



QUAND LES FOGGARAS D'ADRAR SE REVEILLEN !

WHEN THE FOGGARAS OF ADRAR WAKE UP!

BOUTADARA Y.¹, REMINI B.², BENMAMAR S.¹

¹Département d'Hydraulique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Alger 16000, Algérie,

²Département des Sciences de l'Eau et Environnement, Faculté de Technologie, Université Blida 1, Blida 9000, Algérie,

reminib@yahoo.fr

RESUME

Dans les zones de Touat, Gourara et Tidikelt, les anciens habitants ont exploité les contrebas du plateau de Tadmait qui offrent des conditions topographiques et hydrogéologiques permettant l'exploitation gravitaires des eaux souterraines sur des terrains plus bas et sans énergie ou moyens de pompage. Cela a assuré des ressources en eau permanentes qui a permis la présence humaine dans des conditions hostiles au cours des siècles. Cette technique de captage a montré son efficacité séculaire dans l'exploitation durable de la ressource en eau. Ces foggaras assurent encore l'irrigation de plus de 50 % des superficies irriguées dans la zone et contribuent à la stabilité de la société oasienne dans la zone. L'introduction depuis les années 80 des forages dotés de pompes puissantes et destinés aux différentes utilisations 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. Dans ce cadre, nous visons à travers ce papier d'éclairer la situation actuelle du système et offrir aux spécialistes du domaine ainsi qu'aux décideurs un outil permettant une meilleur gestion des ressources en eaux dans la zone. Cet article élaboré sur la base d'un ensemble important de données et des enquêtes du terrain sur les foggaras et les forages de la zone. Il est organisé sur l'actualisation du contexte

général de la zone d'étude et la nappe du CI. Pour 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 nous 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 5 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 sans étude préalable, sur les foggaras. À travers les résultats de cette étude et en se basant sur les cartes hydrogéologiques et piézométriques réalisées pour les années 2007 et 2016, nous avons pu réaliser la carte de rabattement entre ces deux dates qui montre une causalité explicite avec le phénomène de tarissement des foggaras. Avec le cas des foggaras de Bouda, nous rendons 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 : Foggara- Adrar-Oasis- Forage- Rabattement de la nappe.

ABSTARCT

In the areas of Touat, Gourara and Tidikelt, ancient inhabitants have exploited the lowlands of the Tademait plateau which offer topographic and hydrogeological conditions allowing the gravity exploitation of the groundwater on lower lands and without energy or pumping techniques. This ensured permanent water resources that allowed human presence in such hostile conditions over the centuries. This catchment technique has shown its secular effectiveness in the sustainable exploitation of the water resource. These foggaras still irrigate more than 50% of the irrigated area in the Touat, Gourara and Tidikelt and contribute to the stability of the oasis society. The introduction of boreholes with powerful pumps intended for different uses 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 scientific research aimed at preserving the foggaras of the study area, which still have an important economic and ecological resource to the oasis people. In this context, we aim through this research to shed light on the current situation of the system and to

offer the specialists of the field as well as the decision-makers a tool allowing a better water resources management in this area. This paper developed on the basis of a big set of data and field surveys on foggaras and boreholes in the area. It is organized as update the general context of the study area and the CI aquifer. In order to fully understand the foggara system and the problem of ground water resources exploitation in the catchment areas, we produce and analyze digital maps according to the problems encountered in the field. They are particularly related to hydrogeological and piezometric factors. In this context, we have drawn up a map of the water table drawdown. Finally, we show the case of the oases of Bouda which experienced, in 2017, a rise of the water table due to the abandonment, in 2016, of five (05) boreholes intended for the supply of drinking water and located in the catchment area of the foggaras. We show through this example the impact of boreholes, often installed without prior study, on foggaras. By using the results of this paper, based on the hydrogeological and piezometric maps made for the years of 2007 and 2016, we have been able to realize the drawdown map between these two dates. The map shows an explicit causality with the foggaras drying phenomenon. In the case of Bouda foggaras, we make explicit the interference between boreholes and foggaras and the sensitivity of the latter to the least drawdown in their catchment area. This shows the interest of reviewing the current aquifer management plan in the light of recent transformations in the area.

Keywords: Foggara- Adrar-Oasis- Drilling- Lowering of the water table

INTRODUCTION

Le système hydraulique millénaire connu sous le nom de Foggara (Iflli en Zénète) draine la partie superficielle de la nappe du continental intercalaire aux pieds occidentaux du plateau Tademaït où se succèdent ainsi les palmeraies du Gourara, du Touât et du Tidikelt, constituant une seule région saharienne dénommée par les anciens géographes l'Archipel Touâti (fig.1). Dans cette région, les anciens habitants ont exploité les contrebas du plateau de Tadmaït qui offrent des conditions topographiques et hydrogéologiques permettant l'exploitation gravitaires des eaux souterraines sur des terrains plus bas et sans énergie ou moyens de pompage. Cela a assuré des ressources en eau permanentes qui a permis la présence humaine dans des conditions hostiles au cours des siècles. Cette technique de captage a montré son efficacité séculaire dans l'exploitation durable de la ressource en eau. Actuellement ces foggaras assurent encore l'irrigation de plus de 50 % des superficies irriguées et contribuent à la stabilité de la société oasienne dans la zone d'étude.

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 et la qualité de la ressource hydrique unique d'une façon générale et apparu notamment d'une manière passive sur le système oasien traditionnel qui repose sur l'irrigation par foggara. Ce papier a pour objectif d'étudier la désorganisation de ce système ancestral à travers des approches hydrogéologiques quantitatives et l'élaboration d'une cartographie thématique en se basant sur des données issues de deux sources différentes, les enquêtes sur terrain et les inventaires des administrations. Cette recherche nous l'avons complété par l'étude du cas de l'oasis de Bouda située dans les extrêmes limites sud-ouest de la nappe du Continental Intercalaire. Ce papier traite l'impact de l'évolution du niveau de la nappe sur le fonctionnement des foggaras et apporte quelques réponses sur la diminution de la production en eau de ce système à travers des recherches et des investigations sur terrain que nous avons entrepris par des cartes thématiques couplées avec des analyses. Les problèmes constitués par la surexploitation de la ressource en eau souterraine sur un territoire précaire ont motivé notre intérêt à l'analyse du tarissement de ce système ancestral dans la région d'étude.

