

Caractérisation hydrogéologique et cartographie des ressources en eau dans le bassin versant de l'oued Rhéris (Sud-Est du Maroc)

Hydrogeological characterization and mapping of water resources in the Rheris watershed (southeast Morocco)

Said BAKI^{1*}, Mohamed HILALI², Ilias KACIMI¹ & Abderrahman MAHBOUB³

1. Université Mohamed V de Rabat, Faculté des Sciences, Laboratoire d'Océanologie, Géodynamique et Génie Géologique, Unité de Géologie de l'Eau et de l'Environnement : Etudes, Analyse et Recherches (G3EAR); 4 Avenue Ibn Battouta B.P. 1014 RP, Rabat, Maroc; *(saidbaki74@gmail.com).
2. Equipe de Recherche de Génie des Mines, de l'Eau et de l'Environnement (GMEE), Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia, Maroc.
3. Agence du Bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhéris Errachidia.

Résumé. Le bassin versant de l'oued Rhéris est situé au Sud-Est du Maroc, il s'étend sur une superficie de 12702 km², dominé par un climat semi-aride. La géologie du bassin est constituée par des terrains paléozoïques (grès, quartzites et schistes), jurassiques (à dominance calcaire), crétacés (essentiellement calcaire et grès) et plio-quadernaires (alluvions, limons et sables dunaires). L'objectif de ce travail est d'établir, à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG), une cartographie des ressources en eau du bassin, en particulier la définition des principaux systèmes aquifères et la répartition des puits/forages, sources, khettaras et du réseau hydrographique. Pour réaliser cet objectif, il est nécessaire d'utiliser les fonctions et les possibilités d'analyse offertes par les SIG, pour traiter les aspects climatologiques, géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques qui sont nécessaires avant la mise à jour de la situation des ressources en eau dans la zone d'étude. Le résultat final pourrait être un document de base pour la gestion et la planification des ressources en eau qui s'adresse aux usagers d'eau et aux décideurs.

Mots clés : Hydrogéologie, ressource en eau, SIG, cartographie, Rhéris, Maroc.

Abstract. The Rheris watershed is located in the southeast Morocco; it extends over an area of 12702 km², dominated by a semi-arid climate. The geological context consists mainly of Plio-quadernary formations, calcareous of the Mesozoic, sandstone and shale of the Paleozoic. The objective of this work is to establish, using a geographic information system (GIS), a water resource mapping of the Rheris watershed, particularly the definition of the main aquifer systems and the distribution of wells / boreholes, springs, khettaras and stream network. To achieve this objective, we use features and possibilities for analysis offered by GIS to process and evaluate the climatological, geological, hydrological and hydrogeological aspects which are necessary before any update on the situation of water resources in the study area. The final result is a map that may help for management and planning of water resources, intended for water users and decision makers.

Key words: Hydrogeology, water resources, GIS, mapping, Rheris, Morocco.

Abridged English version

The Rheris watershed is located in the Southeast of Morocco. It is bounded in the north and east by the Ziz watershed, in the northwest by the Oum Er-Rbia watershed, to the west by the Draa watershed and the south by the Maider watershed (Fig. 1). This watershed is characterized by the use of old traditional ways in the exploration and exploitation of groundwater resources and a scarcity of surface water resources, except for the upstream area, dominated by Rheris streams supported by the contributions of springs (Margat 1952; DRPE 1996; DRHGRZ 2008b). Geological formations are dominated by

Palaeozoic sandstone, quartzite and shales and Mesozoic limestones (Margat 1962). The topography is very diversified, with mountains in the High Atlas and Anti-Atlas; the plateaus are located in the cretaceous basin; while the plains are filled by sediments of Quaternary (Kabiri 2003). Rheris watershed is characterized by a semi-arid climate with an annual average rainfall slightly low, about 116 mm/year, which corresponds to a rainfall potential of 1.47 billion m³, spread over two seasons: the autumn and spring (DRHGRZ 2008b). The tools used in this work are based on:

(i) Database of boreholes: It corresponds to all water points (654 water points) existing in the inventory catalog; which includes information on identification, localization, depth, water levels, rates, pumping test, water quality, etc. (ii) Topographic maps: The Rheris watershed is covered by thirty topographic maps (scale: 1/50000); which are used for locating and extracting the stream network, cities, roads, elevation... (iii) Geological maps (scale: 1/500000): This area is covered by geological maps of Ouarzazate; Rabat and Hammada of Guir. (iv) Digital Elevation Model (DEM): This is a digital representation of elevations for the study area as raster format with a resolution of 28*28 meters, which undergoes a set of geoprocessing using the "ArcHydrotools" extensions, installed in the GIS tool (ArcGIS 10.0). The process begins with the DEM verification and rectifying, and the identification of flows direction and accumulation, followed by sub-watersheds drainage lines and outlets, etc.

The methodological approach is based on using the characteristics and possibilities of analysis and geoprocessing, offered by the Geographic Information System (GIS) in particular the ArcGIS software. The approach involves the determination of aquifer systems from geological maps and inventory of all water points (boreholes, wells, springs, dams, rivers, khattaras ...) located in the watershed. The definition of these aquifer systems is based on the study of geological formations according to their lithology and physical properties (permeability, effective porosity ...) and their ability to contain aquifers. Likewise, the classification of aquifer systems is based on the nomenclature adopted for the definition of an aquifer (unconfined aquifer, deep aquifer, etc.).

The results of this research show that the dominant geological formations are sedimentary rocks (area : 9931 km²), which corresponds to 78%, located in the High Atlas and Cretaceous basin, while the metamorphic and igneous rocks are located mainly in the Anti Atlas and represent 22% in the Rheris watershed (Fig. 2). The extracted total length of the river in the Rheris basin is 4931 km; their streams spread over an area of 12702 km², which gives an average drainage density about 0.4 km/km².

The rivers classification method (Strahler 1952), show that the rivers of order 1 are generally in the form of small ravines with a length of 2519 km, which corresponds to 51% of total length of the river in Rheris watershed; the intermediate orders 2, 3, 4 and 5 are 2246 km (46%) and the last order (6) has a length of 165 km, with a percentage of 3.4% of total length, and corresponds to downstream of Rheris river (Tab. 1, Fig. 3).

The Rheris watershed includes two major dams: Akrouz, and Timkit; and 52 small dams used to derivate water for irrigation. Their distribution in the watershed is mentioned in (Tab. 2, Fig. 4).

For groundwater use, the basin includes around 654 boreholes and wells. They are mostly intended for drinking water supply, with a total of 371, representing 56.8% followed by irrigation wells (43), which corresponds to 6.6%. The rest of wells goes for other uses (domestic, groundwater monitoring, etc). The watershed comprises more than 31 springs, the most important are: Tamda N'Massaoud (Tifounassine), Amssed (Tahamdount), Mouy, Tizgui (Todra Gorge), Imarighen ("sacred fish") and Tarda (Fig. 5). The khattaras are located in the downstream Rheris, nearly 78 khattaras totalize 284 km of length, an average of 3.6 km per khattara (Tab. IV, Fig. 6). The intermediate Rheris watershed has more than 99 khattaras with a total length of about 100 km; while in the upstream Rheris, the length does not exceed 0.3 km.

