

Modèle hydrostratigraphique conceptuel et géométrie 2D de l'aquifère Tinejdad-Touroug (Anti-Atlas Oriental, Maroc)

Conceptual hydrostratigraphic model and 2D geometry of the Tinejdad-Touroug aquifer (Eastern Anti-Atlas, Morocco)

Hind BOUZNAKARI^{1*}, Mohamed SAADI¹

1. Mohammed V University in Rabat, Faculty of Sciences, Department of Earth Sciences, Geosciences, Water and Environment Laboratory, Morocco. *(bouznakari@gmail.com)

Résumé. La plaine de Tinejdad-Touroug renferme deux nappes d'âges quaternaire et infra-cénomanien. La nappe quaternaire a une profondeur maximale de 30m, elle est composée par les alluvions, calcaires et les conglomérats tandis que la nappe infra-cénomanien n'est relativement plus profonde et elle est constituée par les faciès rouges qui sont les argiles, les marnes, les grès et les sables. Ces deux aquifères sont en discordance sur le socle paléozoïque qui est composé par des faciès imperméables. Les coupes stratigraphiques des forages jouent un rôle nécessaire pour déterminer la nature des unités rocheuses sédimentaires et leur distribution spatiale dans la région d'étude. La cartographie hydrogéologique régionale a permis de visualiser la géométrie 2D de la nappe quaternaire qui se présente sous forme de nappe multicouches dont l'origine est essentiellement liée aux environnements de dépôt de nature continentale. En plus une précision sur le cadre hydrostratigraphique sera définie pour tracer le modèle conceptuel d'écoulement.

Mots clés: nappe quaternaire, nappe infra-cénomanien, coupes stratigraphiques, forages, aquifères confinés, Tinjdad, Anti-Atlas Oriental (Maroc).

Abstract. The Tinejdad-Touroug plain represents two main aquifers of Quaternary (phreatic aquifer) and Infra-Cenomanian age (confined aquifer). The Quaternary aquifer has a maximum depth of 30m, it is composed by alluvium, limestone and conglomerates while the Infra-Cenomanian nappe reaches a depth, it is constituted by the red facies which are clays, marls, sandstones and sands. These two aquifers are unconformably on the Paleozoic basement which is composed by impermeable facies. Stratigraphic sections of boreholes play a necessary role in determining the nature of sedimentary rock units and their spatial distribution in the study region. Regional hydrogeological mapping has enabled us to visualize the 2D geometry of the quaternary nappe, which takes the form of a multi-layered nappe whose origin is essentially linked to continental depositional environments. In addition, a more precise hydrostratigraphic framework will be defined for the conceptual flow model.

Keywords : quaternary aquifer, infra-cénomanian aquifer, stratigraphic sections, boreholes, confined aquifers, Tinjdad, Eastern Anti-Atlas (Morocco).

Abridged English version

The Tinejdad-Touroug region is located in the southeast of Morocco, it belongs to the hydrogeological basin of Gheris. It is part of the Eastern Anti-Atlas. The objective of this study is to specify the geometry of the aquifers and the function of the flow. The study of boreholes aims to develop stratigraphic knowledge of the study area with an appreciation of hydrogeological conditions. The work carried out in the basin has made it possible to acquire several hydrogeological information. The method applied is the stratigraphic correlation of multi-wells using a synthetic data model. The wells are correlated iteratively by considering their respective Stratigraphic Columns. The global Stratigraphic Column is used to generate a model and the geometry of the different units as well as their topological relationships with a numerical representation of the geological structure, representative of the stack of more or less permeable formations, of variable extensions, which constitute the aquifer system.

From a structural point of view, geometric modeling contributes to improving geological and hydrogeological knowledge, by clearly explaining the relative formations, making it possible to specify the existence or absence

of connections of formations between aquifer levels. Lithostratigraphy consists of associating sedimentary units according to the properties of the rock, correlating units with similar characteristics, to trace the contours of sedimentary objects.

The geological model can also be used to optimize future reconnaissance programs in areas where new data would allow the knowledge of underground flows. Finally, a method of stratigraphic correlation of well units is developed, making it possible to manage the ambiguities resulting from the sequential correlation of wells by constructing stratigraphic columns. The geometry of geological formations is concerned with using geological maps at different scales, digital terrain model, drilling sections, geophysical ground surveys, vertical sections and databases.

The geological modeling work involves collecting the data, organizing them in a geographical information system and importing them to build the contact surfaces between the successive formations. Indeed, the geometry of an aquifer system passes from the litho-stratigraphic series into an alternation of aquifer and aquitard groups, it can also subdivide a litho-stratigraphic unit into several model

layers when the formation presents a vertical heterogeneity. The hydrostratigraphic conceptual model makes it possible to describe schematically the aquifer system studied. It determines the horizontal and vertical extension, the succession of aquifers and aquitards, describes the lithology and hydrogeological characteristics, also the hydraulic conditions at the limits of the system and determines the recharge zones of the aquifer.

The hydrogeological study makes it possible to divide the study area into two aquifers, one of Quaternary and the other of the sub-Cenomanian. The aquifer, essentially of Quaternary age composed of 57 groundwater, 25 wells and 32 boreholes, it is composed of various units, the post Holocene as a higher age, formed by alluvium or clay sands, the Holocene consisting of limestone and the Pleistocene formed by conglomerates, this aquifer has a maximum depth of 30m, the boreholes which present this depth are 2052/56 and 2056/56, the boreholes 2730/56 and 2721/56 having a minimum depth of 1 m. For the infra-cenomanian aquifer consisting of 15 boreholes, formed of red facies which are clays, marls, sands

and sandstones, it has a maximum depth of 212 m presented by drilling 2010/56 and a minimum depth of 19 m presented by drilling 2426/56. These deposits are based on the Paleozoic impermeable consisting of hard sandstones, schists, rhyolites and granites. To understand the existence of permeable facies and the direction of underground flow depending on the geometry, we carried out different geological sections based on hydrogeological drilling data and the analysis of the sections shows plio-quaternary and infra-cenomanian units with a deepening of their hydrogeological substratum.

The elaboration of the hydrostratigraphic conceptual model consists of synthesizing information necessary for modeling which describes the detailed geological and hydrogeological context with the processes to be modeled in order to determine the underground flow of the aquifer, the horizontal and vertical extension of the model, boundary conditions of the model and recharge. The hydrogeological modeling is used to understand the functioning of a hydrogeological system. It aims at the exploitation of this system.

INTRODUCTION

La région Tinejdad-Touroug appartient au bassin versant topographique du Rhéris. Les deux types sont ceux du Quaternaire et de l'Infra-cénomanien, ces deux nappes sont renfermées fondamentalement dans des réservoirs aquifères, siliciclastiques d'origine fluviatile et alluviale à géométrie complexe marquée par une variabilité verticale et latérale des faciès sédimentaires. Dans ce type d'environnement, la planification et l'interprétation de données isolées et disparates nécessitent des études synthétiques impliquant de grands espaces (Vouvé 1996). Cette approche constitue l'objectif de notre étude. Ces deux aquifères peuvent se situer autant dans les formations rocheuses infra-cénomaniennes que dans les formations quaternaires. Il est donc essentiel d'avoir une bonne connaissance lithologique de ces deux grands ensembles. Les dépôts quaternaires constituent un élément majeur du cadre hydrogéologique, une visite des sites qui expose les grandes formations quaternaires régionales s'impose donc. Les coupes stratigraphiques sont utilisées pour déterminer la nature des unités rocheuses, définir leur géométrie et mieux comprendre la distribution spatiale des aquifères dans la région d'étude. La description de forages combinés à l'information provenant des cartes géologiques nous a permis d'obtenir une image des systèmes aquifères afin de présenter la distribution et les relations entre les unités aquifères situées dans la région. La compréhension de la géométrie de ces nappes sera, donc, très utile pour une modélisation future afin de répondre aux besoins de la population locale en eau.

ZONE D'ÉTUDE

Situation géographique

La zone d'étude Tinejdad-Touroug appelée aussi l'oasis de Ferkla, se situe au sud du Maroc (Fig. 1). Elle occupe une superficie totale de 2800 ha. De point de vue administratif, elle appartient à la région de Draâ-Tafilalet, Province d'Errachidia, cercle de Goulimima. Elle se divise en trois communes qui sont : municipalité de Tinejdad et les deux communes Ferkla El Oulia et Ferkla ESSOUFFLA. Ce secteur appartient au Bassin versant de Rhéris (sous bassin de Toudgha-Ferkla) qui est limité à l'est par le bassin de Ziz, à l'ouest par le bassin de Dadès, au nord par celui d'oued El Abbid et au sud par ses prolongements sahariens (Fig. 2). Le bassin du Rhéris

se caractérise par un climat aride, devenant franchement saharien vers le sud. Il s'étend largement dans le Haut-Atlas au nord, ce qui permet d'assurer, à ses affluents atlasiques, une alimentation en eau pérenne relativement abondante grâce à laquelle peuvent exister les oasis et les palmeraies de sud marocain. Elle se situe entre les lignes latitudinales 31°30' et 30°45' vers le nord, et la ligne longitudinale 5° et 5° 15' vers l'ouest. La région de Tinejdad-Touroug est limitée au sud par l'Anti-Atlas, à l'est par la plaine de Rhéris et Mellab à l'ouest et au nord par le Haut Atlas. De point de vue géomorphologique, cette oasis est formée par deux unités bien distinctes :

i) Les montagnes : Elles sont dominées par deux unités presque parallèles entre elles qui sont le Haut Atlas au nord [1300 à 2247 m] et l'Anti-Atlas au sud [1132 m]. Elles occupent environ 15% de la surface totale [environ 18450 ha]. ii) La plaine : C'est l'unité la plus importante. Elle occupe plus de 80% de la surface totale. Ce qui correspond environ à 98400 ha. Elle est caractérisée par une légère pente vers l'est. Le reste (5%) [6150 ha] est occupé par d'autres structures géomorphologiques qui sont des oueds et des dunes de sable (Kabiri 2004).