SITUATION ET CARACTERISTIQUES DE LA REGION D'ETUDE

Le contexte général de la zone d'étude en se basant sur la bibliographie existante, nous traçons les principaux contextes : (historique, socio-économique, géographique et administratif, géomorphologique et topographique et climatologique. Les contextes sont exposés en parallèle aux intérêts de notre recherche, et dans le but de permettre de maîtriser au mieux l'ensemble les spécificités générales marquantes de la zone d'étude. La zone d'étude représente un espace très étendu et fait partie du Sahara septentrional. Elle s'étend sur un chapelet d'oasis d'environ 70 100 km² de superficie, incarné par plus de 300 ksour et reposent sur un système oasien traditionnel très ancien. 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 désertiques rugueuses et des reconfigurations sociales profondes. Notre zone est caractérisée par cinq unités géomorphologies de base (regs, ergs, oueds, terrasses d'érosion et sebkhas) située entre 158 et 425 m d'altitudes (Fig. 1). En réponse à ces conditions et en profitant des conditions topographiques et hydrogéologiques, la population oasienne a su maître en place le système

gravitaire séculaire d'exploitation de la ressource en eau souterraine « la foggara ».

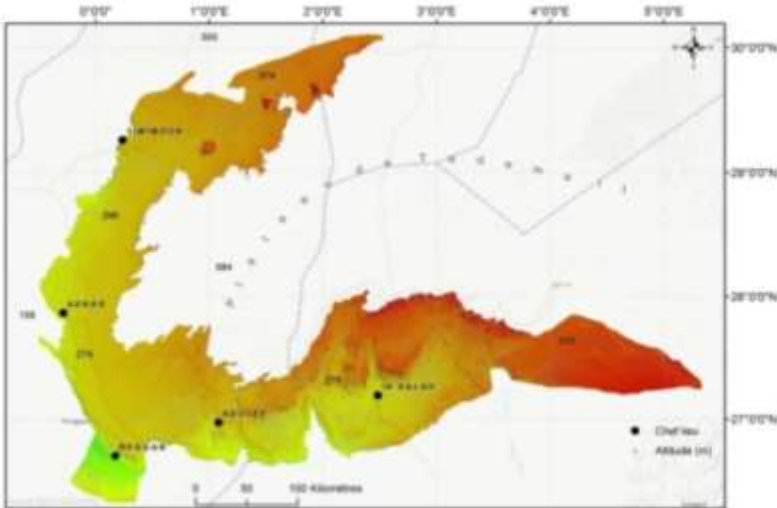


Figure 1 : Carte du relief de la zone d'étude

Pour le contexte hydrologique, où nous avons actualisé et élaboré des cartes montrant les différents bassins-versants et les réseaux hydrographiques qui ont des performances hydrologiques et une communication avec la nappe dans le territoire de la zone des foggaras (fig. 2 et 3). Dans notre zone d'étude, 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 (Dubief, 1953). Actuellement le Sahara porte les vestiges des réseaux hydrographique anciens qui témoignent sur les écoulements de surface énergiques au cours des périodes humides du Quaternaire. 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 (Ould Baba, 2005).

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 directe aux limites sud-ouest de la formation Continental intercalaire. Ce papier a fait l'objet d'une analyse de la zone d'étude du point de vue de ses caractéristiques géologiques, de sa formation stratigraphique, de ses formations et caractéristiques hydrogéologiques sur le territoire de foggara. Les analyses réalisées dans cette étude nous ont permis de conclure que la zone d'étude représente les limites sud-ouest du Continental intercalaire et s'étend sur une grande superficie. Cette zone 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 géologiques de la région sont : le Quaternaire, le Complexe terminal, le Turonien, le Cénomanién, le Continental Intercalaire, le Jurassique, le Trias et le Paléozoïque. Le Continental intercalaire affleure tout le long de l'Atlas Saharien, au Sud et à l'Ouest, et 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 grésos-argileuses du Crétacé inférieur (fig. 4). On trouve les quatre couches de haut en bas :

1. 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.
2. L'Aptien : est un bon repère géologique, généralement formé par un faciès calcarodolomitique appelé «barre aptienne» l'épaisseur de cet horizon est comprise entre 10 et 30 m.
3. Le Barrémien : est constitué par des grès grossier à gravier, d'argile et des sables admettant des passées d'argiles.
4. 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 »

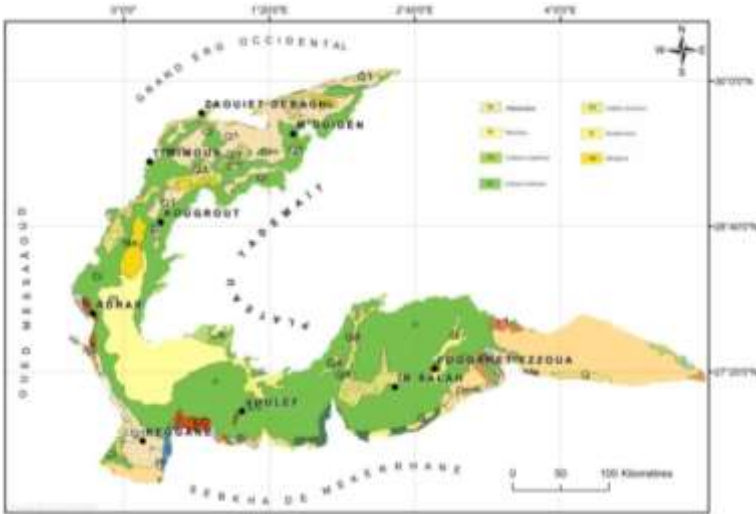


Figure 4 : Carte géologique de la zone d'étude

L'alimentation actuelle du Continental intercalaire s'effectue par infiltration à l'extrémité des oueds qui descendent des massifs montagneux (de l'Atlas saharien et du Dahar), des ruissellements en bordure de plateau (du Tademaït et du Tinrher) et pluies d'années exceptionnelles sur le grand erg occidental (fig. 5). Les galeries drainantes des foggaras constituent l'exutoire principal de l'écoulement du Continental intercalaire. 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 Tadmaït (Unesco, 1972).