The defined aquifer systems in the Rheris watershed are represented in figure 8 and numbered as follows;

- 1: Plio-Quaternary alluvium aquifers: containing essentially, conglomerates, gravels and pebbles with permeability around 10⁻³ m/s, it covers 1247 km² and generally located along the valleys and plains (plain of Tafilalet; Goulmima palmgrove, and Tinghir-Todgha, Ghelil valley ...);
- 2: Cretaceous Aquifer generally containing limestone with a karst behavior, sand and sandstone. The extended area is about 3542 km²;
- 3: Lias-Domerian lower aquifer with limestone and dolomite, often fractured and sometimes karstified. It dominates the northern of the watershed (High Atlas zone) and extends over an area of 2412 km²;
- 4: Aalenian-Dogger aquifer with the limestone-marl, with cracked and karst networks, it occupies an area of 1082 km² located in the High Atlas particularly in Assoul and Ait Hani zones;
- 5: Discontinuous and limited aquifer with low permeability, located mainly in the south and south-east of the watershed. It overlooks an area 3354 km²;
- 6: Volcanic lands with predominance of fractured or cracked formations; it occupies 1065 km², located in the South and Southwest watershed.

The water resources map issued from this study allows identifying many aquifers in the Rheris watershed, including discontinuous aquifers (anti-atlas aquifers). Jurassic aquifers, located in the High Atlas, are usually enclosed in limestones, dolomites and calcareous clay (liasic and aalenian aquifers). Cretaceous aquifers (Errachidia-Boudenib watershed) are dominantly sandstone, sand and limestone. The Plio-Quaternary aquifers are located along major rivers (alluvial aquifers) and at the plain of Tafilalet (between Erfoud and Rissani). The most explored areas on the hydrogeological map (for wells and boreholes) are those located in the valleys of the High

Atlas, in the Errachidia-Boudenib watershed, and the Rheris downstream. The khetaras inventoried in the watershed are used for irrigation of the Goulmima,

Jorf-Fezna and Hannabou palm groves. The origin of these khetaras is mainly quaternary and lower cenomanian aquifers.

INTRODUCTION

Le bassin versant de l'oued Rhéris est caractérisé par l'utilisation de moyens traditionnels dans la prospection et l'exploitation des ressources en eau souterraines et par une pénurie des ressources en eau de surface à l'exception de la zone amont du Rhéris dominée par des cours d'eau soutenus par les apports des sources (Margat 1952 ; D.R.P.E. 1996 ; DRH GRZ 2008b).

Dans le domaine de la gestion et de l'évaluation des ressources en eau, la prise de décision repose en grande partie sur l'analyse des données qui proviennent de sources variées : les données des stations de précipitation et d'évaporation, les levés piézométriques, les données des forages d'eau et les débits des sources et des oueds.

Les informations spatiales sont distribuées et stockées dans une base de données et représentées par des cartes thématiques. Il est évident que l'utilisation des méthodes traditionnelles pour l'analyse et la synthèse des résultats provenant de ces informations

ne sont pas faciles. Cependant, le développement de l'informatique a rendu possible la manipulation et l'analyse de masses importantes de données sous plusieurs formes. Ceci, après l'introduction de la conception de la technologie du Système d'Information Géographique (SIG).

CADRE GENERAL DE LA REGION ETUDIEE

Le bassin versant de l'oued Rhéris est localisé dans la partie Sud-Est du Maroc entre les coordonnées Lambert Conformal Conic (Maroc zone I) X : 447098 à 616478 et Y : 11792 à 179719. Il est limité au Nord et à l'Est par le bassin versant de l'oued Ziz, au Nord-Ouest par le bassin de l'Oum Er Rbia, à l'Ouest par le bassin du Draa et au Sud par le bassin de Maider (Fig. 1).

Les formations géologiques dans la zone sont constituées principalement de grès-quartzitiques et schistes d'âge paléozoïque et de terrains à dominance calcaire d'âge mésozoïque (Margat 1962).

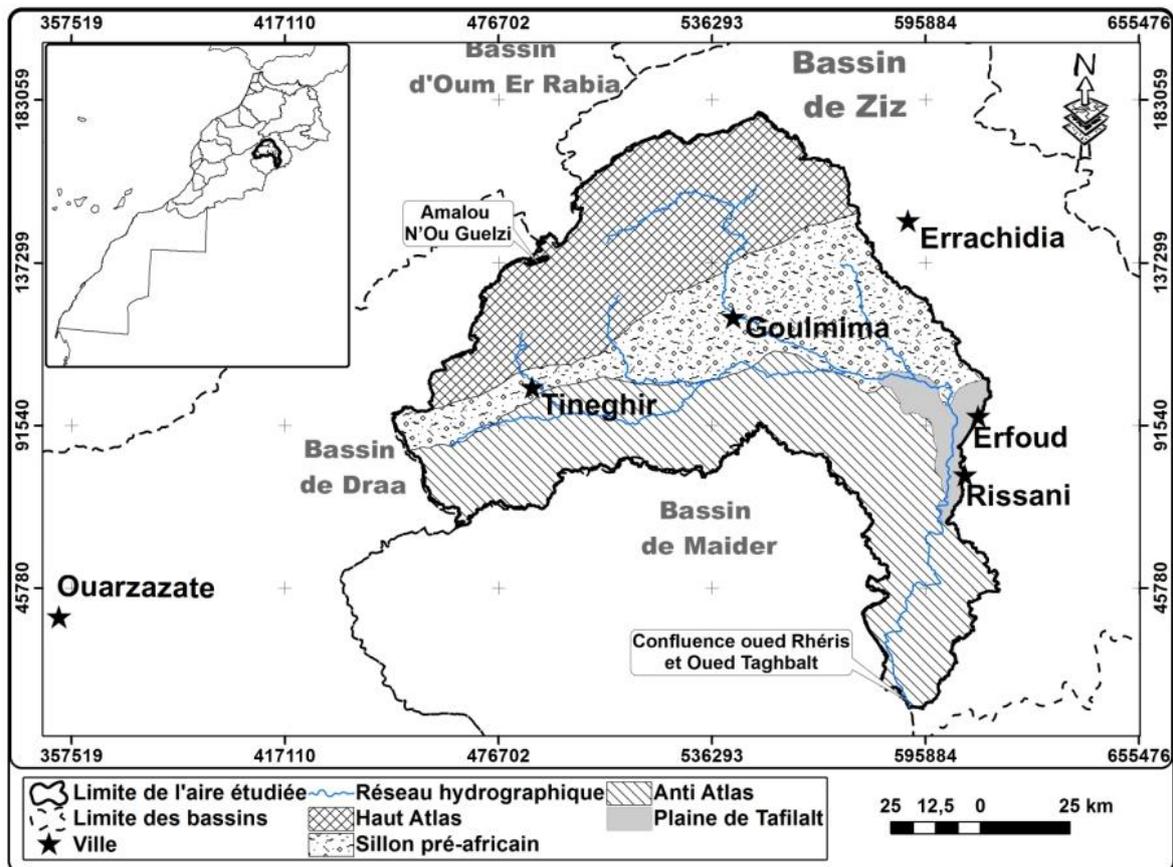


Figure 1. Carte de situation géographique de la zone d'étude.