Cadre géologique

De point de vue géologique, la région de Tinejdad-Touroug appartient au domaine structural de l'Anti Atlas et de son prolongement saharien. Du nord au sud, on distingue le sillon préafricain (bassin crétacé d'Errachidia-Boudenib) puis la chaîne de l'Anti Atlas. Le Précamalien II et III constituent la couverture éruptive de l'Anti Atlas en général et de cette région en particulier. Il est formé essentiellement d'ignimbrites qui montrent par endroit des niveaux basiques (Saquaque *et al.* 1992). Cet ensemble peut être constitué parfois de formations volcano-détritiques (brèche, poudingue, grès, arkose et tufs) (Soulaimani *et al.* 2003, Ounaimi *et al.* 2020). Ces formations sont subtabulaires et reposent sur le socle qui est constitué de schistes, grauwackes, grès, pélites et parfois aussi des fragments de granodiorite (Kabiri 2004). Le Paléozoïque est dominé par des faciès marno-gréso-carbonatés légèrement plissés (Talih *et al.* 2022). La couverture sédimentaire concernant l'âge infra-cénomanien de l'aquifère, est sous forme de sables fins, des argiles sableuses et des grès rouges. L'aquifère de l'infra-cénomanien s'étend longitudinalement

entre Tinghir à l'ouest et Bouanane à l'est et latéralement entre les chaînes montagneuses du Haut Atlas au nord et l'Anti-Atlas au sud. L'épaisseur de l'infra-cénomanien augmente depuis les affleurements primaires situés au sud vers le nord et vers l'est du bassin. Elle se stabilise aux environs de 430 m à 530 m dans les secteurs où le bassin est le plus profond. Dans la région s'étendant entre Goulmima et Imider, l'épaisseur de l'infra-cénomanien peut atteindre 200 m à 300 m (Agence du Bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhéris). Les formations quaternaires qui reposent en discordance sur les terrains sous-jacents, précambriens, paléozoïques et secondaires, comportent les formations du Pléistocène et de l'Holocène (Kabiri 2004) : Le post Holocène est constitué par les limons, argile et galets, l'Holocène comporte les travertins et les limons, le Pléistocène se compose de conglomérats et l'encroûtement carbonaté.

Contexte hydrogéologique

La plaine de Tinejdad-Touroug fait partie du synclinal crétacé d'Errachidia-Boudenib (sillon pré-africain) qui abrite les aquifères quaternaire et infra-cénomanien. L'alimentation de la nappe s'effectue par l'abouchement latéral souterrain à partir des nappes jurassiques du Haut Atlas et de l'infiltration des eaux de pluies (El Ouali 1999). L'existence de ces deux aquifères est en étroite relation avec le flanc sud du Haut atlas central (Jurassique) au nord et le flanc nord de l'Anti Atlas oriental (Ougnat-Saghro) au sud (Margat 1958). Dans notre secteur d'étude, l'aquifère infra-cénomanien est renfermé dans des grès et des sables avec des intercalations parfois d'anhydrite. Cette nappe contribue à l'irrigation des palmeraies et des superficies des particuliers par le système des khettarats et des motopompes. La population de Tinejdad et de Goulmima (à l'est) est alimentée en eau potable à

partir des forages captant la nappe de l'infra-cénomanien. Cette alimentation en eau est gérée par l'Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable-Branche Electricité (ONEE). La nappe alluviale du Quaternaire, est très étendue le long de l'axe central de Ferkla (le long de l'oued Ferkla), les roches réservoirs sont surtout des sables et des conglomérats qui se déposent en discordance sur les schistes du Paléozoïque et parfois sur le Précambrien mais plus au Sud, son écoulement est très variable. Elle a une étendue très limitée car elle reste cantonnée aux lits majeurs des oueds. Son hydrodynamisme est très variable du fait de l'hétérogénéité des alluvions et elle est très vulnérable aux changements climatiques et aux actions anthropiques (Kabiri 2004, El Messaoudi *et al.* 2004).

MÉTHODOLOGIE

La méthode utilisée pour définir le cadre hydrostratigraphique de l'aquifère de Tinejdad-Touroug est basée sur la compilation des données suivantes :

- i) Les cartes topographiques au 1/100.000 qui indiquent l'élévation du terrain, la localisation et l'élévation des résurgences (puits et forages); ii) La carte géologique renfermant les formations quaternaires et infra-cénomanianes (carte géologique du Maroc de Todra Ma'der, 1/200000); iii) Les logs de forages (stratigraphie et niveau piézométrique) et iv) Les propriétés hydrauliques des matériaux.

Nous avons utilisé 72 fiches de forages et puits, où les données techniques relatives aux facies géologiques et hydrogéologiques sont disponibles. Les différents forages sont reportés sur une carte topographique (Fig. 8). Six coupes hydrogéologiques d'orientations NW-SE (coupes A et C), NE-SW (coupes B et D) et E-W (coupes E et F) ont été dressées (Fig. 8). La corrélation du facies sédimentaire à partir des

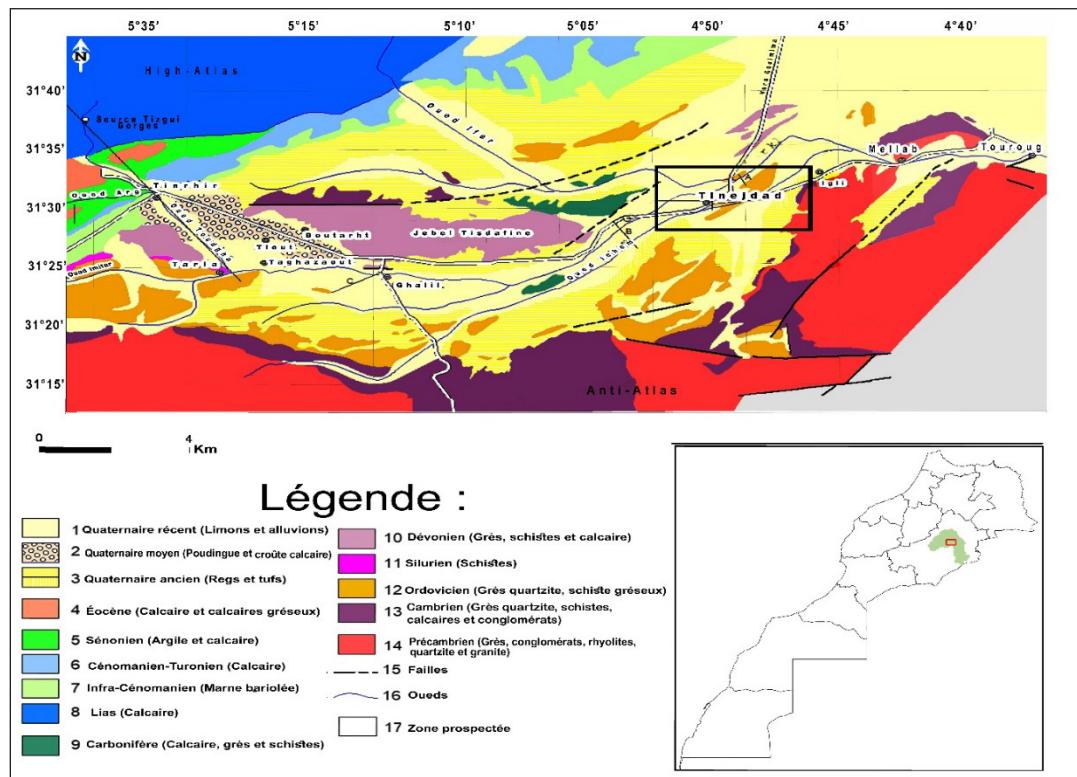


Figure 1. Carte géologique de la zone de Tinejdad-Touroug (d'après Margat J & Joly F 1954, Akrajay L & Jida 1981, Kabiri L 2005, modifiée).

