rabattement de la nappe souterraine et aux reconfigurations socioéconomiques. Pour une gestion optimale des ressources en eau et la protection du système hydraulique millénaire (la foggara) dans la partie aval du réservoir du Continentale Intercalaire (CI), nous avons besoin d'améliorer les connaissances sur les ressources en eau dans cette région. Dans cette optique, le présent travail de recherche a pour objectif d'explorer et d'analyser la situation actuelle de cette ressource en eau dans la zone d'étude [47].

La zone étudiée s'étend sur une superficie de 70 321 km² et intègre plus de 2283 foggaras dont 815 foggaras pérennes. Le débit total des foggaras de la zone est passé de 3,665 m³/s en 1960 à 1,776 m³/s en 2015. Ces foggaras irriguent une superficie de 15 121 hectares répartis sur environ 300 oasis. D'un point de vue hydrologique, la partie sud-ouest du CI subit des écoulements irréguliers issus surtout de l'Atlas saharien, du bassin versant de la Saoura et un peu moins du bassin versant de Melrhir. Sur la majorité du territoire de la zone d'étude, la nappe d'eau souterraine exploitée par les foggaras est une nappe libre, facilement accessible et de faibles profondeurs jusqu'à 60 m. Ainsi, l'introduction des nouvelles techniques d'exploitation de ressource a fait considérablement augmenter les débits exploités qui ont conduit à des rabattements remarquables dans le niveau piézométrique de la nappe sur l'ensemble de la zone d'étude.

Les différentes données collectées et issues des bases statistiques des organismes publics concernés et des enquêtes du terrain ont permis de construire une base de données intéressante sur la ressource en eau dans la zone. Cette base a été intégrée avec des fonds cartographiques géo-référenciés pour construire un Système d'Information Géographique (SIG) qui nous a permis de stocker, gérer et analyser les données collectées. Le SIG a permis également de produire un ensemble de cartes thématiques en mode raster qui peuvent être utilisées afin de mieux comprendre l'hydrogéologie de la zone et aider à la prise de décision dans la gestion de la ressource sur l'ensemble de la zone.

En ce qui concerne la géométrie de l'aquifère, les cartes élaborées ont montré que la ressource en eau se trouve sur une faible profondeur sur l'ensemble de la zone. Elle varie entre 10 à 20 m dans la partie nord (Gourara) et entre 40 et 60 m dans la partie sud de la zone (sud du Touat et Tidikelt). Cette situation rend la ressource vulnérable à la pollution et à la salinité. L'épaisseur moyenne de la nappe varie entre 150 à 300 m sur l'ensemble de la zone à l'exception des bordures Nord-est et Sud de la zone où l'épaisseur de l'aquifère est de moins de 100 m.

L'analyse des données des forages (situation ; données des essais de pompage, etc.) a permis d'élaborer un ensemble de cartes des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe. Les données piézométriques ont été utilisées pour l'élaboration de la carte piézométrique pour l'année 2007. Cette carte montre que le sens d'écoulement n'est toujours le même sur l'ensemble de la zone. Dans le Gourara, le sens d'écoulement est généralement du nord-est vers le sud-ouest. En ce qui concerne le Touat, le sens d'écoulement est de l'Est vers l'Ouest. Pour le Tidikelt, le sens d'écoulement est Est-Ouest dans la partie occidentale, Nord-Sud dans la partie centre et Ouest-Est dans la partie orientale.

Par l'approche de la géostatistique et en utilisant le krigeage, nous avons pu ajuster la carte piézométrique de 2007 et la comparer avec la carte piézométrique 2016 élaborée avec la même approche. Par cette comparaison nous avons élaboré une nouvelle carte de rabattement qui montre la dégradation du niveau piézométrique entre ces deux dates (pendant 9 ans). Ainsi, trois classes de rabattement ont été déterminées : la première classe de forte influence de prélèvements sous forme de cônes de rabattement (entre 1 et 1.8 m) localisée dans les zones d'activités agricoles et d'AEP. La deuxième classe d'influence moyenne de prélèvement (0.27 à 1 m). La troisième classe d'influence négligeable ou nulle des prélèvements située en dehors des zones d'activités.

La comparaison des cartes de rabattement avec la localisation de l'ensemble des foggaras montre que toutes les foggaras de la zone sont situées sur la zone de la première classe de forte influence de prélèvements. L'étude de cas de la foggara de Bouda explique bien l'interférence entre les prélèvements par forage et l'eau captée dans les foggaras. En effet, le moindre rabattement dans le niveau de la nappe peut conduire à une régression importante dans le débit des foggaras. Afin d'améliorer l'état de connaissance sur cet interférence et aider à meilleur gestion de la ressource dans cette région, nous recommandons d'approfondir les recherches pour mieux quantifier

l'impact de différentes formes de prélèvement sur l'avenir des foggaras du Touat, Gourara et Tidikelt.