Figure 1. Location of the study area.

Le relief est globalement diversifié avec des terrains accidentés dans les parties Nord, Nord-Ouest (Haut Atlas) et Sud-Ouest au niveau de l'Anti-Atlas ; les plateaux sont localisés dans la partie centrale en particulier dans le sillon pré-africain ; tandis que les plaines sont occupées par des terrains sédimentaires d'âge quaternaire (plaine de Tafilalt, oasis de Goulmima, de Ferkla et de Ghelil...) (Kabiri 2003). Les altitudes varient généralement entre 3135 m au niveau d'Amalou N'Ou Guelzi et 610 m au niveau de la confluence de l'oued Rhéris et Oued Maider avec une altitude moyenne de 1309 m à l'échelle du bassin, impliquant ainsi un réseau hydrographique moyennement dense avec une densité de drainage de l'ordre de 0,4 m/m² (Baki *et al.* 2016).

Le bassin de Rhéris est caractérisé par un climat semi-aride dont la pluviométrie moyenne annuelle reste relativement très faible, soit environ 116 mm/an ce qui correspond à un potentiel pluviométrique de 1,47 milliard de m³, répartie sur deux saisons : l'automne et le printemps (DRH GRZ 2008b, Kassou *et al.* 2016).

MATERIEL ET METHODES

Données des forages

C'est l'ensemble des points d'eau inventoriés (654 points d'eau) et qui font partie des ressources en eau gérées par l'agence du bassin hydraulique du Guir-Ziz-Rhéris; ce fichier comporte les informations sur l'identification, la localisation, les caractéristiques hydrodynamiques, la qualité des eaux de ces points d'eau, etc.

Cartes topographiques de la zone

Le bassin versant de l'oued Rhéris est couvert par une trentaine de cartes topographiques 1/50000 ; qui ont servi pour la localisation et l'extraction du réseau hydrographique des principaux cours d'eau, localités, réseau routier, reliefs,...

Cartes géologiques 1/500000

Le bassin versant de l'oued Rhéris est couvert par les cartes géologiques suivantes: La carte géologique de Ouarzazate 1/500000 qui couvre presque la totalité du bassin ; la carte géologique de Rabat 1/500000 qui couvre l'extrême Nord du bassin ; la carte géologique de Hammada de Guir 1/500000 qui couvre partiellement la partie orientale du bassin.

Modèle numérique du terrain

La représentation et la connaissance des bassins versants constituent l'élément clé pour la compréhension du processus du ruissellement. La représentation de la topographie du milieu est d'autant plus facile avec le développement des techniques d'acquisition et de mise à disposition des

informations digitales, notamment, par le biais des modèles numériques de terrain (MNT). Il s'agit d'une représentation numérique des altitudes de la zone étudiée sous forme d'un raster avec une résolution de 28,8*28,8 mètres, qui subit un ensemble de géotraitement à l'aide de l'extension « ArcHydrotools » installée dans l'outil SIG (ArcGis 10.0).

Le processus commence par la vérification et la correction du MNT, puis la définition de la direction et de l'accumulation des écoulements, suivi par les sous bassins élémentaires, les lignes et les points de drainage ainsi que le réseau hydrographique, etc... Ces informations permettront la génération des cartes des sous-bassins versants et une bonne description des caractéristiques physiques de ces sous-bassins.

Méthodologie

L'approche méthodologique proposée dans cette étude s'appuie sur l'utilisation des données hydrogéologiques, des fonctionnalités et des possibilités de l'analyse et de géotraitement, offertes par le système d'information géographique (SIG) en particulier le logiciel ArcGIS.

L'approche utilisée consiste à la détermination des systèmes aquifères à partir des cartes géologiques 1/500000 et l'inventaire de tous les points d'eau (forages, puits, sources, barrages, oueds, seuils de dérivation et khetaras) situés dans le bassin.

La définition de ces systèmes aquifères s'est basée sur l'étude des formations géologiques selon leur nature lithologique et propriétés physiques (perméabilités, porosités efficaces,...) et leurs aptitudes à renfermer des réservoirs aquifères. De même, la classification des systèmes aquifères est basée sur la nomenclature adoptée pour la définition des aquifères (aquifère libre, aquifère profond, etc).

RESULTATS

Formations géologiques

Les formations géologiques dominantes dans le bassin du Rhéris sont des terrains sédimentaires avec une superficie de 9931 km² ce qui correspond à 78% de la superficie totale du bassin, localisées généralement dans le Haut Atlas et le sillon pré-africain (bassin Crétacé d'Errachidia-Boudenib) tandis que les roches métamorphiques et éruptives sont localisées principalement dans l'Anti Atlas et représentent 22% de la superficie totale du bassin (Fig. 2).

La nature lithologique des formations géologiques peut être présentée comme suit : (i) Roches métamorphiques : schistes et quartzites du Paléozoïque ; (ii) Roches sédimentaires : calcaires et dolomies du Jurassique, sables, grès et calcaires du Crétacé et alluvions, limons, croûte calcaire et conglomérats du Plio-Quaternaire.