Figure 1. Geological map of the Tinejdad-Touroug area (according to Margat J & Joly F 1954, Akrajay L & Jida 1981, Kabiri L 2005, modified).

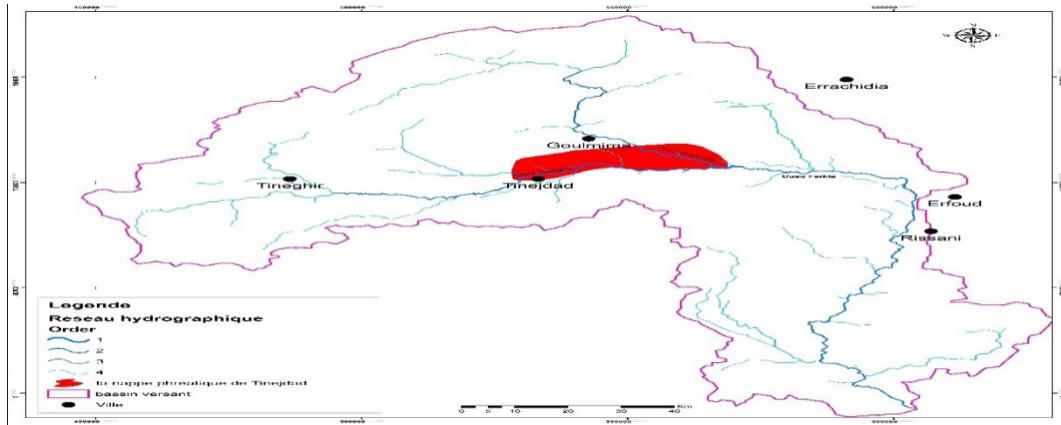


Figure 2 . Localisation du bassin versant de l'oued Rhéris
Figure 2. Location of the oued Rhéris watershed

forages a permis la réalisation de coupes hydrogéologiques à travers le bassin. Dans le but de trouver une logique dans la répartition des différents faciès, nous avons essayé d'attribuer un âge aux principales formations par corrélation de faciès, en se basant sur les travaux qui ont analysé le Quaternaire dans la région d'étude.

Et sous l'angle de construire le modèle conceptuel du cadre hydrostratigraphique de la région de Tinejdad- Touroug, nous avons procédé à : i) Comme première étape la localisation et l'élévation des forages dans les cartes topographiques; ii) Ensuite la somme des épaisseurs des unités géologiques dans une description égale à la profondeur totale du forage; iii) Puis la description lithostratigraphique des forages pour évaluer leurs propriétés physiques telles que la porosité et la perméabilité au niveau des deux principales aquifères d'âges quaternaire et infra-cénomanien et iv) Enfin la corrélation entre les puits sur des directions E-W et NW-SE afin de dégager la géométrie 2D des aquifères.

Les formations superficielles quaternaires recouvrent les formations sédimentaires infra-cénomanianes d'une manière discontinue, les deux aquifères présentent des épaisseurs variables avec des caractéristiques hydrogéologiques plus ou moins différentes. En fait, l'épaisseur totale des formations quaternaires est de l'ordre de 30 m, tandis que les formations infra-cénomanianes montrent une épaisseur totale de 212 m. En rappelant que l'aquifère quaternaire est constitué de trois unités sédimentaires : le post Holocène qui est formé des alluvions qui se nomment aussi les sables argileux, ainsi les graviers avec les galets et les argiles qui se considèrent généralement comme aquitard, la deuxième unité concernant l'âge holocène, elle est constituée de calcaires, enfin le Pléistocène qui est constitué de conglomérats. Pour l'aquifère infra-cénomanien, il contient généralement les faciès rouges qui sont les argiles, les marnes, les sables et les grès, ces deux aquifères sont en discordance sur le socle paléozoïque imperméable. La connaissance des variations de l'épaisseur des unités des aquifères et des aquitards est obligatoire pour tracer la géométrie et estimer le potentiel et le degré de confinement des aquifères.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Profondeur et écoulement des nappes

L'aquifère de Tinejdad-Touroug est un aquifère bicouche :

Nappe quaternaire: la nappe de Tinjdad-Touroug comprend 57 points d'eaux souterraines ; 25 puits et 32 forages présentant un aquifère d'âge quaternaire composé par des formations géologiques de type alluvions d'âge post holocène, des calcaires qui distinguent l'âge holocène et ensuite les conglomérats d'âge pléistocène, cette nappe a une profondeur maximale de 30 m, deux forages 2052/56 et 2056/56 qui présentent cette profondeur et avec une profondeur minimale qui arrive à 1m au niveau des forages 2730/56 et 2721/56 (Fig. 3). D'après les coupes lithologiques, nous avons pu corrélérer les unités d'âge quaternaire dans le but de caractériser les aquifères et compléter le modèle géométrique.

Nappe infra-Cénomanianne: 15 points d'eaux souterraines ont été utilisés qui sont tous des forages (Fig. 4), elle se distingue généralement par les faciès rouges tels que les argiles, les marnes, les sables et les grès. Elle est surmontée par la nappe quaternaire et elle est discordante sur le socle paléozoïque constitué par des faciès imperméables tels que les grès durs, les schistes et parfois les rhyolites et les granites. Selon les informations de logs stratigraphiques des points d'eaux souterrains, on a pu déterminer la profondeur d'eau maximale de cette nappe qui atteint 212 m vers le NW du secteur d'étude au niveau du forage 2010/56 avec une profondeur minimale de 19 m du forage 2426/56 (Fig. 4).

La cartographie géologique et la stratigraphie des formations rocheuses quaternaires et infra-cénomanianes mènent à définir le cadre hydrostratigraphique de la région de Tinejdad-Touroug. Il s'agit aussi de l'identification des propriétés hydrauliques de ces deux formations concernant l'écoulement souterrain, ce qui complète par la suite ce cadre, la détermination des conditions et directions générales de l'écoulement du SW vers le NE (Fig. 5), puis, la délimitation des zones de recharge et de décharge. Les unités sédimentaires de la zone d'étude ont des propriétés différentes surtout au niveau de la granulométrie, les faciès

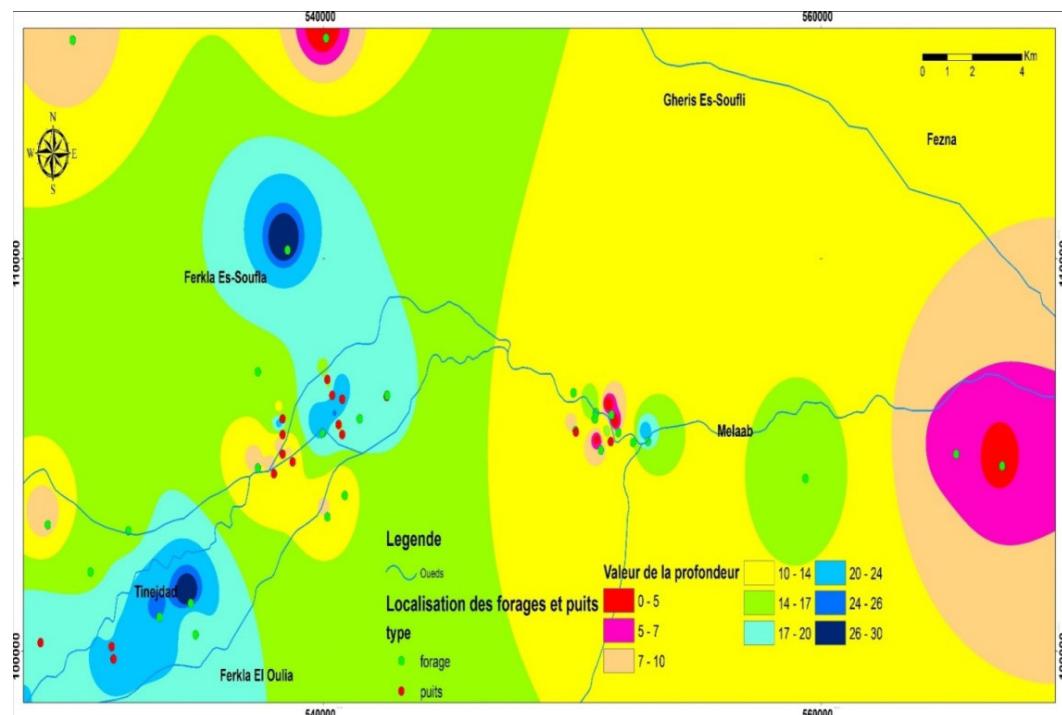


Figure 3. Carte de la profondeur de la nappe quaternaire dans la région de Tinejdad-Touroug
 Figure 3. Map of the depth of the Quaternary water table in the Tinejdad-Touroug region