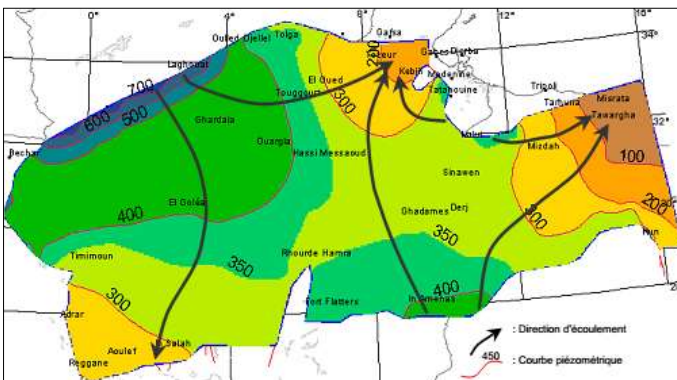


Figure 5 : Carte piézométrique de référence du Continental Intercalaire (OSS, 2003)

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 (Unesco, 1972).

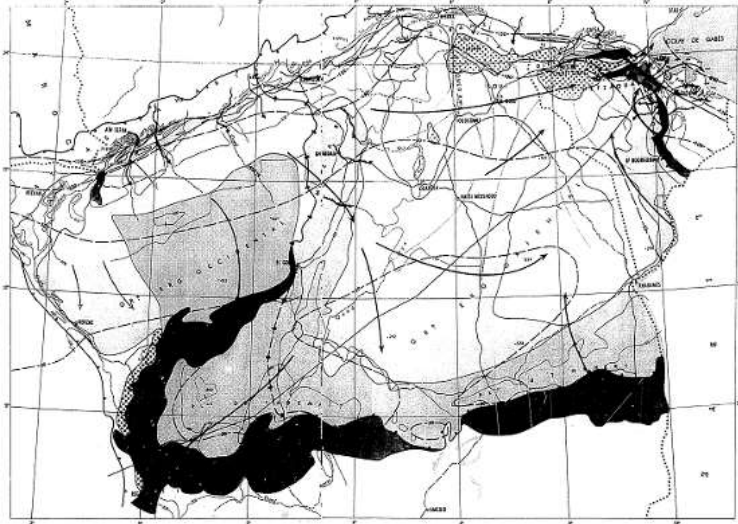


Figure 6 : Carte hydrogéologique du SASS (Unesco, 1972)

Les formations du Continental Intercalaire ont des épaisseurs qui atteignent en moyenne 325 mètre sous les séries Albiennes du Tadmaït et sont érodées sur ce plateau jusqu'à se terminer en biseau sur le paléozoïque affleurant dans les bordures par un chapelet de Sebkhias 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 sebkhias 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.

Nous avons actualisé et synthétisé les informations rassemblées sur les ressources en eau dans la zone d'étude sous forme des cartes thématique (fig.7). Cette étude 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 oasis du Gourara, du Touât et du Tidikelt (fig. 6). Ces connaissances concernent à la fois la géométrie de la nappe, la répartition spatiale des points d'eau et les paramètres hydrodynamiques.

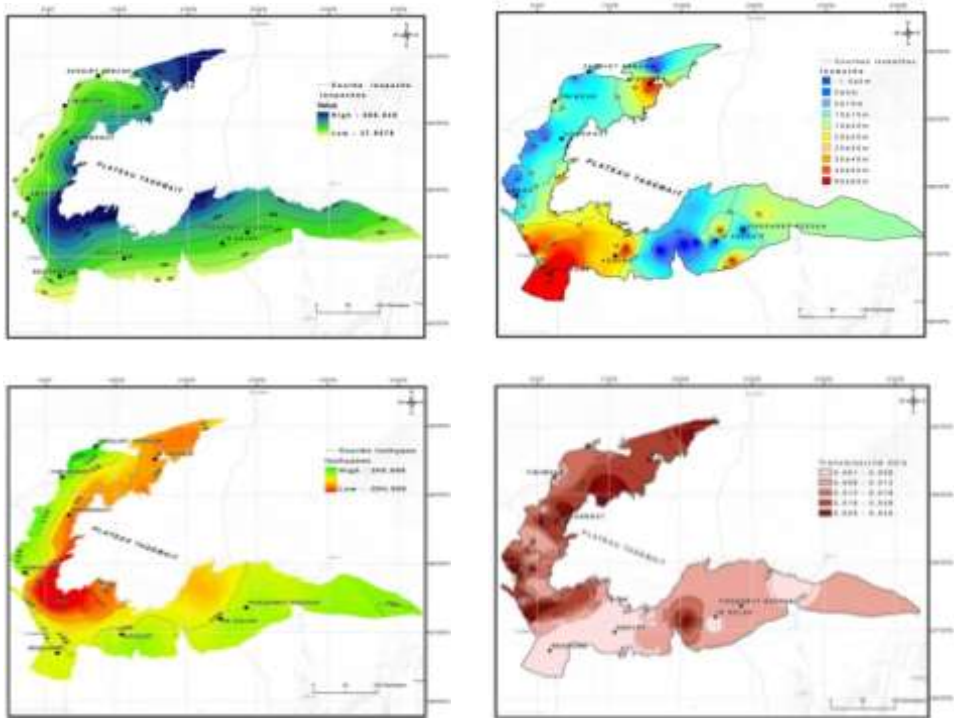


Figure 7 : Cartes thématique élaborées

La connaissance des quantités prélevées, de 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 notre recherche, l'information sur les volumes prélevés au cours de l'année 2014 est présentée pour chacun des grands usages agricoles, alimentation en eau potable et industriel. En 2014, sur un total de $13,83 \text{ m}^3/\text{s}$ de prélèvements des eaux

souterraine pour les différents usages, 1,78 m³/s étaient prélevés par les foggaras pour l'irrigation des anciennes oasis, 8,36 m³/s pour l'irrigation dans les périmètres de la mise en valeur, 3,26 m³/s destinés à l'AEP et 0,43 m³/s de ce volume est prélevé par les industries (Fig. 8 et 9).