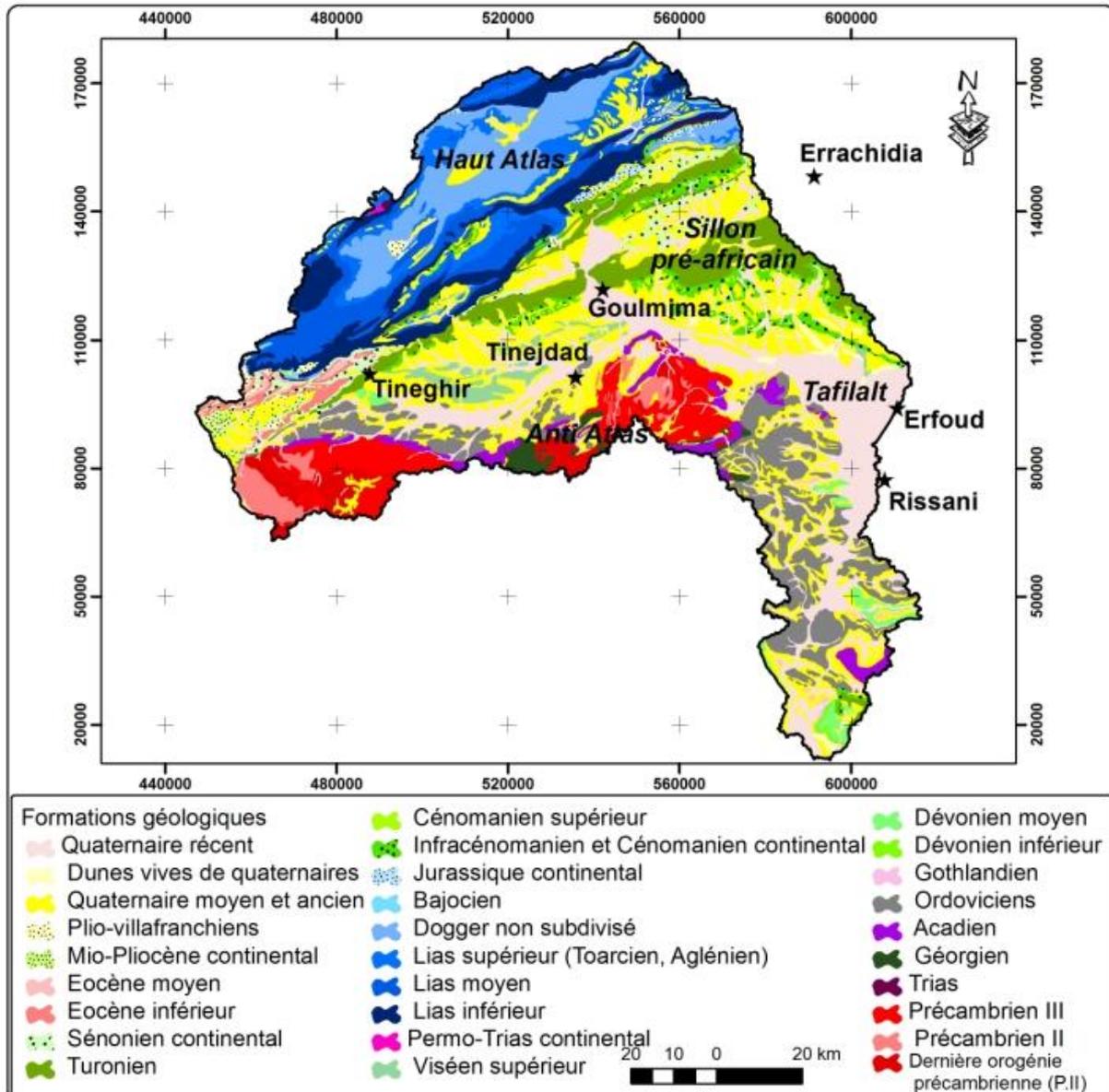


Figure 2. Carte géologique de la zone d'étude (extraite des cartes géologiques d'Ouarzazate, Rabat et Hammada de Guir au 1/500000).

Figure 2. Geological map of the study area (extracted from 1/500000 geological maps of Ouarzazate, Rabat and Hammada Guir).

Les eaux de surface

Réseau hydrographique

La longueur totale extraite de l'ensemble des cours d'eau du bassin versant de l'oued Rhéris est de l'ordre de 4931 km, ces cours d'eau sont répartis sur une superficie de 12702 km² ce qui donne une densité de drainage moyenne de l'ordre de 0,4 m/m². Selon la méthode de classification des cours d'eau de Strahler (1952), les oueds d'ordre 1 sont représentés généralement sous forme des petits ravins et dominent avec une longueur de 2519,2 km ce qui correspond à 51% de la longueur totale des cours d'eau du bassin. Le dernier ordre (ordre 6) possède une longueur de 165 km, avec une proportion de

3,4% de la longueur totale du réseau hydrographique, et correspond à la partie aval de l'oued Rhéris (Tab. 1, Fig. 3).

Tableau 1. Ordre et longueur des oueds du bassin de l'oued Rhéris.

Table 1. Order and length of Rheris watershed.

Ordre des oueds	Longueur (km)	%
1	2519,2	51,1
2	1262,4	25,6
3	537,3	10,9
4	241,0	4,9
5	205,7	4,2
6	165,6	3,4
Total	4931,2	100

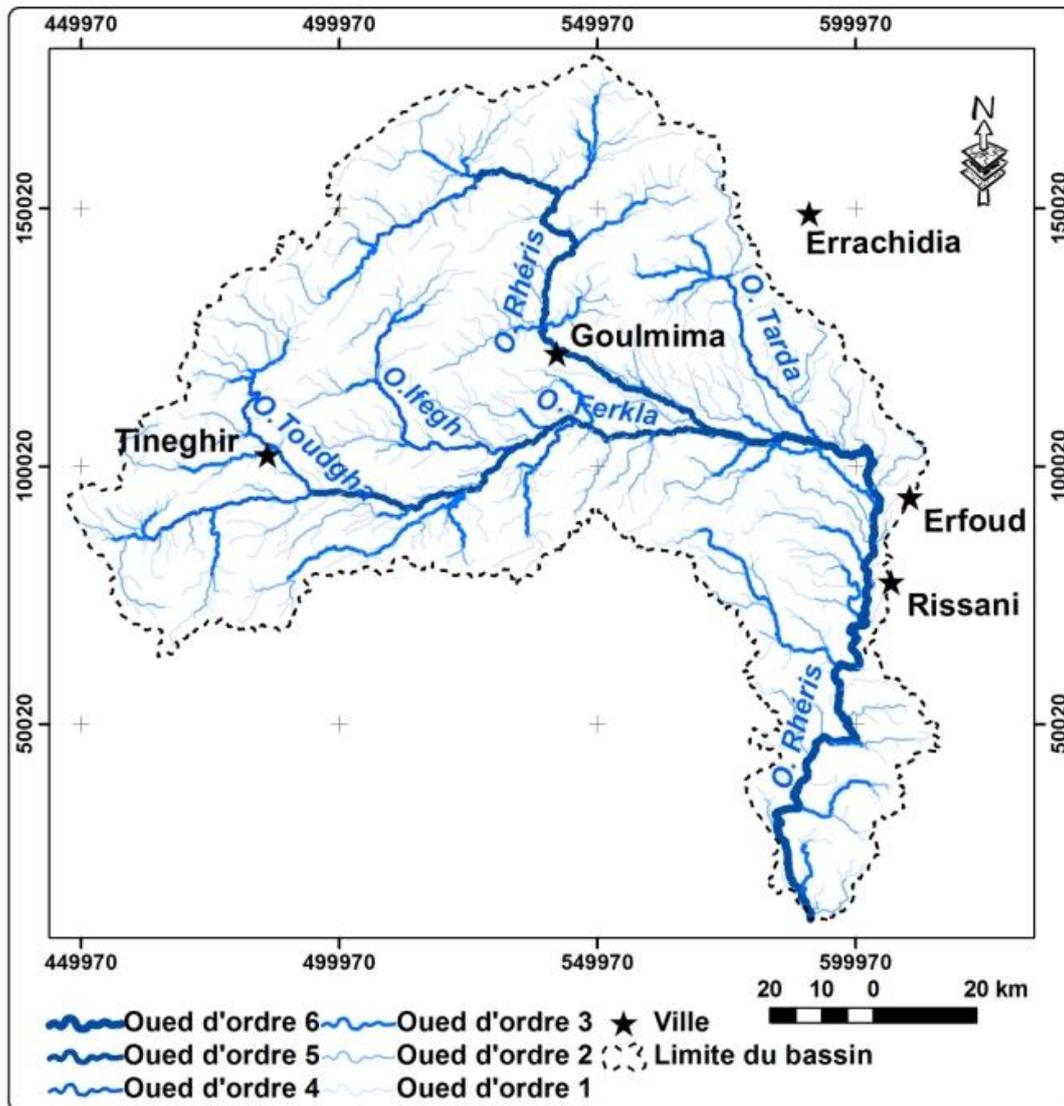


Figure 3. Carte du réseau hydrographique montrant l'ordre des cours d'eau.

Figure 3. Map of the hydrographic network showing the order of streams.