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] AGIRE. Journée d'information sur la foggara, 05 Avril 2015, Wilaya d'Adrar. Adrar : AGIRE, 2015.
- [2] ALAUX, Jean. Hérodote : Formes de pensée, figures du récit. Rennes : Presses universitaires de Rennes, 2013, 208p.
- [3] ALFRED GEORGES PAUL, Martin. Les oasis Sahariennes (Gourara - Touat - Tidikelt) Tome I : Les eaux. Alger : imprimerie algérienne, 1908. 442 p. Les oasis Sahariennes. ISBN 9780270364842
- [4] ANRH. Journée d'information sur la foggara, 05 Avril 2015, Wilaya d'Adrar. Adrar : AGIRE, 2015.
- [5] ANSARI, Taha. Système traditionnel d'exploitation des eaux souterraines foggaras (Inventaire des foggaras de la Wilaya d'Adrar). 13 décembre 2005, Ouargla (Algérie) : International Network of Basin Organizations, 2005.
- [6] BACHAR, Keira. L'intégration des dimensions environnementale et sociale dans les pratiques urbaines en Algérie : Enjeux et Perspectives. Thèse de doctorat : Aménagement de l'espace et urbanisme. Nantes : université Nantes Angers le Mans, 2013, 338 p.
- [7] BELLAL, Sid-Ahmed, HADEID, Mohamed, GHODBANI, Tarik, et al. Accès à l'eau souterraine et transformations de l'espace oasien: le cas d'Adrar (Sahara du Sud-ouest algérien). Cahiers de géographie du Québec[en ligne]. 2017, Vol. 60, n°169[consulté le 15 mai 2016]. P 29–56. Disponible sur : <https://id.erudit.org/iderudit/1038664ar>.
- [8] BISSON Jean. Le Gourara, étude de géographie humaine. Mémoire : géographie. Alger : Université d'Alger- Institut de Recherches Sahariennes, 1957, 221p.
- [9] BISSON Jean. Mythes et réalités d'un désert convoité le Sahara. Paris : Harmattan, 2003, 479 p. ISBN 978-2-7475-5008-6.
- [10] BOUTADARA, Youcef. Etude hydrogéologique des systèmes de captage traditionnels dans les Oasis Sahariennes : cas des Foggaras de la région du Touat (Adrar). Mémoire de Magistère : Hydraulique. Oran : Université des Sciences et de la Technologies d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2009. 116 p.
- [11] BOUTADARA, Youcef. REMINI, Boualem. BENMAMAR, Saida. Quand les foggaras d'Adrar se réveillent !. Larhyss Journal. 2020, n°41, pp. 149-180. ISSN 1112-3680
- [12] BOUTADARA, Youcef. REMINI, Boualem. BENMAMAR, Saida. The foggaras of Bouda (Algeria): from drought to flood [enligne]. In: Applied Water Science. [Consulté le 25 September 2018]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0822-7>
- [13] BURGEAP. Etude du Continental Intercalaire Saharien. Rapport scientifique. Alger Direction des Carburants, 1963.