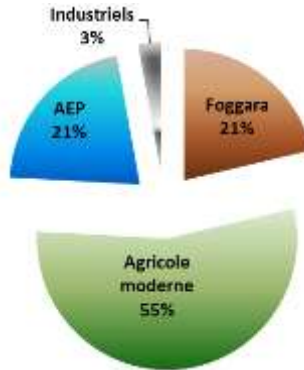


Figure 8 : Répartition des prélèvements en 2014

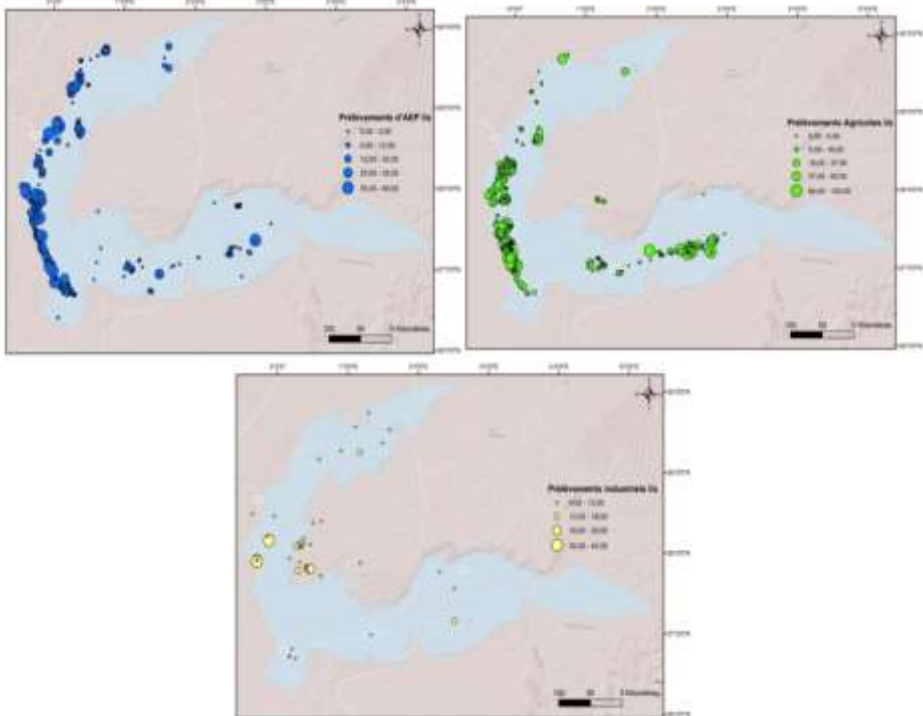


Figure 9 : Répartition spatiale des prélèvements

Vu certaines insuffisances enregistrées dans les inventaires relatives aux forages et également dans les données des foggaras, 6 185 ouvrages ont été visités sur terrain avec des experts locaux (Fig. 10). 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.



Figure 10 : Visités sur terrain avec des experts locaux

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Evolution de la piézométrie dans la zone d'étude

L'étude de l'évolution piézométrique dans la zone d'étude constitue la majeure partie du cinquième chapitre. Un traitement géostatistique de la piézométrie nous a permis d'établir la cartographie piézométrique et du rabattement. Dans ce chapitre nous avons comparé dans le temps des cartes piézométriques de deux dates différentes (2007-2016). Cela nous a permis d'observer les évolutions dynamiques de la nappe (haute eaux et basses eaux) ainsi que les impacts liés à la surexploitation de la ressource en eau souterraine sur une période de 9 ans. 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 Arc Gis comprend une suite d'applications intégrées. 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 géotraitement, la cartographie et la géostatistique. Dans notre cas, c'est la méthode de krigeage avec le modèle de semi-variogramme qui a été choisie pour réaliser les deux cartes piézométriques visées. Sur l'Arc GIS, 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. 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 11).

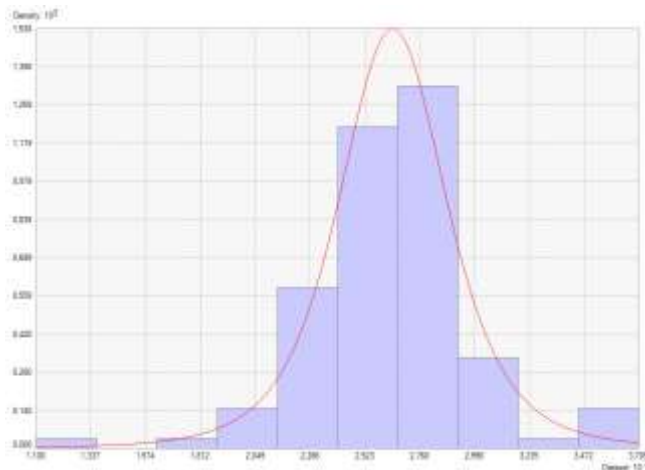


Figure 11 : Histogramme en fréquence des données piézométriques

Ensuite, nous avons tracé le Semi-variogrammes des variables des niveaux piézométriques 2007 et 2016 (Fig. 12 et 13). Ces Semi-variogrammes comparent les mesures en fonction de leur interdistance. 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.

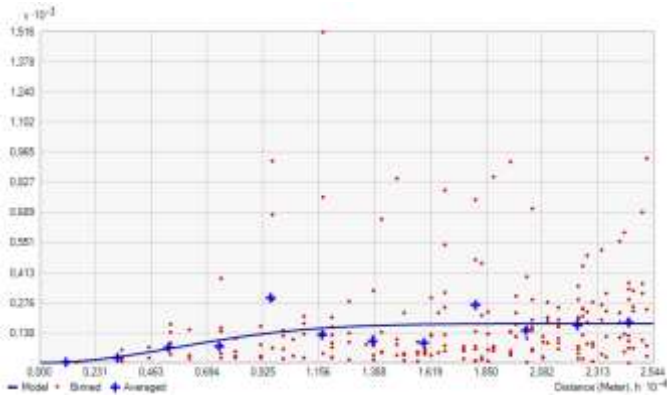


Figure 12 : Semi-variogramme expérimental 2007

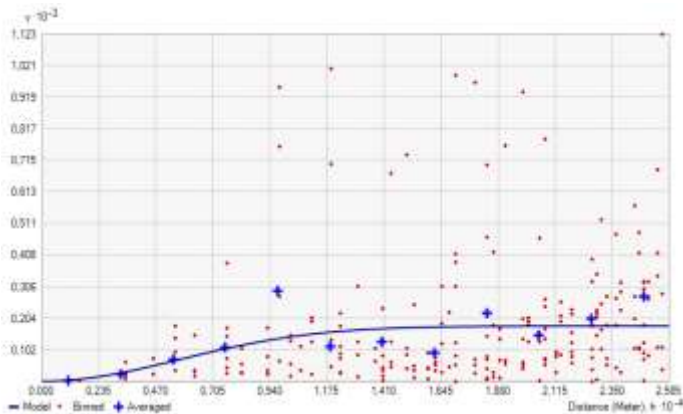


Figure 13 : Semi-variogramme expérimental 2016

Une étape de validation croisée est nécessaire pour estimer la fiabilité du modèle et vérifier qu'il est bien représentatif du jeu de données (Fig. 14). 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.