Barrages et seuils de dérivation

Le bassin du Rhéris compte deux barrages :

✓ Le barrage Akrouz: c'est un petit barrage situé sur l'oued Akrouz à une distance de 15 km au Sud-Est du centre de Tinejdad.

✓ Le barrage Timkit : c'est un barrage en cours de construction depuis 2008, situé sur l'oued Ifegh à une distance de 29 km au Nord-Ouest du centre de Tinejdad (Baki *et al.* 2014a).

La dérivation des eaux pour l'irrigation dans le bassin du Rhéris est pratiquée depuis des temps immémoriaux selon une distribution régie par des règles coutumières ancestrales. Une importante infrastructure en seuils de dérivation de l'eau permet d'irriguer plus de 33 400 ha.

Le nombre d'ouvrages existants s'élève à plus de 52 seuils de dérivation dont la majorité est construite

en béton armé et le reste est en digues fusibles (DRH GRZ 2008b). Leur répartition dans le bassin est comme suit (Tab. 2, Fig. 4).

Tableau 2. Répartition des seuils de dérivation par oued.

Table 2. Distribution of diversion thresholds.

Oued	Rhéris amont	Rhéris moyen	Rhéris aval	Total
Rhéris	9	8	6	23
Toudgha	10	1		11
Ferkla		10		10
Tanguerfa		5		5
Targuit	4			4
Essaf		1		1
Igoudmane	1			1
Total	24	25	6	55
%	44	45	11	100

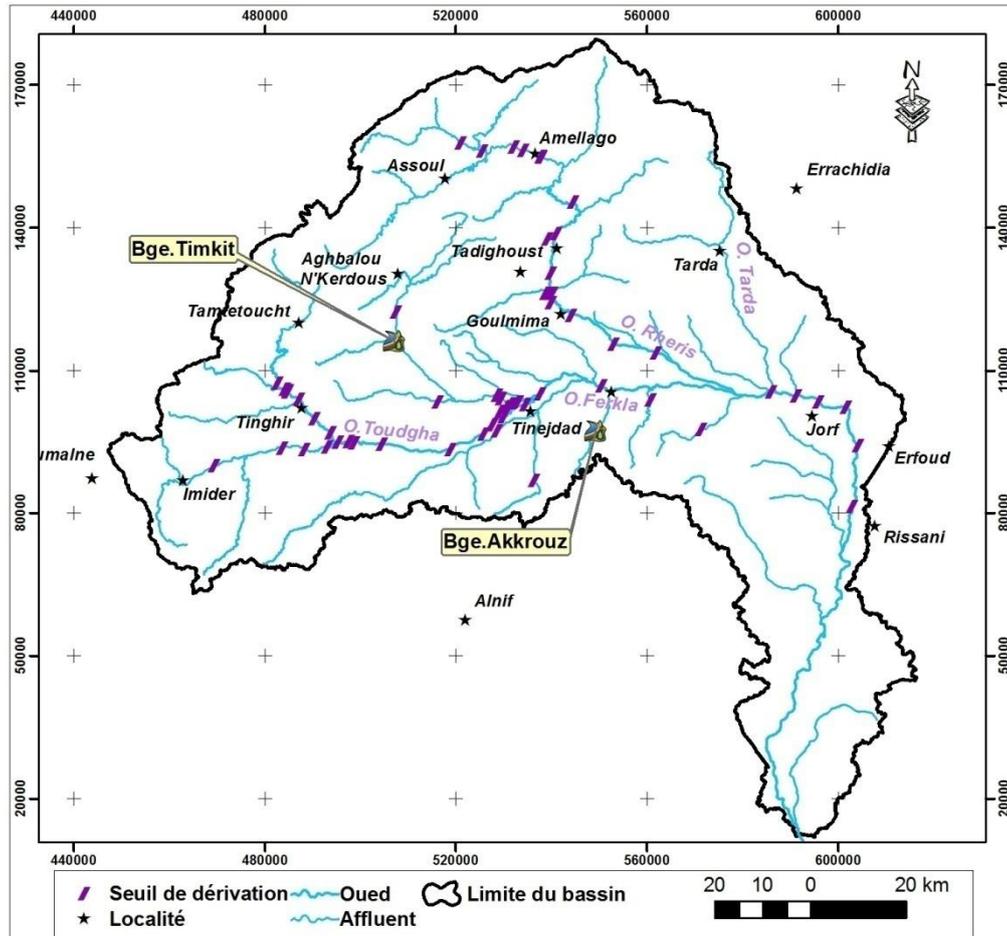


Figure 4. Carte de situation des barrages et seuils de dérivation.

Figure 4. Location of dams and diversion thresholds.

Les eaux souterraines

Les forages, puits et sources

Le nombre d'ouvrages d'eau (forages et puits) dans la zone d'étude compte près de 654 ouvrages dont les plus représentatifs sont ceux destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) avec un nombre

total de 371, ce qui représente 56,8% du nombre total d'ouvrages, suivis des ouvrages destinés spécifiquement à l'irrigation (43 ouvrages) (ce qui correspond à 6,6%), tandis que le reste est destiné à d'autres usages, comme le suivi piézométrique, les usages domestiques, etc (Tab. 3).

Tableau 3. Répartition des forages/puits par type d'usage.

Table 3. Distribution of boreholes / wells by type of use.

Point d'eau	Irrigation	Alimentation en eau potable (AEP)	Autres	Total
Total	43	371	240	654
%	6,6	56,8	36,6	100

Le bassin du Rhéris compte plus de 31 sources réparties par sous bassin comme suit : Le sous bassin du Rhéris compte 13 sources, les plus importantes sont la source de Tamda N'Massaoud (Tifounassine) et la source d'Amssed (Tahamdount); Le sous bassin de Toudgha renferme 12 sources dont les plus

importantes sont celles de Tizgui (source des gorges de Todgha) et Imarighen (source des "poissons sacrés"); Le sous bassin de Tarda totalise 5 sources; Le sous bassin d'Imider renferme une seule source. La figure 5 représente les points d'eau inventoriés dans la zone d'étude (puits/forages et sources).