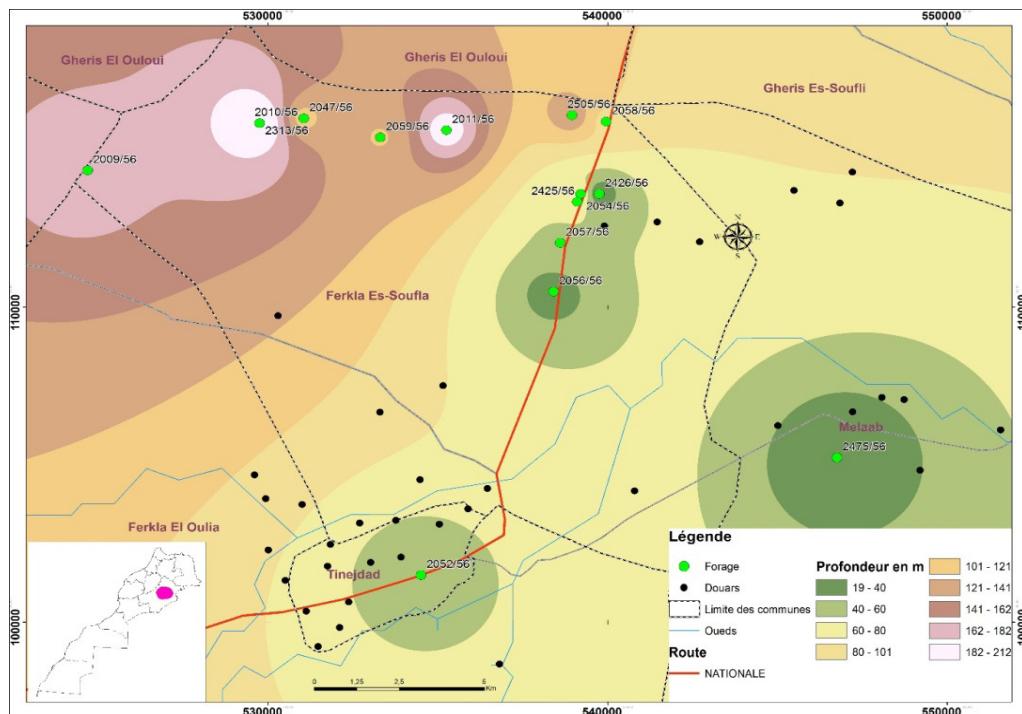


Figure 4. Carte de la profondeur de la nappe infra-cénomanienne de Tinejdad-Touroug
 Figure 4. Map of the depth of the Tinejdad-Touroug infra-Cenomanian water table

consolidés sont les calcaires, les grès et les conglomérats, les faciès non consolidés sont les sables, les argiles, les graviers et les galets. Généralement, ces deux types de faciès sont considérés comme de bons aquifères sauf les argiles qui sont des horizons imperméables. La relation entre la géologie et la caractérisation hydrogéologique représente l'aspect central pour la représentation régionale des aquifères en roches sédimentaires.

Évolution piézométrique

Plusieurs régimes piézométriques s'observent sur quelques points de mesure répartis sur la zone d'étude et suivis entre 2019 et 2022. Le niveau piézométrique de la nappe de Tinejdad-Touroug témoigne des périodes de sécheresse dans le mois juillet à octobre 2019 et de mars à juin 2020 et/ou un excès de pompage par les habitants qui s'opèrent, surtout, dans la nappe alluviale. Le niveau de la nappe dans les années 2019 et 2020 était maximum pendant l'hiver et minimum pendant l'été, le niveau commence à monter après la période du juin 2020, ce qui indique une quantité d'eau importante arrivée jusqu'à la nappe et conservée suite à une absence d'infiltration locale (Figs. 6 et 7).

Géométrie des nappes

Aquifère quaternaire

Pour mieux comprendre la géométrie spatio-temporelle de l'aquifère quaternaire, nous avons réalisé six coupes hydrogéologiques d'orientation générale Est-Ouest, NW-SE et NE-SW (Fig. 8) :

D'après l'analyse et la corrélation entre les différentes coupes lithologiques des forages sur le Quaternaire (localisation : voir Fig. 9) nous déduisons en premier lieu que les faciès dominants (galets, graviers, conglomérats, sables et calcaires) sont des dépôts fluvio-lacustres perméables responsables de l'existence de la nappe quaternaire. Cependant l'existence des niveaux marneux et argileux de la plaine d'inondation fluviale et de l'environnement lacustre sont responsables de la subdivision de la nappe en plusieurs couches. L'aspect lenticulaire des niveaux perméables (migration latérale des chenaux) réduit en plus la puissance et la continuité latérale de la nappe quaternaire (Fig. 9), cette paléogéographie continentale complexe offre une nappe quaternaire de types multicouche à étendue latérale limitée et discontinue.

Nappe infra-cénomanienne

Pour établir la corrélation lithostratigraphique de la nappe infra-cénomanienne, nous avons réalisé deux sections hydrogéologiques à travers le secteur d'étude, la première Est-Ouest et la seconde Nord-Sud (Fig. 10 et 11).

Cette corrélation montre que la nappe infra-cénomanienne se localise au niveau des sables et des grès dont l'épaisseur peut dépasser les 20m au niveau du forage 2009/56 (Fig. 12). Nous pouvons déduire que l'épaisseur de la nappe augmente du Sud vers le Nord, variation qui est rattachée à la structuration du bassin comme avant pays de la chaîne du Haut Atlas générée durant le serrage alpin à partir du Crétacé supérieur. (Chamayou *et al.* 1977, Adardor *et al.* 2021, Bouzekraoui *et al.* 2023 a et b). Ainsi que le sens de l'écoulement déduit à partir de la carte piézométrique est de l'ouest vers l'est (Fig. 13).

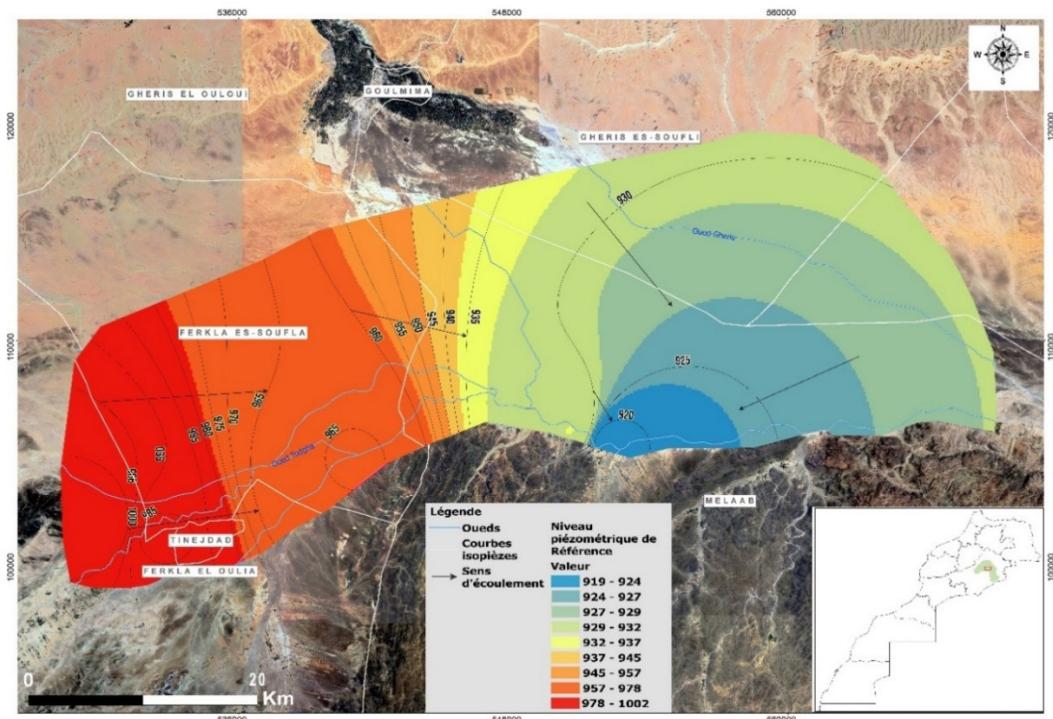


Figure 5. Carte piézométrique de la plaine de Tinejdad-Touroug par ABH (Février, 1994)
Figure 5. Piezometric map of the Tinejdad-Touroug plain by HBA (February, 1994)