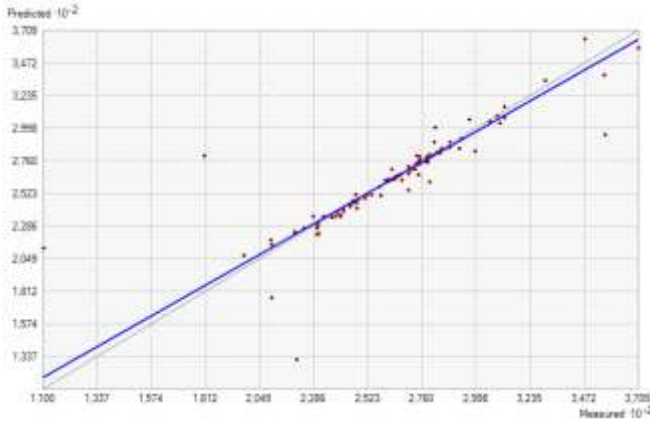


Figure 14 : Validation croisée des données piézométrique 2007 et 2016

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 (Fig.15) et (Fig.16).

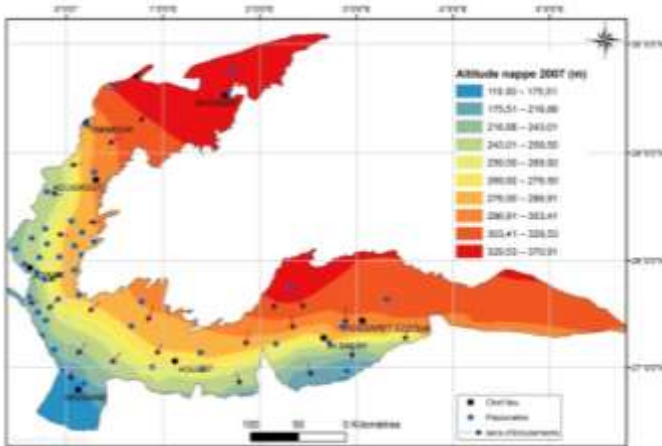


Figure 15 : Carte piézométrique 2007

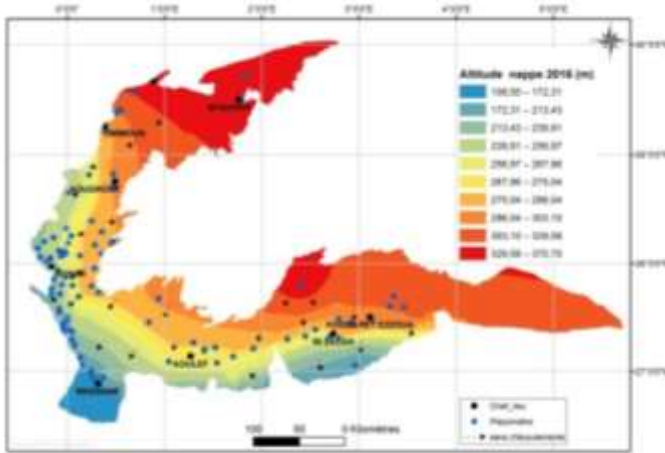


Figure 16 : Carte piézométrique 2016

La carte de rabattement élaborée dans Cet article a été dressée sur la base de la superposition de deux cartes piézométrique élaborées pour 2007 et 2016 (Fig.17).

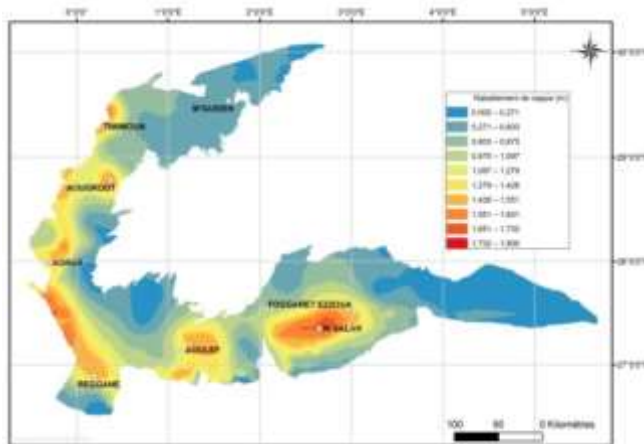


Figure 17 : Carte du rabattement entre 2007-2016

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 : les villes de Timimoun et Aougrou, le groupement des ksours entre Metarfa jusqu'à

Reggane et les zones d'Aoulef et In Salah. De manière générale, nous avons clairement constaté les baisses significatives du niveau pouvant 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.

Influence de l'évolution des niveaux de la nappe sur les foggaras – Cas des oasis des Bouda

L'étude de cas des oasis de Bouda a permis de mieux comprendre l'influence des forages sur la nappe et l'assèchement des foggaras. Dans la commune de Bouda 116 foggaras ont été creusé durant plus de 10 siècles. Aujourd'hui, uniquement 19 foggaras sont encore en service. Ces foggaras n'ont pas échappé à ce problème, puisque cinq forages destinés à l'alimentation en eau potable de la commune de Bouda ont été réalisé durant la période : 1987-1994, avec un débit total de refoulement égal à 160 l/s, et une profondeur dynamique qui atteint jusqu'à 35 m (Forage El Mansour). Ces 19 foggaras soutiraient de la nappe du Continental intercalaire un débit de 86 l/s en 1998, soit environ 50% du total pompé par les 5 forages. Ce débit des foggaras a été revu à la baisse en 2011, il a descendu à 70 l/s. À titre d'exemple, la distance entre le forage Ben Draaou I et la partie drainante de la galerie de la foggara Chiekh Ben Oumar et la foggara Ouled Gaenm ne dépasse pas la valeur de 400 m ce qui engendre un rabattement de la nappe et par conséquent une diminution du débit de la foggara (Fig.18).



Figure 18 : Situation de forage d'AEP par rapport aux foggaras

En 2015, pour des raisons de qualité d'eau fournie par les forages (problème de salinité), les services des ressources en eau (DRE) ont procédé à l'arrêt de ces forages exploitant le champ de captage de Bouda et les remplacer par deux forages installés dans le champ d'oued Ghazal à 25 km à l'Ouest de la commune de Bouda (Fig.19).