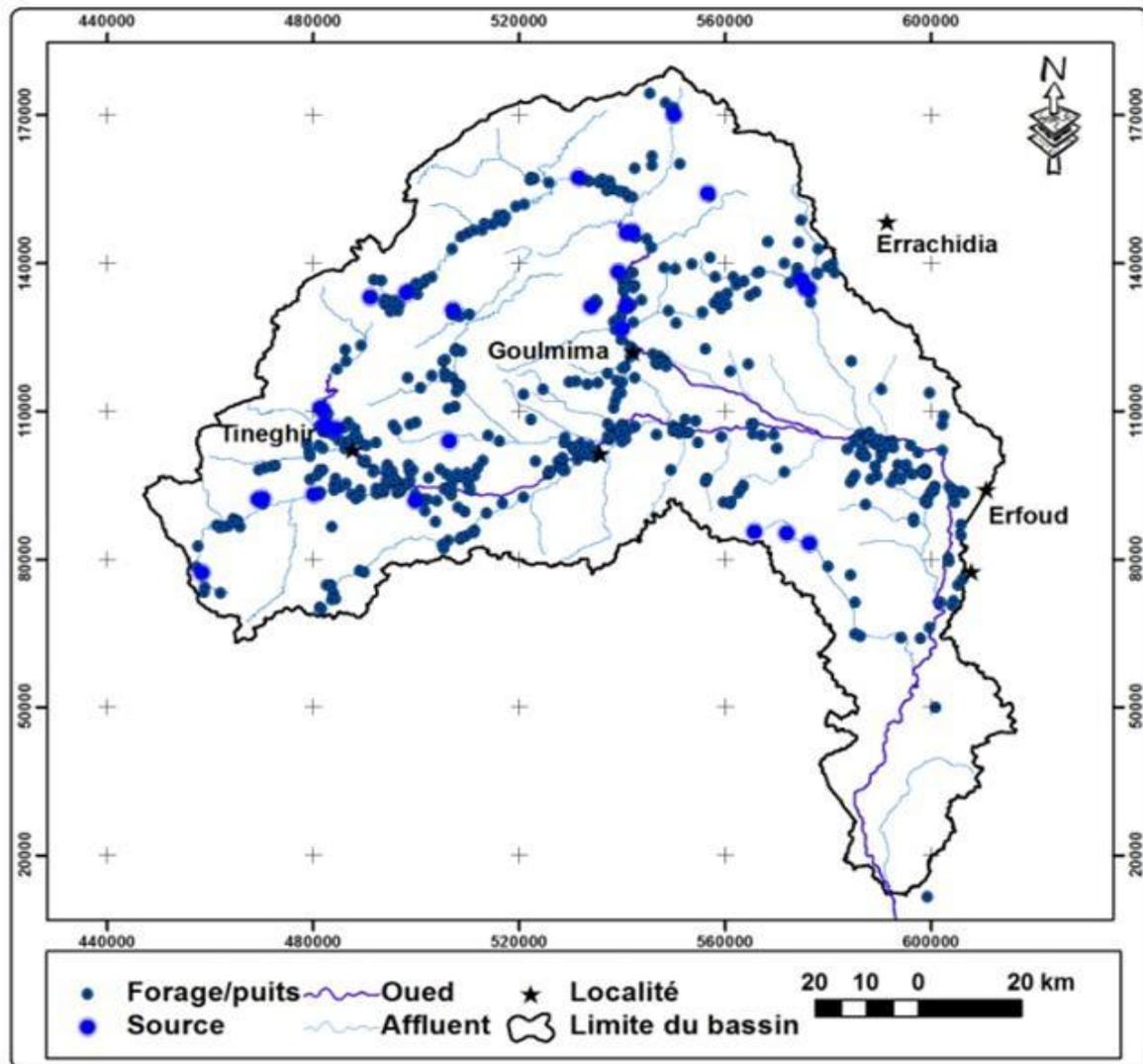


Figure 5. Carte d'inventaire des points d'eau souterraine.

Figure 5. Map of the inventory of groundwater points.

Les khetaras

Les khetaras correspondent à un canal souterrain permettant de mobiliser les eaux de la nappe en se basant sur la topographie et sur la gravité. Ce système est utilisable depuis plusieurs siècles. Il permet de ramener sous l'effet de la gravité l'eau de la nappe phréatique à la surface du sol à travers une galerie dont la longueur peut atteindre une dizaine de kilomètres (Ben Brahim 2003). Ces ouvrages sont généralement situés dans le bassin du Rhéris

aval au niveau des localités de Hannabou, Al Achouria et Rissani avec plus de 78 khetaras qui occupent une longueur totale de plus de 284 km et une moyenne de 3,6 km par khetara. Le bassin du Rhéris moyen compte 99 khetaras réparties entre les localités de Tizougaghine, Jorf, Fezna et Tinejdad avec une longueur de 100,6 km ce qui fait une moyenne de 1 km par khetara ; tandis qu'au niveau de Rhéris amont, la longueur ne dépasse pas 0,3 km (Tab. 4, Fig. 6).

Tableau 4. Khetaras inventoriées dans le bassin du Rhéris.

Table 4. Khetaras inventoried in the Rheris basin.

Zone	Nombre de Khetaras	Longueur (km)	%
Rhéris amont	3	0,8	0,2
Rhéris moyen	99	100,6	26,1
Rhéris aval	78	284,2	73,7
Total	180	385,6	100

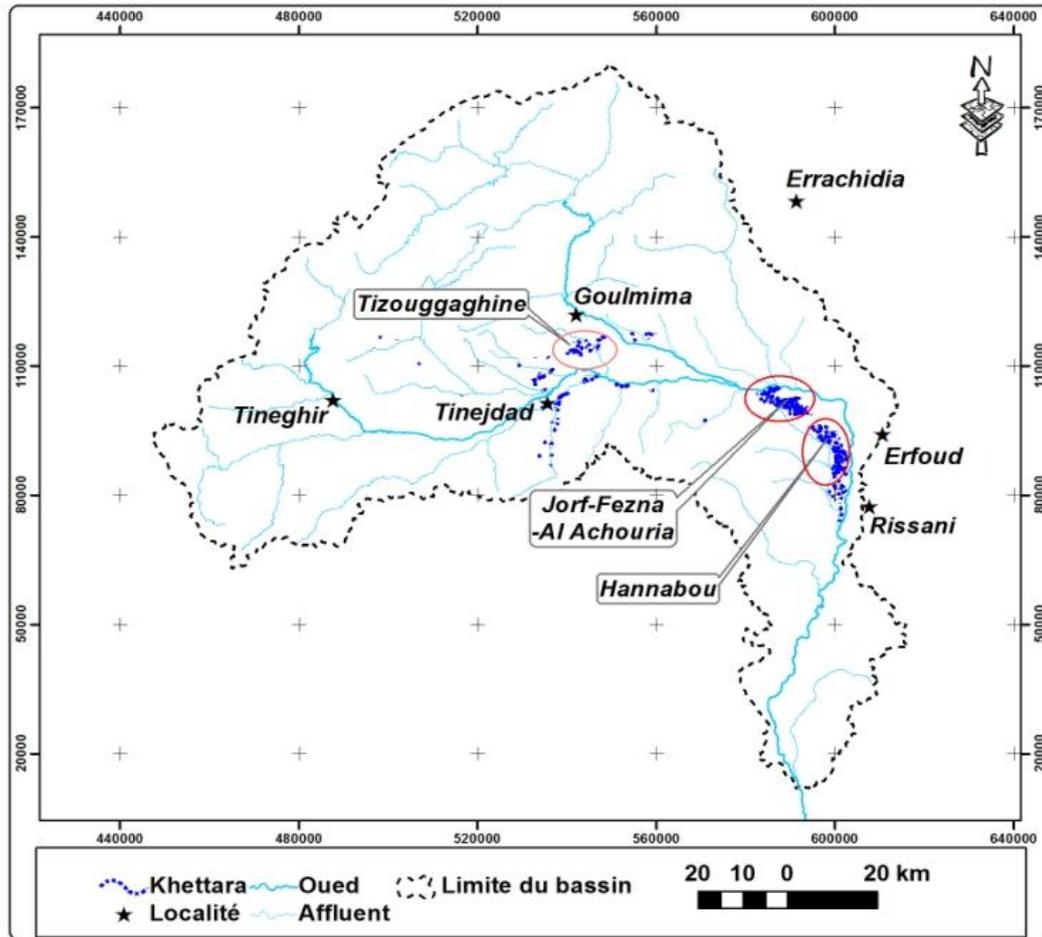


Figure 6. Carte de situation des khettaras du bassin de l'oued Rhéris.