- [14] CHAUCHE-BENCHERIF, Meriama. La micro-urbanisation et la ville-oasis; une alternative à l'équilibre des zones arides pour une ville saharienne durable cas du bas-Sahara. Thèse de doctorat : Urbanisme. Constantine : Université Mentouri, 2007, 439p.
- [15] CHEYLAN, Jean-Paul. Les oasis sahariennes à foggara: mutations sociales sous fortes contraintes écologiques. *Mappe Monde*. 1990, n°90/4, pp. 44-48.
- [16] CONRAD, Georges. L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien : Saoura, erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir. Paris : C.N.R.S, 1969, 527 p.
- [17] DENIS, Antoine. Travaux Pratiques sur les Systèmes d'Information Géographique. Initiation à ArcGIS [on ligne]. Arlon : Université de Liège, Belgique, 2012, 94 p.[consulté le 20/02/2019]. Disponible sur : <<http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/135775>>
- [18] DSA. Journée d'information sur la foggara, 05 Avril 2015, Wilaya d'Adrar. Adrar : AGIRE, 2015.
- [19] DUBIEF, Jean. Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Thèse doctorat : hydrologie. Alger, Institut de météorologie et de physique du globe d'Algérie, Université d'Alger, 1953, 458 p.
- [20] DUBOST, Daniel. Ecologie-Aménagement et développement agricole des oasis algériennes. Thèse de doctorat :Géographie. Tours : Université François Rabelais, 1991. 540 p.
- [21] GARDES, Thomas. Automatisation d'une méthode d'interpolation pour la modélisation de l'îlot de chaleur urbain sous QGIS. Mémoire de recherche : Géomatique. Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés et Territoires : Université de Toulouse, 2017. 105 p
- [22] GROVE, A.T. World Atlas of Desertification, 2nd edition. London: edited by N. J. Middleton and D. S. G. Thomas, Arnold, 1999, 280p. ISBN 0-340-69166-2.
- [23] IDDA, Salem. BONTE, Bruno. HAMIDI, Mansour, et al. Monument historique ou système bien vivant ? Les foggaras des oasis du Touat (Algérie) et leur réalimentation en eau par pompage. *Cahiers Agricultures*. [en ligne]. 2017, Vol. 26, n°5. [Consulté le 15/05/2018]. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1051/cagri/2017049>>
- [24] IDDA, Salem. La mutation de l'écosystème oasien au Gourara, causes et implications environnementales. Mémoire Magistère : Sciences de l'Environnement et Climatologie. Oran : Université d'Oran, 2011. 135 p.
- [25] IWRA. Un modèle de gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyperaride : Cas de l'oasis de Béni Abbès (Vallée de la Saoura, sud-ouest algérien), 1-4 septembre 2008, Palais des Congrès. Montpellier : IWRA, 2008.
- [26] JADE ORIANE, Petersen. Traçage isotopique (^{36}Cl , ^4He , ^{234}U) et modélisation hydrogéologique du Système Aquifère du Sahara Septentrional. Thèse de Doctorat :

Géosciences de l'environnement : Marseille. Université d'Aix-Marseille - France, 2014. 329 p.

[27] KABOUR, Abdesselem. MEKKAOUI, Abderrahmane. CHEBBAH, Lynda. Le barrage de Djorf Torba (Béchar, Sud-Ouest Algérien), sous contraintes du climat, de l'environnement et de gestion. *International Journal for Environment & Global Climate Change*. 2016, Vol 3, n°5, pp. 23-32. ISSN 2310-6743

[28] KOUZMINE, Yaël. Dynamiques et mutations territoriales du Sahara Algérien : vers de nouvelles approches fondées sur l'observation. Thèse de doctorat : Géographie. Besançon : Université de Franche-Comté, 2007. 426 p.

[29] LAGGOUN-DEFARGE, Fatima. Etude de la diagenèse organique des séries paléozoïques du bassin de Sbaa (Algérie). Approche géochimique et pétrologique. Thèse de doctorat : Géochimie et prospection des ressources minérales. Orléans : Université d'Orléans, 1987, 253p.

[30] LARBES, Ali. BOUCHAMA, Faiza. DEROUANE, Johan. Contrat de nappe d'Adrar : rapport état des lieux. Adrar: SPW/SWDE/SPGE/AGIRE, 2018, 127p.

[31] LEMARCHAND, Ophélie. JEANNÉE, Nicolas. Méthodes de cartographie et approche Géostatistique : La cartographie de la pollution au dioxyde d'Azote en Alsace. Cahier des thèmes transversaux ArScAn. 2007, vol. IX, pp. 203-214

[32] LLOYD, John Wills. A review of aridity and groundwater. *Hydrological processes*. 1986, Vol 1, n°1. pp. 63-78.

[33] M. Gast. Foggara. Encyclopédie berbère. 1998, n°19, pp. 2868-2880, ISSN 2262-7197

[34] MARGAT, Jean. Hydrologie et ressources en eau des zones arides. *Bulletin de la Société Géographique de France*. Décembre, 1985, n°7, pp.1009-1020.

[35] MATHERON G. Le Choix des Modelés en Géostatistique. [en ligne]. In : NATO Advanced Study Institutes Series (Series C - Mathematical and Physical Sciences) Springer. [consulté le 09 février 2019]. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/978-94-010-1470-0_2

[36] MEDDI, Mohamed. MEDDI, Hind. Etude des pluies annuelles et journalières dans le Sahara algérien. *Cahier sécheresse*. 1998, vol. 09, n°3, pp. 193-199.

[37] MEDDI, Mohamed. TOUMI, Samir. Study of the interannual rainfall variability in northern Algeria. *Le Journal de l'Eau de de l'Environnement*. 2013, vol. 12, n°23. pp 40-59.