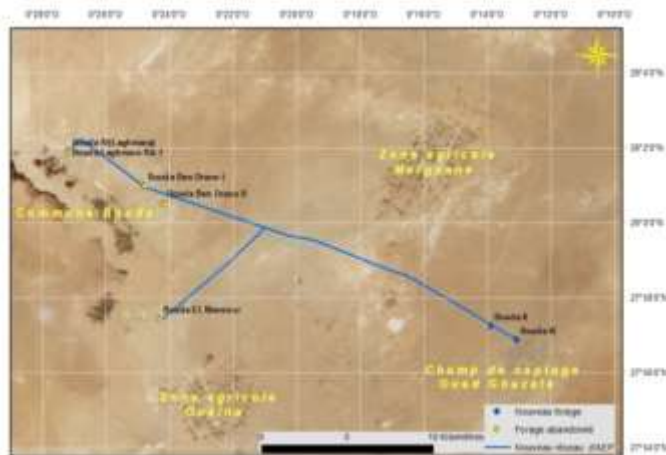


Figure 19 : Carte de situation des forages et transfert d'eau à la commune Bouda

Cependant, personne ne croyait qu'à partir de ce transfert, l'eau des foggaras se tournera contre l'oasis. Effectivement, les foggaras après une soif qui a duré plus de 20 ans, se trouvent aujourd'hui égorgées d'eau et continuent à refouler des volumes énormes d'eau sur tous les accès qui mènent à l'oasis. Tout a été inondé ; l'écoulement ne s'arrêtait jamais et les foggaras n'arrivent plus à contrôler son eau. Des inondations dans la palmeraie, remplissage dans la sebkha et des éboulements dans les galeries ont été enregistrés. Face à ce drame écologique qui n'est autre que la conséquence d'une action anthropique dont nous avons signalé à maintes reprises qu'un milieu sec est un écosystème très fragile qui n'aime pas trop d'eau (Remini, 2017). Logiquement ce déséquilibre de quantités d'eau ne peut provenir de l'arrêt des forages, puisque on est revenu à l'état initial, soit avant 1987; date de la mise en service du premier forage Bouda Bendraou 1. Les foggaras ont repris tout simplement leurs débits initiaux, soit environ 140 l/s. Malheureusement, ce n'est pas le cas, puisque les foggaras n'arrivaient plus à drainer des quantités aussi importantes : l'eau coule de plus en plus fort. Face à ce désastre environnemental, les oasiens n'ont qu'une seule solution urgente : arrêter l'écoulement avant d'atteindre la palmeraie. Les agriculteurs ont effectués des ouvertures au niveau de plusieurs

seguias pour permettre à l'eau de se déverser hors réseau de distribution de la foggara. L'opération ne fait que retarder le problème (Fig. 20).



Figure 20 : Événement dû à l'arrêt des forages et l'inondation des foggaras

Des enquêtes ont été menées auprès des agriculteurs et de la population locale pour avoir des informations sur le rabattement de la nappe avant 2016 et la remontée après cette année. Un suivi rigoureux de l'évolution des débits des foggaras de Bouda basé sur des jaugeages (Fig. 21).



Figure 21 : Jaugeage de débit des foggaras à Bouda Février 2018

L'arrêt des cinq forages situés au niveau du Bouda a provoqué un déséquilibre de l'écoulement dans l'ensemble des foggaras. Plus de 50 % des foggaras ont vu leurs débits augmentés et dépassant largement ceux de 2011. A titre d'exemple, les débits des foggaras 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 (début 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 en 2018 (Tableau 1). 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. En réponse à cette situation, les services publics ont lancé un projet de réhabilitation de 4 foggaras. Il s'agit des foggaras de Taier, El Hadjadj, Adouche Djedid et Mohamed Abdellah (Boutadara et al, 2018).

Tableau 1 : Comparaison des jaugés des débite entre 2011 et 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 | Ksiebat | Hadj Amar Kebir | Pérenne | 10 | 16,1 | ↑ 6,1 | |
| 10 | Bouda | Ksiebat | Ahmed Seghir (el bour) | Pérenne | 1,3 | 1,1 | ↓ -0,2 | Ensablée |
| 11 | Bouda | Zet Sidi Hida | Terbzou | Pérenne | 0,4 | 0,4 | → 0 | |
| 12 | Bouda | Zet Cheikh Ben Omer | Adouche Djedid | Pérenne | 3,5 | - | → 0 | En réhabilitation |
| 13 | Bouda | Zet Cheikh Ben Omer | Ait Amrane Abdouline | Pérenne | 4,2 | 1,4 | ↓ -2,8 | Ensablée |
| 14 | Bouda | Zet Cheikh Ben Omer | 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 | Omariene | Bouزيد | Pérenne | 8,5 | 8,5 | → 0 | |
| 19 | Bouda | Omariene | Boukhzer | Pérenne | 0 | 2,6 | ↑ 2,6 | |

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 la campagne de mesure réalisée en 2007 ont été complétées par nos mesures en 2016 et 2018 (Tableau 2).

Tableau 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 | 7,7 | 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 | 8,2 | 7,85 | -1,18 | 0,35 |
| 4 | Bouda Laghmara Bis I | 6,68 | 7,7 | 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 | 0,1 |

Les cartes ci-dessous illustrent les mesures périodiques des profondeurs de la nappe effectuées durant les années 2007, 2016 et 2018 (Fig.22).