Figure 6. Location of khettaras in the Rheris watershed.

Les systèmes aquifères

La carte des systèmes aquifères a été élaborée sur la base des données lithologiques des formations géologiques en affleurement (Fig. 2) et des résultats des travaux de forages permettant de définir les principaux systèmes aquifères avec leurs caractéristiques hydrodynamiques (perméabilités, productivités, etc). Les systèmes aquifères que nous avons définis dans le bassin versant de l'oued Rhéris sont représentés dans la figure 8 et numérotés comme suit :

1: L'aquifère du Plio-Quaternaire comportant essentiellement des alluvions, poudingues, graviers et galets d'une perméabilité de l'ordre de 10^{-3} m/s; il s'étend sur une superficie de 1247 km² et localisé généralement le long des vallées et plaines (plaine de Tafilalt; palmeraies de Goulmima, de Todgha-Tineghir et vallée de Ghelil,...).

2: Les aquifère du Crétacé : renfermant généralement des calcaires donnant lieu à des circulations du type karstiques, sables et grès. La zone d'extension est de l'ordre de 3542 km².

3: L'aquifère du Lias inférieur-Domérien, avec des calcaires et dolomies diaclasés, souvent fracturés et parfois karstifiés. Il domine la partie Nord du bassin (zone du Haut Atlas) et s'étend sur une superficie de 2412 km².

4: L'aquifère de l'Aalénien-Dogger, marno-calcaire, avec des réseaux fissurés et karstiques plus ou moins denses, il occupe une étendue de 1082 km² localisé au niveau du Haut Atlas, en particulier dans le trajet de Assoul à Ait Hani; ces deux derniers aquifères constituent les aquifères jurassiques du Haut Atlas.

5: Un domaine généralement peu perméable pouvant contenir un aquifère discontinu et d'extension limitée. Il domine une superficie de 3 354 km² et se situe principalement dans la partie Sud et Sud-est du bassin.

6: Un domaine renfermant essentiellement des terrains volcaniques avec prédominance de nappes d'arènes, de fractures ou de fissures, il occupe une superficie de 1065 km² localisé généralement dans les parties Sud et Sud-ouest du bassin.

Ces deux derniers aquifères sont localisés dans l'Anti Atlas.

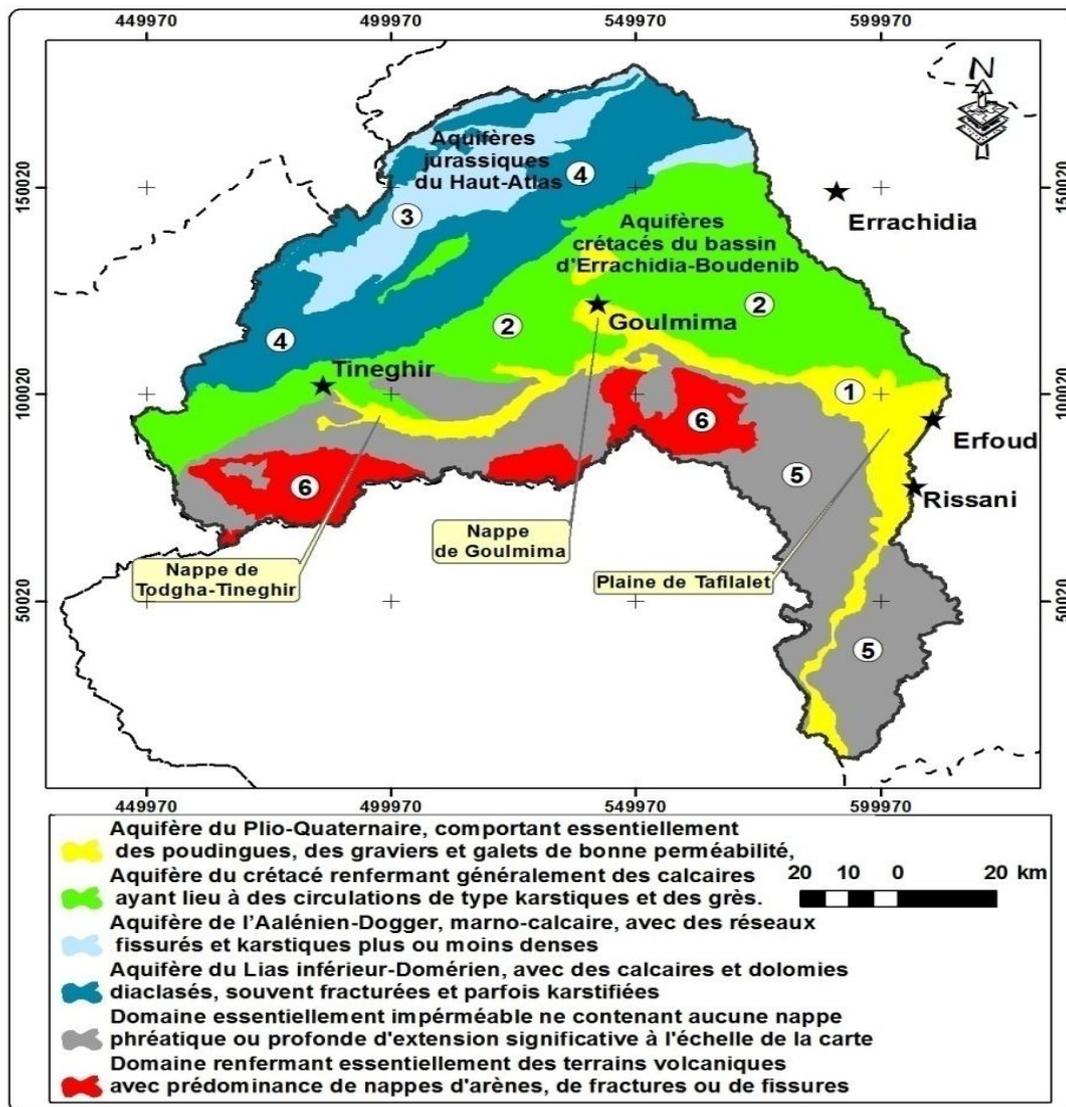


Figure 7. Carte des systèmes aquifères du bassin versant de l'oued Rhéris.

Figure 7. Map of the aquifer systems of the Rheris watershed.

Caractérisation hydrogéologique des réservoirs aquifères

L'aquifère du Plio-Quaternaire renferme les principales nappes suivantes:

1-La Nappe de la plaine du Tafilalet, le principal niveau aquifère de la plaine du Tafilalet est constitué par des conglomérats comportant quelques niveaux lenticulaires d'alluvions graveleuses. On retrouve à la base, des conglomérats et des calcaires lacustres, incluant quelques niveaux graveleux, puis au sommet, on retrouve des sables, cailloutis et galets, recouverts de limons (Margat 1962; Ruhard 1977; Kettani *et al.* 2011).