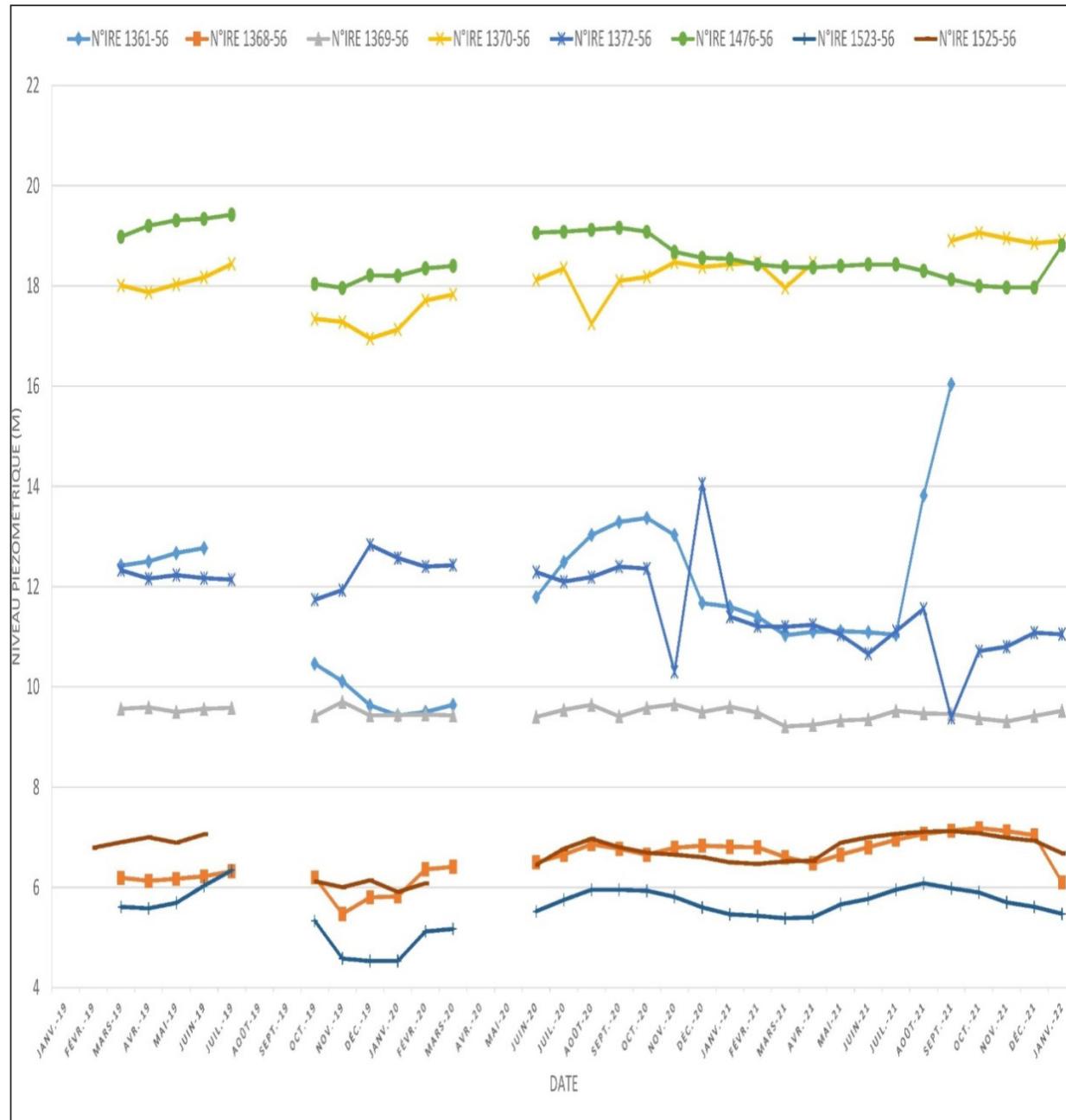


Figure 6. Les chroniques piézométriques de 8 forages mesurés entre 2019 et 2022 de la nappe quaternaire de Tinejdad-Touroug.
 Figure 6. The piezometric chronicles of 8 boreholes measured in 2019 to 2022 of the quaternary Tinejdad-Touroug aquifer.

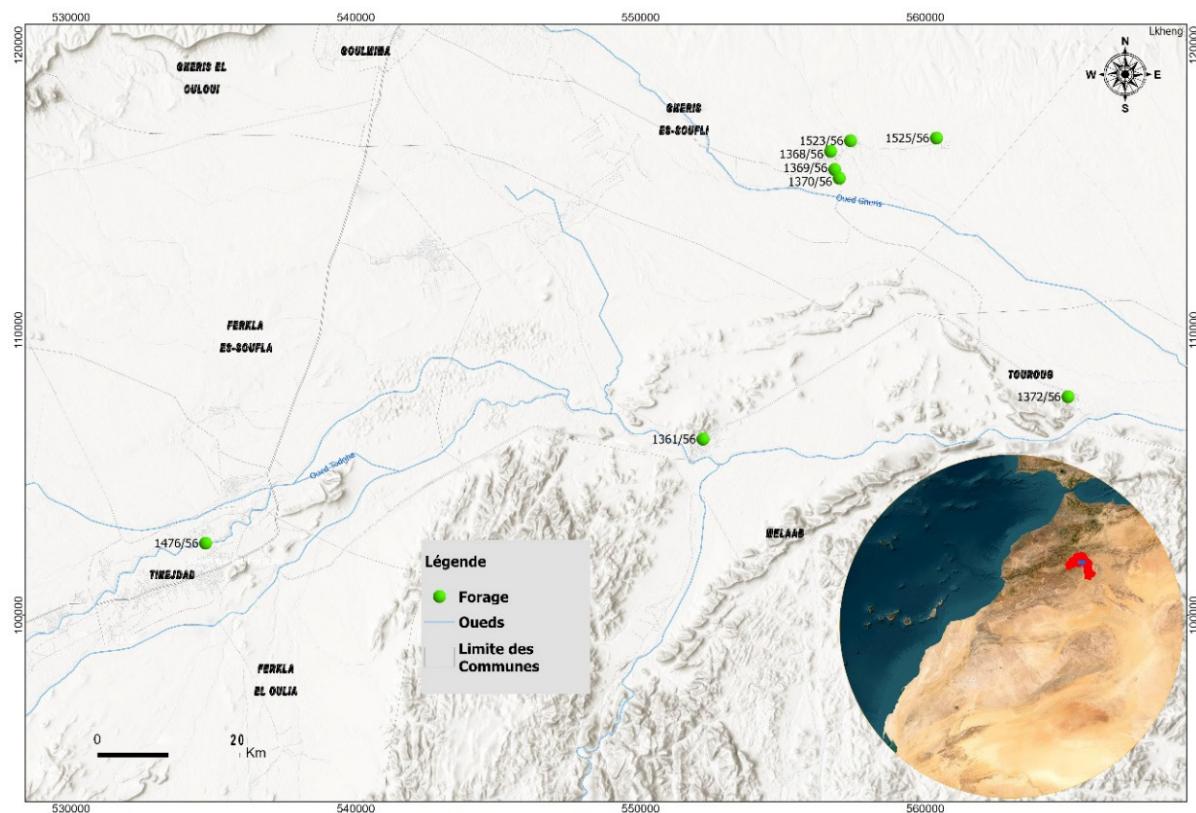


Figure 7. Situation géographique de 8 forages mesurés entre 2019 et 2022 de la nappe de Tinejdad-Touroug
Figure 7. Geographical location of 8 boreholes measured in 2019 to 2022 of the Tinejdad-Touroug aquifer