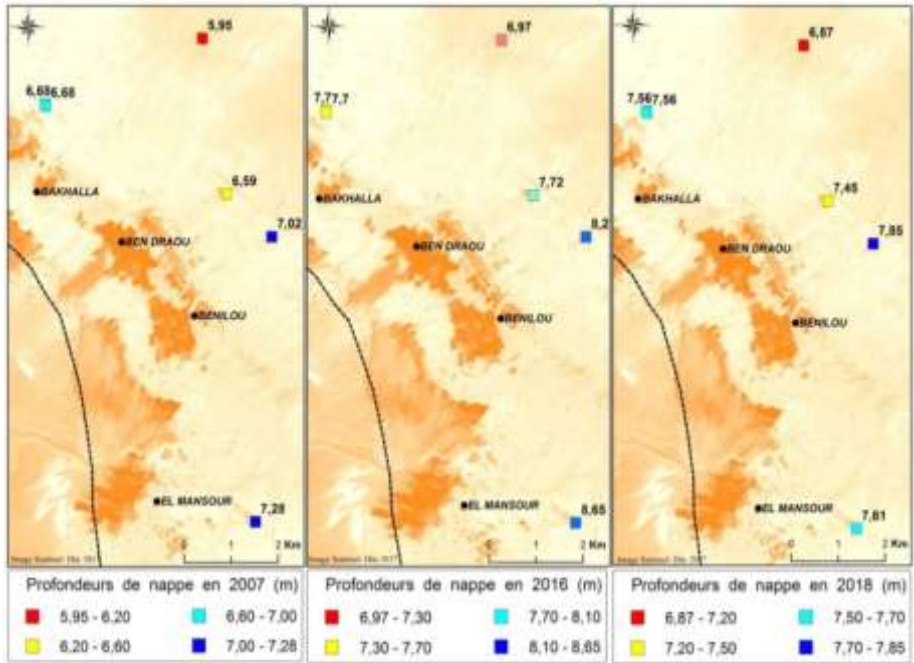


Figure 22 : Carte des profondeurs de nappe

La carte (Fig. 25) 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 (Fig. 23).

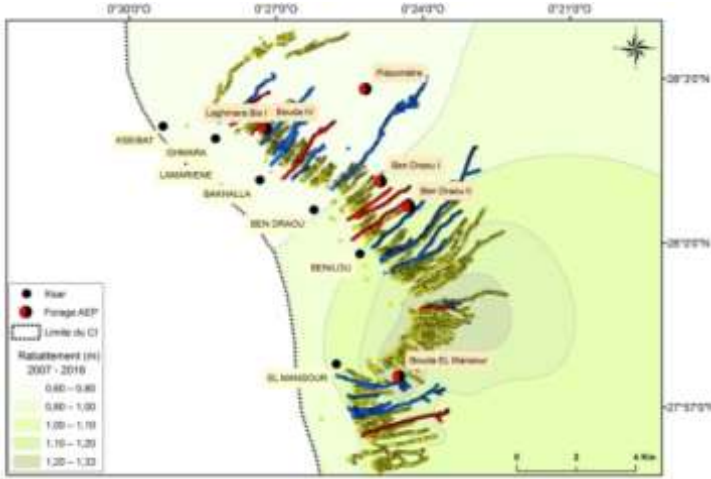


Figure 23 : Carte du rabattement 2007-2016

Nous distinguons clairement :

1. 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.
2. 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

Dans le cas d'étude des oasis de Bouda, les différentes campagnes de mesure que nous avons réalisé ont permis un suivi précis du phénomène de remonté de la nappe issu de l'arrêt de pompage dans les cinq forages destinés à l'AEP. 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 très probablement 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 (Fig.24 et 25).

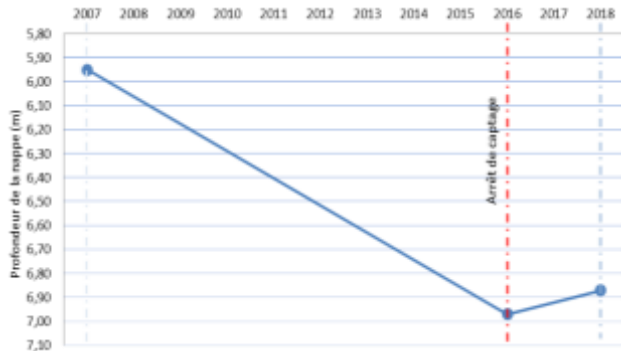


Figure 24 : Observation de la nappe au piézomètre PZ1

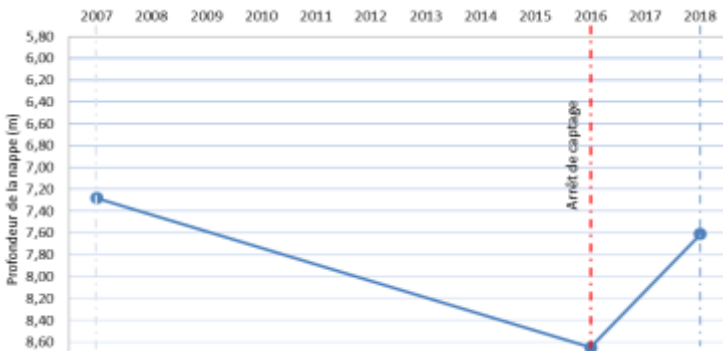


Figure 25 : Observation de la nappe au piézomètre PZ2

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.

La foggara Hadj Amar Lekbir (Boutadara et al, 2019)

La foggara Hadj Amar Lekbir se caractérise par un débit permanent passé de 10l/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 mètres. Le tableau 3 illustre les différentes valeurs de profondeurs de nappe dans la foggara extraites à partir des

cartes piézométriques 2007 et 2016 élaborées précédemment et les mesures de la campagne 2018.

Tableau 3 : Caractéristiques de la foggara Hadj Amar Lekbir

| 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 | 0,00 | 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 | Galerie drainante 2561,92 m | Galerie adductrice 3613,64 m | Galerie adductrice 3567,76 m |
| 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 | Galerie drainante 624,40 m | Galerie drainante 670,28 m | |
| 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 | | | |

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 2.547,42 m qui pénètre dans la nappe ;

En 2016 : une diminution significative dans la partie drainante jusqu'à 624,43 m de longueur ;

En 2018 : la récupération dans la longueur de la partie de production est d'environ 657,14 m.

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 kasia principale sur une altitude de 230,69 m. Le tableau 4 illustre les caractéristiques de la foggara Aït Amrane en 2007, 2016 et 2018.

Tableau 4 : 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 |
| Kasia | 0,00 | 0,19 | 14,68 | 15,81 | 15,54 | 1,13 | 0,27 | ▼-14,49 | ▼-15,62 | ▼-15,35 | Galerie drainante : 906,59 m | Galerie drainante : 169,29 m | Galerie tarie : 143,92 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 | | | |

Nous constatons ce qui suit :

En 2007 : la foggara Aït Amrane pénétrait dans la nappe sur une longueur productive de 906,59 m ;

En 2016 : la foggara Aït Amrane a perdu 459,23 m de la longueur de sa galerie productive ;

En 2018 : la foggara a récupéré 364,31 m de production en eau sur la partie drainante, ceci est dû à la remontée de la nappe après 2016.