[38] OSS, Système aquifère du Sahara septentrional : Gestion Commune d'un Bassin Transfrontière. *La houille blanche* [en ligne]. 2003, n°5, pp. 128-133. [Consulté le 09 mai 2012]. Disponible sur : <https://doi.org/10.1051/lhb/2003102>

- [39] OSS, Système aquifère du Sahara Septentrional : une conscience de bassin Hydrogéologie du SASS, volume I, Tunis : OSS, 2003. 148 p. ISBN 9973-856-03-1
- [40] OSS, Système aquifère du Sahara Septentrional : une conscience de bassin Hydrogéologie du SASS, volume II, Tunis : OSS, 2003. 322 p. ISBN 9973-856-00-7
- [41] OUALI, Salima. KHELLAF, Abdallah. BADDARI, Kamel. Etude des ressources géothermiques du sud Algérien. Revue des Energies Renouvelables [en ligne]. 2007. vol. 10, n°3, pp. 407-414 [Consulté le 15janvier 2018]. Disponible sur :http://www.webreview.dz/IMG/pdf/Etude_des_ressources_geothermiques_du_sud_algerien.pdf
- [42] OULD BABA SY, Mohamedou. Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional. Thèse de doctorat : Géologie. Tunis : Université de Tunis el Manar, 2005.271p.
- [43] PAPY, Louis. Le déclin des foggaras au Sahara, d'après des travaux récents. In: Cahiers d'outre-mer. Bordeaux : Presses Universitaires de Bordeaux, 1959, pp. 401-406.
- [44] PLIEZ, Olivier. Les cités du désert : des villes sahariennes aux saharatowns. Institut de recherche pour le développement. Toulouse : presses universitaires du Mirail, 2005, 171p. ISBN : 978-2-8107-0155-1
- [45] RAHAL, Bouziane Hafida. ABDELGUERFI, Aïssa. Evaluation Agronomique et Morphologique des Orges traditionnelles (*Hordeum vulgare* L.), cultivées dans les oasis de la région d'Adrar (Algérie). 2012, n°09/10/11, pp.38-51
- [46] RENE, Arrus. L'eau en Algérie: de l'impérialisme au développement, 1830-1962, Grenoble : Presses universitaires de Grenoble,1985. ISBN 978-2-7061-0260.8, 388 p.
- [47] REMINI, Boualem. ACHOUR, Bachir. Les Foggaras du Grand Erg Occidental Algerien. Larhyss Journal. 2008, n°07, pp. 21-37. ISSN 1112-3680
- [48] REMINI, Boualem. REZOUG, Cherif. ACHOUR, Bachir. TheFoggara of Kenadsa (Algeria). Larhyss Journal. 2014, n°18, pp. 93-105. ISSN 1112-3680
- [49] REMINI, Boualem. ALBERGEL, Jean. ACHOUR, Bachir. The Garden Foggara of Timimoun (Algeria) : The Decline of Hydraulic Heritage. Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2015, Vol. 12, n°18, pp. 51-57.
- [50] SAHRI Liela, NEZLI Imed Eddine, KECHICHED Rabah, BENHAMIDA Slimane. A Statistical Summary of ground water mineralization in the Aquifer of Intercalary continental (Algerian Septentrional Sahara) : International Conference on technologies and materials for renewable energy, environment and sustainability [enligne]. 2017, Vol.119, [consulté le 16 janvier 2018].P. 386-392Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.122>
- [51] SMAILI, Abdellah. Mécanismes de partage de l'eau de la foggara. Alger : la Bibliothèque National Algérienne, 2017, 206 p. ISBN 978-9931-643-11-1.

[52] ULLMAN William J. Evaporation rate from a salt pan: Estimates from chemical profiles in near-surface ground waters. *Journal of Hydrology* [en ligne]. 1985, Vol. 79, n°12, pp. 365-373 [consulté le 18 mars 2015]. Disponible sur : [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(85\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(85)90066-6)

[53] UNESCO. Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional : Rapport sur les résultats du Projet REG-100, Paris : UNESCO, 1972, 122p.

[54] UNESCO, Histoire générale de l'Afrique : L'Afrique du XIIe au XVIe siècle, Paris : UNESCO, 1987, 797p. ISBN 92-3201710-5.

[55] Wilaya d'Adrar. Adrar trésor du désert Oasis de la magie [en ligne]. [Consulté le 04 avril 2016]. Disponible sur : <http://docplayer.fr/1635793-Aaavcom-www-aaavcom-com-email-info-aaavcom-com.html>