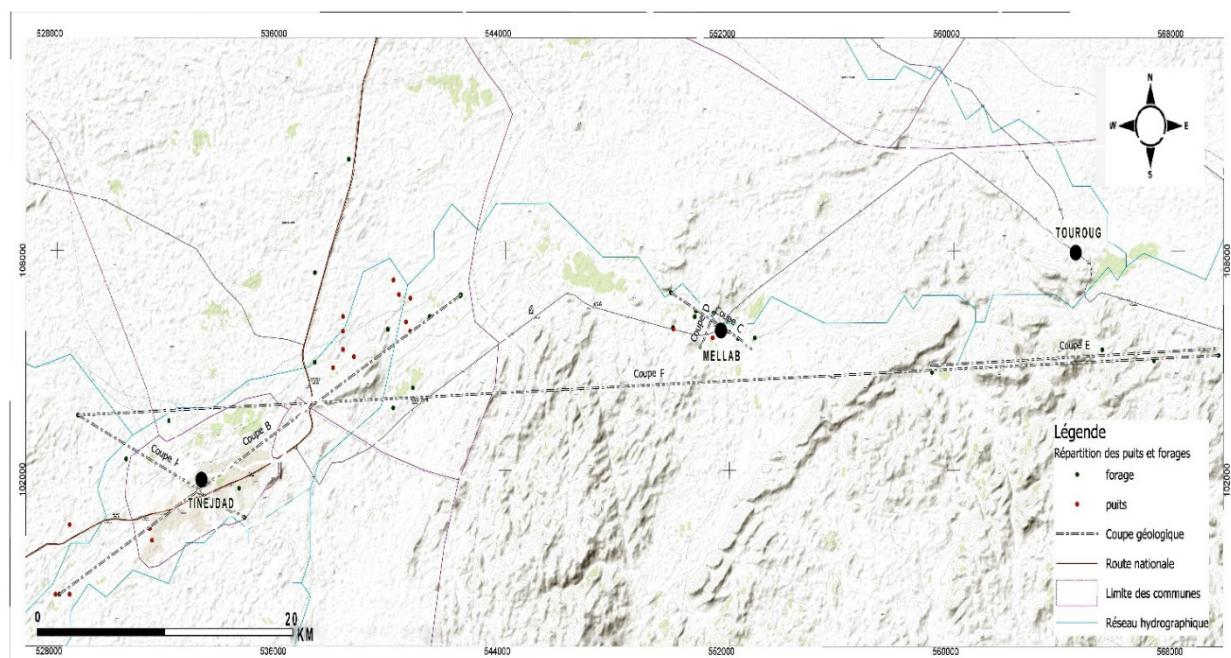
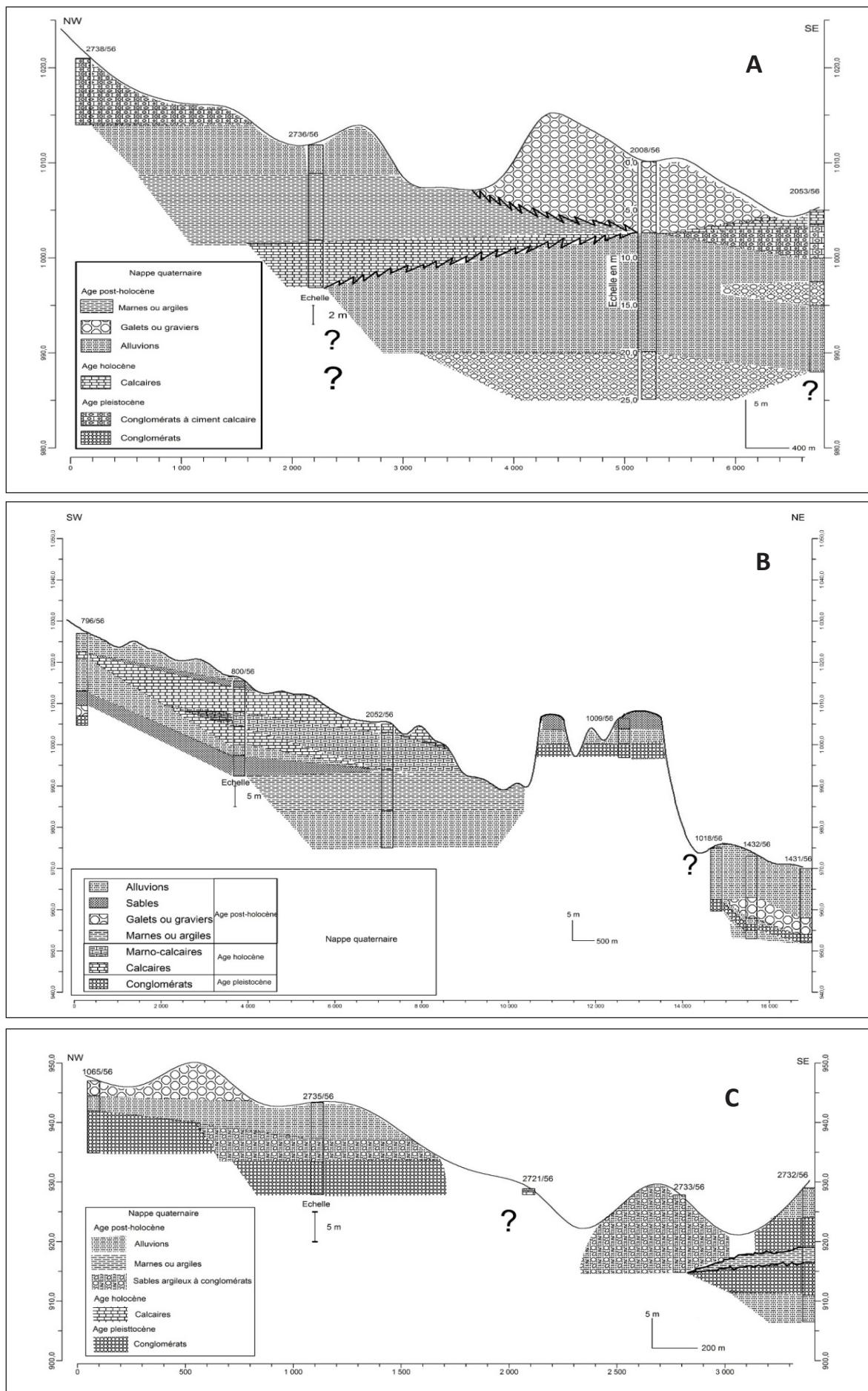


Figure 8. Carte de localisation des coupes géologiques de l'aquifère quaternaire de Tinejdad-Touroug
Figure 8. Geological cross-section map of the Tinejdad-Touroug Quaternary aquifer



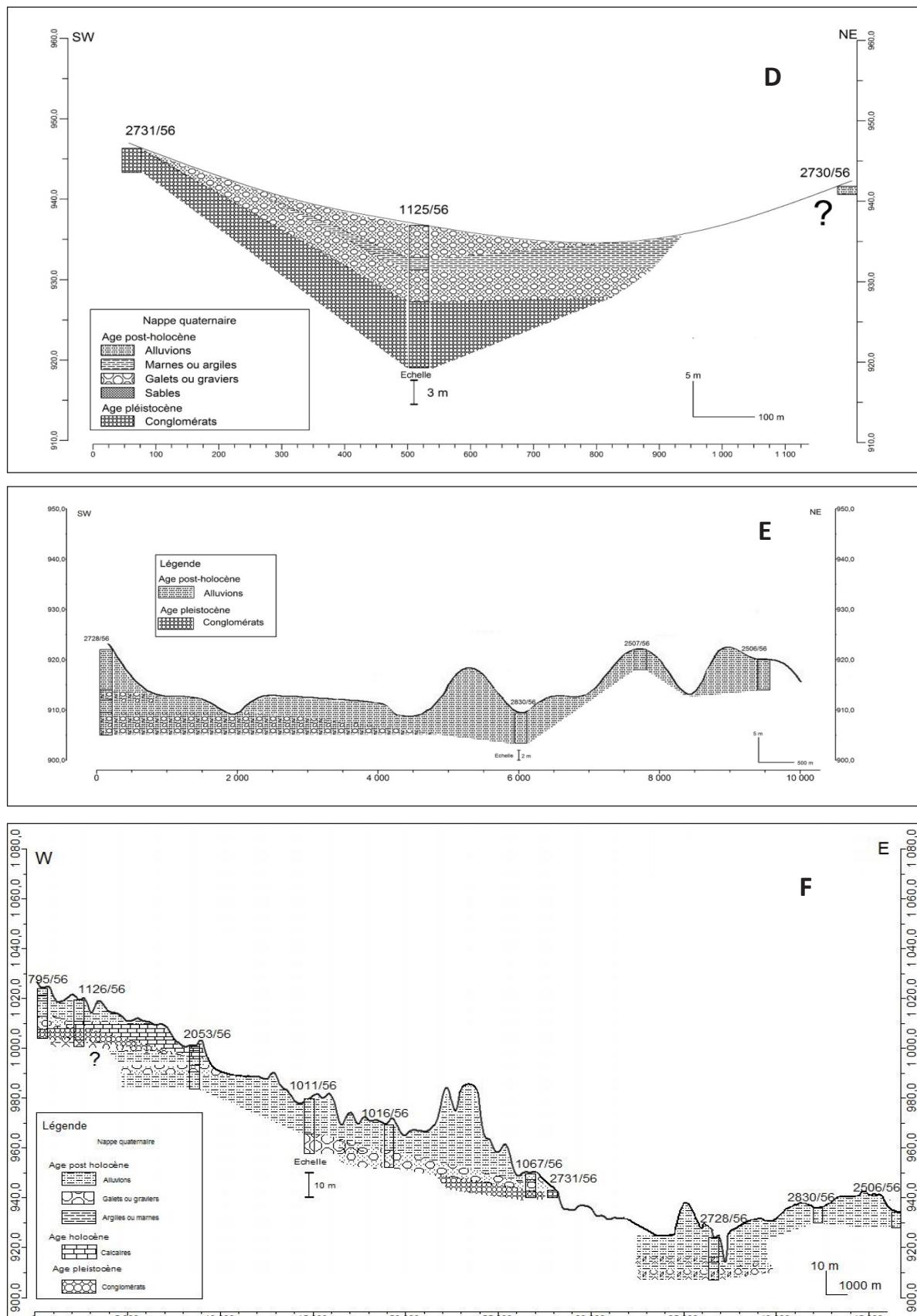


Figure 9. Traçage de la géométrie de la nappe quaternaire de Tinejdad-Touroug à partie d la corrélation des coupes lithologiques (A, B, C, D, E et F) (localisation des coupes : voir fig. 9) (Nous considérons que les failles sont antérieures à ces dépôts récents). ?: passage latéral de faciès.

Figure 9. Tracing of the geometry of the Tinejdad-Touroug Quaternary nappe based on correlation of lithological sections (A, B, C, D, E and F) (location of sections: see Fig. 9) (We consider the faults are older than these recent deposits). ?: lateral facies transition.