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 constater la présence de l'eau dans l'amont de la foggara et que son tarissement déclaré par l'ANRH est dû à manque d'entretien. Cette foggara est formée par une série de 209 puits d'aération reliés entre eux par une galerie de 1 995,42 m 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 5.

Tableau 5 : 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 | | | |
| 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 | | | |
| 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 5, 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 1 576,67 m. Cela correspond à une lame d'eau moyenne d'ordre 0,95 m ;

En 2016 : en raison du rabattement significatif, Abnkour a perdu en amont une grande partie de sa galerie productive de l'ordre de 1 324,63 m ;

En 2018 : après la remontée, une longueur de 253,13 m de la galerie drainante a été récupérée avec une lame d'eau moyenne égale 0,56 m.

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

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 Continental Intercalaire (CI), nous avons besoin d'améliorer les connaissances sur les ressources en eau dans la zone du Touat, Gourara et Tidikelt. 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. La zone étudiée s'étend sur une superficie de 70 100 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 Melhrir. 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 de 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.

La 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 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.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BELLAL S.A., HADEID M., GHODBANI T., DARI O. (2016). 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, Vol. 60, N°169, pp. 29–56.
- BURGEAP & DIRECTION DES CARBURANTS (1963). Etude du Continental Intercalaire Saharien. Rapport scientifique, ANRH, Algérie.
- BOUTADARA Y. (2009). Etude hydrogéologique des systèmes de captage traditionnels dans les Oasis Sahariennes « cas des Foggaras de la région du Touat (Adrar) » : cadre géomorphologique. Mémoire de Magister en Hydraulique, Université des Sciences et de la Technologies d'Oran, 116 p.
- BOUTADARA Y., REMINI B., BENMAMAR S. (2018). The foggaras of Bouda (Algeria): from drought to food, Applied Water Science. doi.org/10.1007/s13201-018-0822-7.
- BOUTADARA Y., REMINI B. (2019). When the foggara of Hadj Amar Lekbir floods the Kessiba oasis (Adrar, Algeria). Larhyss Journal, N°38, pp. 103-116.
- CONRAD, GEORGES (1969). L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien (Saoura, erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir). Paris : C.N.R.S, 527 p.
- DUBIEF J. (1953). Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Thèse doctorat en hydrologie, Institut de météorologie et de physique du globe d'Algérie, Université d'Alger, 458 p.
- DUBOST, D. (1991). Ecologie : Aménagement et développement agricole des oasis algériennes. Thèse de Doctorat en Géographie, Université François Rebellais, Tours, France, 423 p.
- GROVE, A.T. 1999. World atlas of desertification, 2nd edition, edited by N. J. Middleton and D. S. G. Thomas, Arnold, London. Earth Surf. Process, March, Vol. 24, N° 3, pp. 280-280.

- PETERSEN J.O. (2014). Traçage isotopique (^{36}Cl , ^4He , ^{234}U) et modélisation hydrogéologique du Système Aquifère du Sahara Septentrional. Thèse de Doctorat : en Géosciences de l'environnement, Université d'Aix-Marseille, 329 p.
- KABOUR A., MEKKAOUI A., CHEBBAH L. (2016). 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*, Juin, Vol 3, N° 5, pp. 23-32.
- LOYD J.W., (1986). A review of aridity and groundwater. *Hydrological processes*. Vol. 1, N°1. pp. 63-78.
- MARTIN A. (1908). Les oasis Sahariennes (Gourara - Touat - Tidikelt) Tome I : Les eaux. Alger : Imprimerie algérienne, 442 p.
- MEDDI M., MEDDI H. (1998). Etude des pluies annuelles et journalières dans le Sahara algérien. *Cahier sécheresse*, Vol.9, N°3, pp. 193-199.
- MARGAT J. Hydrologie et ressources en eau des zones arides. *Bulletin de la Société Géographique de France*, Décembre, Vol.8, n°7, pp.1009-1020.
- MEDDI M., TOUMI S. (2013). Study of the interannual rainfall variability in northern Algeria, *Le Journal de l'Eau et de l'Environnement- Ecole Nationale supérieure d'Hydraulique*, N°23, pp. 40-59.
- OUALI S., KHELLAF A., BADDARI K. (2007). Etude des ressources géothermiques du sud algérien. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10, N°3, pp. 407 – 414.
- OULD BABA S.M. (2005). Recharge et paléo recharge du système aquifère du Sahara septentrional. Thèse de Doctorat en Géologie, Université de Tunis el Manar 271p.
- OSS. (2003). Système aquifère du Sahara septentrional : Gestion Commune d'un Bassin Transfrontière. *La houille blanche*, N°5, pp. 128-133.
- OSS, Système Aquifère du Sahara Septentrional : une conscience de bassin Hydrogéologie du SASS, Tunis : OSS, (2003). Hydrogéologie vol 1. 148 p
- OSS, Système Aquifère du Sahara Septentrional : une conscience de bassin Hydrogéologie du SASS, Tunis : OSS, 2003). Hydrogéologie Vol 2, 322 p.
- REMINI B., ACHOUR B., KECHAD R. (2014). The sharing of water in the oases of Timimoun heritage cultural declining. *Larhyss Journal*, N° 18, pp. 7-17.
- SAHRI L., NEZLI I.E., KECHICHED R., BENHAMIDA S. (2017). A Statistical Summary of ground water mineralization in the Aquifer of Intercalary Continental (Algerian Septentrional Sahara). *Energy Procedia*, Vol.119, pp. 386-392.
- SMAILI A. (2015). Mécanismes de partage de l'eau de la foggara : Journée d'information sur les foggaras, 05 avril, Adrar, Ministre des ressources en eau: AGIRE.

- SMITH O. B., KOALA S. (1999) : La désertification : Mythes et réalités. Assemblée générale annuelle de l'Association canadienne des rédacteurs scientifiques ; 27-29 mai.
- ULLMAN W.J. (1985) Evaporation rate from a salt pan: Estimates from chemical profiles in near-surface groundwaters, Vol. 79, n°12, pp. 365-373. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(85\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(85)90066-6).
- UNESCO (1972). Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional, Rapport sur les résultats du Projet REG-100, Paris : Unesco, 1972, 122p.
- WILAYA D'ADRAR (2013). Adrar trésor du désert Oasis de la magie. Wilaya d'Adrar : AAACOM, 2013. Disponible sur <<http://docplayer.fr/1635793-Aaavcom-www-aaavcom-com-email-info-aaavcom-com.html>>.