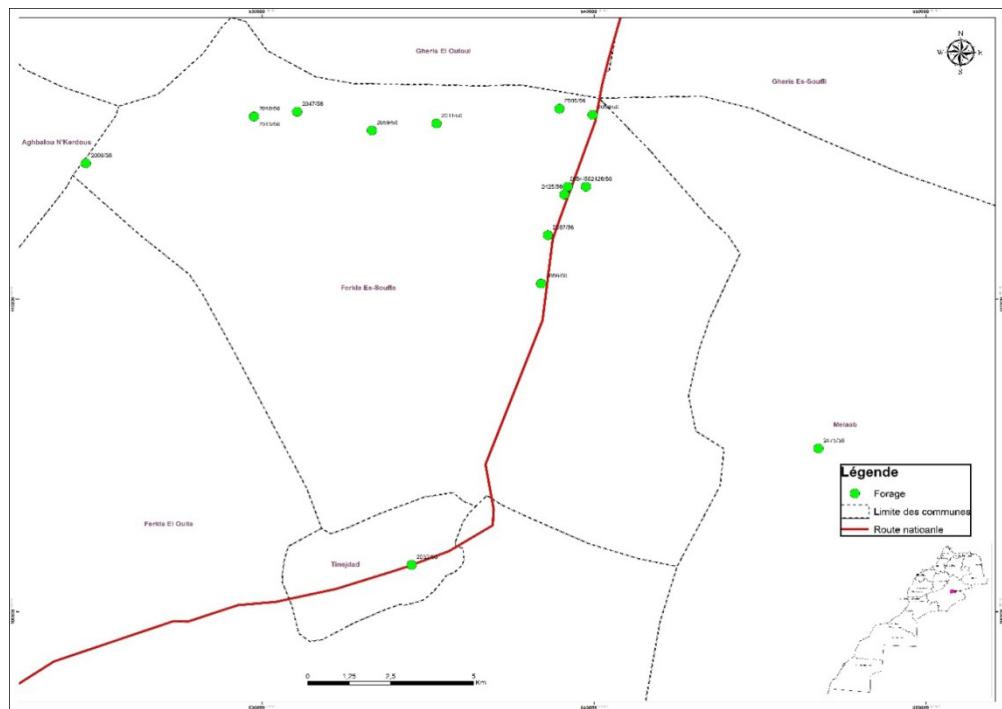
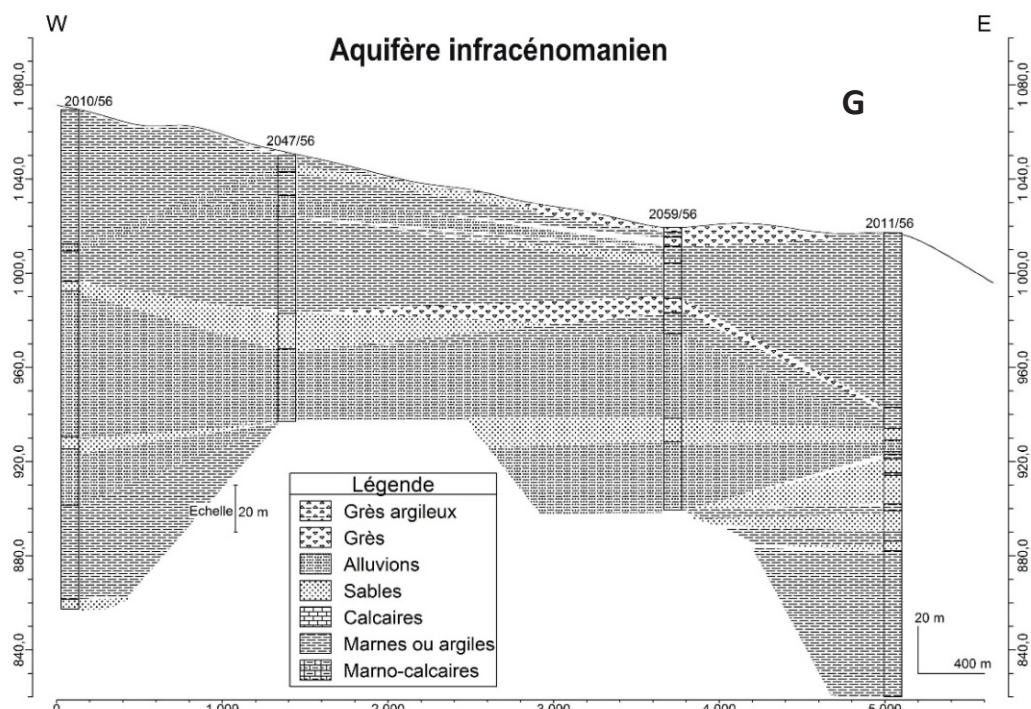


Figure 10. Localisation géographique des forages de la nappe infra-cénomanien ne
 Figure 10. Geographical location of the boreholes of the sub-Cenomanian aquifer



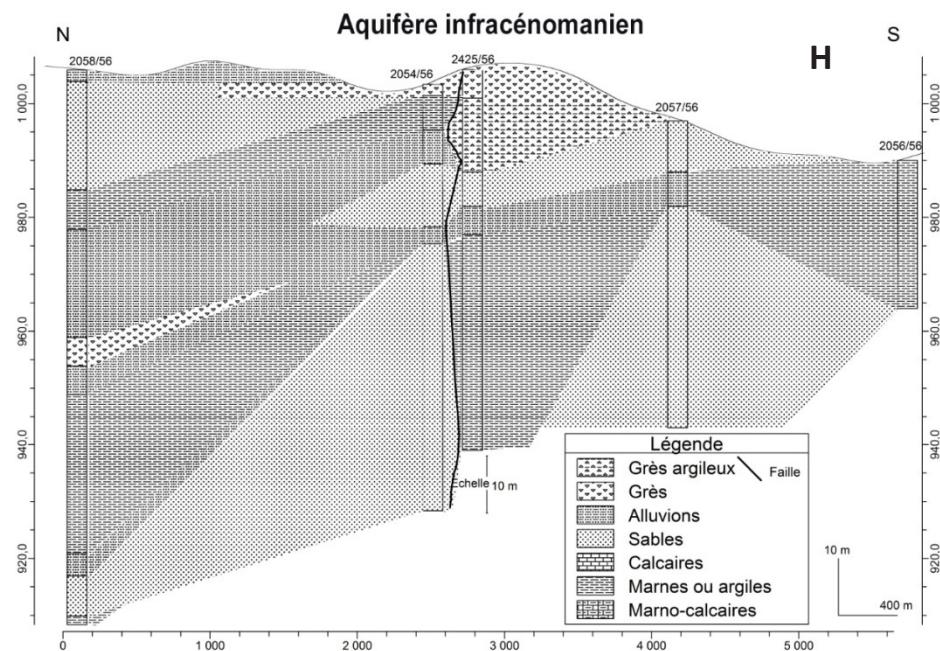


Figure 11. Corrélation des forages selon les coupes (G et H) de la nappe infra-cénomanien ne
 Figure 11. Correlation of boreholes according to sections (G and H) of the infra-cenomanian water table

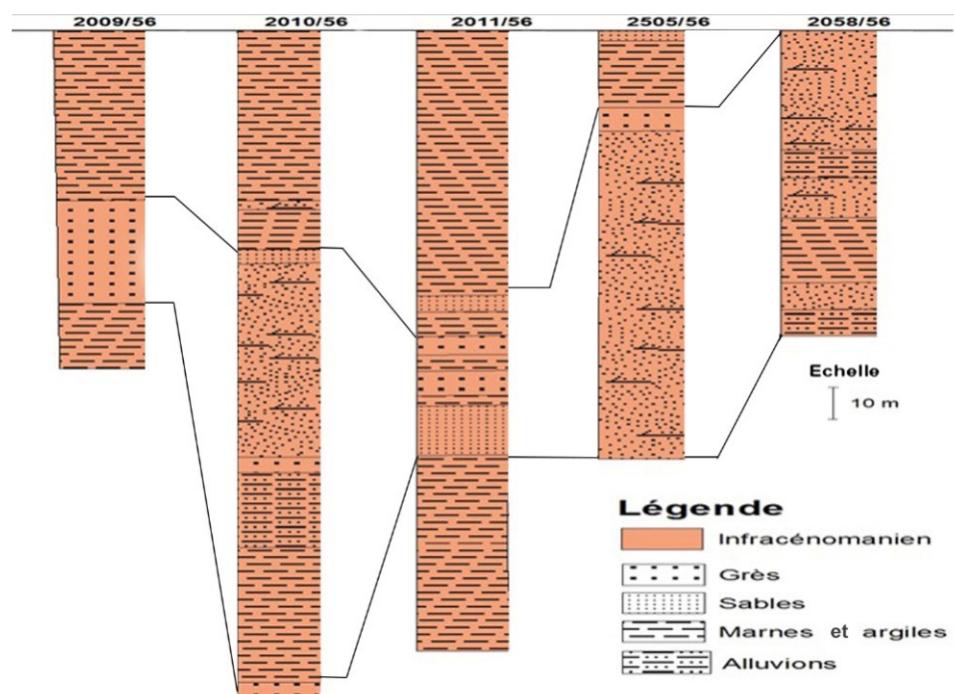


Figure 12. Corrélation stratigraphique de cinq forages de la nappe infra-cénomanien ne
 Figure 12. Stratigraphic correlation of five boreholes of the sub-Cenomanian aquifer

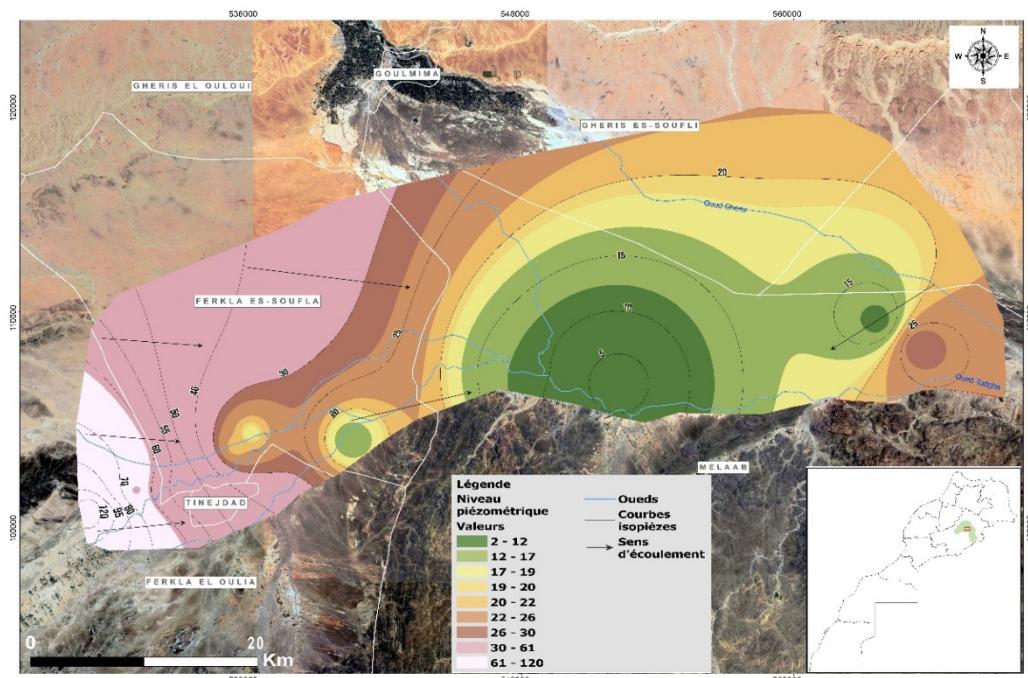


Figure 13. Carte piézométrique de la plaine Tinejdad-Touroug (Avril 2021).
Figure 13. Piezometric map of the Tinejdad-Touroug plain (April 2021).

CONCLUSION

L'aquifère quaternaire est géométriquement complexe, avec une alternance des séries argileuses imperméables et des faciès sableux lenticulaires perméables. Cette complexité est liée essentiellement aux mécanismes de dépôt qui sont, en général, des chenaux fluviaires méandriformes à progradation latérale responsable de dépôt de corps sableux. La nappe présente, en plus, un sens d'écoulement de l'ouest vers l'est, alors que la nappe infra-cénomanien n'est conditionnée, plutôt, par un sens d'écoulement du NW vers le SE (au Nord de Tinejdad), parfois Ouest-Est (entre Tinejdad et Touroug). Ce dernier est lié surtout à la structuration du bassin crétacé entant que bassin d'avant pays formé lors du serrage alpin. Les deux nappes sont, généralement, séparées par une épaisse série argileuse ce qui rend l'aquifère infra-cénomanien une nappe captive.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le personnel de l'agence du bassin hydraulique du Guir-Ziz-Rhéris d'Errachidia pour leur collaboration, leur soutien durant toute la période de réalisation de cette recherche, leur accueil et service de grande qualité. Les auteurs tiennent également à exprimer leurs vifs remerciements à l'éditeur en chef du « Bulletin de l'Institut Scientifique » prof. ACHAB Mohammed et aux évaluateurs de la revue, prof. HILALI Mohammed et prof. MILI Mustapha de l'Université de Meknès pour leur contribution significative à l'amélioration du manuscrit.

REFERENCES

ABH du Guir-Ziz-Rhéris 1994. Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau des bassins du Guir, Ziz, Rhéris et Maider.

Adardor S., Haddoumi H., Rachdi A. et al. 2021. Jurassic-cretaceous red beds of the southern front of Moroccan central high atlas (Aghbalou N'kerdouss-tadighout region) sedimentological lithostratigraphical and paleogeographical studies. *Journal of African Earth Sciences*, 178, Article ID104185.

Baidder L., Raddi Y., Tahiri M. et al. 2008. Devonian extension of the Pan-African crust north of the West African Craton and its bearing on the Variscan foreland deformation: evidence from eastern Anti-Atlas Morocco. *Geological Society, London, Special Publications*, 297, 453-465.

Baidder L., Michard A., Soulaimani A. et al. 2016. Fold interference pattern in thick-skinned tectonics a case study from the external Variscan belt of Eastern Anti-Atlas Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 119, 204-225.

Bouzekraoui M., Essalhi M., Saadi M. et al. 2023a. Depth Estimation and Geometry of Basement in the Tinghir-Errachidia-Boudenib Basin (Pre-african Trough Morocco) from Source Parameter Imaging Operator (SPI). *Advances in Science Technology and Innovation. Springer International Publishing*.

Bouzekraoui M., Saadi M., Essalhi M. et al. 2023b. Extensional tectonics, structural architecture modeling and geodynamic evolution in the Cretaceous Tinghir-Errachidia-Boudenib basin (Pre-African Trough, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 203, Article ID104957.

Chamayou J. & Ruhard J.P. 1977. Sillon préafricain à l'est du Siroua: les bassins de Ouarzazate et de Errachidia (Ksar-es-Souk) -Boudenib. *Ressources en Eau du Maroc*, 3, 224-242.

- Destombes J. & Hollard H. 1988. Carte géologique du Maroc au 1/200000, feuille Todrha-Maider. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, 243p.
- El Messaoudi A., Mahboub A. & Ameziane A. 2004. Bilan des ressources en eau dans l'oasis de Ferkla-Atelier sur la gouvernance locale de l'eau dans les Oasis du Sud Marocain / cas de Ferkla (Tinejdad, Errachidia, Maroc). Séminaire.
- El Ouali A. 1999. *Modalités d'alimentation et échanges entre aquifères de piémont en conditions climatiques arides. Cas des systèmes aquifères du Haut Atlas/bassin crétacé d'Errachidia (Maroc)*. Thèse d'Etat, Université Mohamed-V-Ecole Mohammadia d'ingénieurs, Rabat, 182p.
- Kabiri L. 2004. Impact des changements climatiques et anthropiques sur les ressources en eau dans les Oasis du Sud Marocain-Cas de Ferkla (Tinejdad-Errachidia Maroc). Colloque international.
- Kabiri L. 2005. Gestion des ressources en eau dans les oasis du sud Marocain-Cas de Ferkla (Tinejdad-Errachidia Maroc). Colloque international.
- Margat J. 1958. Les recherches hydrogéologiques et l'exploitation des eaux souterraines au Tafilalt. *Mines et Géologie*, 4, 43 -68.
- Michard A., Frizon de Lamotte D., Saddiqi O. *et al.* 2008. Continental Evolution : The geology of Morocco. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Ounaimi H., Berger J., Abderrahmane S. *et al.* 2020. Géodynamique de l'Anti-Atlas : Évolution géologique de l'Anti-Atlas marocain du Précambrien au Paléozoïque inférieur.
- Saquaque A., Benharref M., Abia H. *et al.* 1992. Evidence for a Panafrican volcanic arc and wrench fault tectonics in the Jbel Sagro, Anti-Atlas, Morocco. *Geologische Rundschau*, 81, 1, 1-13. <https://doi.org/10.1007/BF01764536>.
- Soulaimani A., Bouabdelli M. & Piqué A. 2003. The Upper Neoproterozoic-Lower Cambrian continental extension in the Anti-Atlas (Morocco). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 174, 1, 83-92. <https://doi.org/10.2113/174.1.83>.
- Talih A., Aboussalam Z. S., Becker R. T. *et al.* 2022. Stratigraphy and tectono-sedimentary processes of allochthonous and autochthonous Devonian deposits of the Tisdefine Basin, Eastern Anti-Atlas, Morocco. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 44, 43-69.
- Vouvé J. 1996. Développements sur la caractérisation géoélectrique des dépôts profonds en milieux continentaux et celle des réservoirs hétérométriques associés. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Sciences de la terre et des planètes*, 322, 2, 109-116.

Manuscrit reçu le 14/05/2024
Version révisée acceptée le 30/11/2025
Version finale reçue le 10/12/2025
Mise en ligne le 31/12/2025