La profondeur du substratum de la nappe dépasse 20 m dans le centre du bassin et peut atteindre 30 m au Nord, le substratum remonte très rapidement et en plusieurs points il est plus élevé que la nappe sous le lit de l'oued Rhéris. La perméabilité moyenne de la nappe est d'environ 1.10^{-3} m/s. Les perméabilités

diminuent de l'amont vers l'aval, néanmoins dans le détail elles varient considérablement en fonction de l'hétérogénéité lithologique de la couverture quaternaire et surtout de la répartition spatiale des alluvions graveleuses. La transmissivité moyenne de la nappe varie entre 1 et 2.10^{-3} m³/s (Bahaj *et al.* 2013).

Deux types d'apports participent à l'alimentation de la nappe : les eaux superficielles et l'apport des nappes affluentes. L'apport principal est dû aux infiltrations, à partir des épandages de crues, du réseau d'irrigation et des terres irriguées, les infiltrations d'eaux pérennes (sources) jouant un rôle non négligeable dans certaines palmeraies. Les apports moyens de la nappe sont estimés à 12.4 millions de m³/an. Les sorties de la nappe sont constituées par les sources d'émergence, l'exploitation des eaux souterraines par les khetaras, les puits traditionnels et les stations de pompage. L'évapotranspiration et l'évaporation très élevées

constituent aussi l'exutoire principal de la nappe. L'exploitation est très élevée et constitue aussi la sortie principale de la nappe, elle est évaluée entre 15 et 20 millions de m³/an.

2- La Nappe de Todgha-Tineghir: cette nappe est située au pied du Haut-Atlas ; son alimentation s'effectue à partir des eaux superficielles qui sont pérennes et proviennent des sources. La nappe a enregistré une baisse du niveau piézométrique de 20 m environ, en particulier dans sa partie amont entre 1980 et 1993.

3- La Nappe de Goulmima: La nappe de Goulmima s'étend le long de l'oued Rhéris. La profondeur de l'eau varie entre 16 et 27m. L'écoulement général de la nappe se fait du NW vers le SE. L'historique piézométrique de la nappe montre généralement des baisses durant la décennie 1980 du dernier siècle, coïncidant avec la période de sécheresse, puis une remontée de la nappe à partir de 1989.

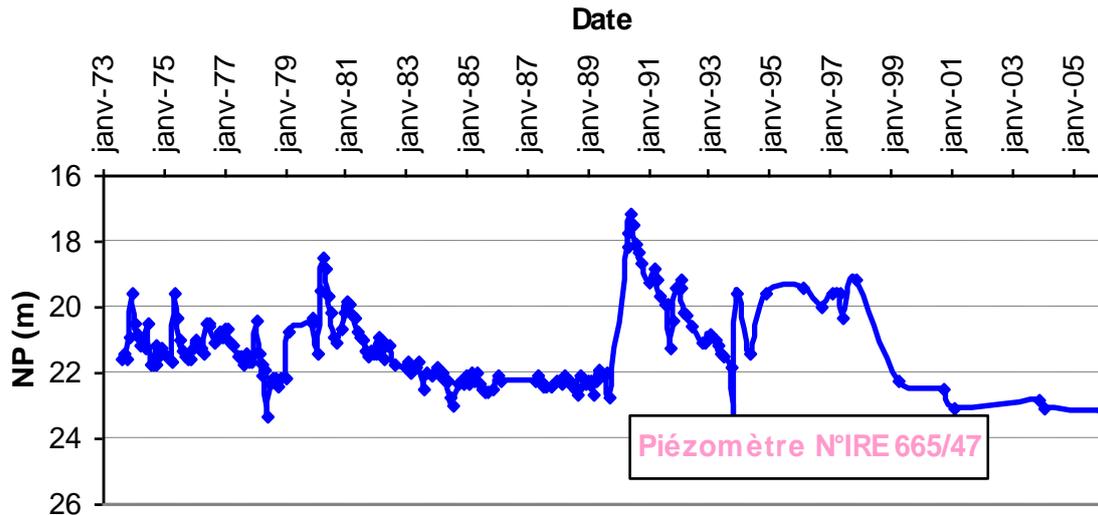


Figure 8. Exemple d'évolution piézométrique de la nappe de Goulmima (piézomètre 665/47).

Figure 8. piezometric evolution of the Goulmima aquifer (piezometer 665/47).

L'alimentation de la nappe peut se faire à partir des apports des calcaires turoniens dans la région de Tadighoust, des apports des crues et de l'aquifère infra-cénomaniens à Ksar Jdid (DRH GRZ 2008a).

L'aquifère du Crétacé est un aquifère multicouche faisant partie du bassin crétacé d'Errachidia-Boudenib. Il renferme trois principaux aquifères profonds surmontés souvent par un système de nappes phréatiques : les grès de l'Infra-Cénomaniens, les calcaires du Turonien et les sables et grès du Sénonien (Chamayou & Ruhard 1977; El Ouali 1992). Les débits des ouvrages captant l'Infra-Cénomaniens varient entre 0.5 et 69 l/s, avec une moyenne d'environ 14 l/s. L'Infra-Cénomaniens des zones de Goulmima-Tineghir révèle d'importants débits (débits dépassant largement les 10 l/s). En dehors de ces zones, les débits des forages sont faibles (inférieurs à 10 l/s). L'alimentation de l'aquifère se fait par abouchement avec les nappes du Haut Atlas et par l'infiltration des eaux des pluies et des crues. Les forages, les puits, les khetaras ainsi que la drainance ascendante avec les nappes quaternaires constituent les principales sorties de cet aquifère.

L'aquifère du Turonien offre de bonnes productivités et il est exploité essentiellement au

centre du bassin. Les débits des forages varient entre 0,2 et 120 l/s. L'aquifère du Turonien se caractérise aussi par les débits relativement importants de ses sources (Mouy, Tifounassine et Tarda), dont le débit total dépasse les 200 l/s (DRH GRZ 2008a; Baki 2014b). L'alimentation de l'aquifère se fait par abouchement avec les nappes du Haut Atlas et par l'infiltration des eaux des pluies et des oueds, le retour des eaux d'irrigation et par drainance à partir du Sénonien. Les prélèvements par pompage, les sources, ainsi que la drainance ascendante avec les nappes du Sénonien et du Quaternaire constituent les principales sorties de cet aquifère.

L'alimentation de l'aquifère sénonien se fait à partir des eaux de pluie, une éventuelle drainance ascendante de l'aquifère turonien, abouchement avec les aquifères jurassiques du Haut Atlas et l'infiltration d'une partie des eaux d'irrigation et des eaux de crues. Les sorties de l'aquifère sénonien sont représentées essentiellement par les oueds et les pompages. Les prélèvements par pompage, le drainage souterrain et le drainage par les sources constituent l'essentiel des sorties de l'aquifère.

Le tableau 5 récapitule le bilan de tout le bassin crétacé. Ce bilan indique une ressource renouvelable globale de près de 137 millions de m³ d'eau

souterraines à l'échelle de tout le bassin. Le volume de 137 millions de m³ est un ordre de grandeur qui représente aussi un critère de cohérence de l'approche de l'évaluation des écoulements souterrains notamment par modélisation mathéma-

tique à l'avenir. Ce volume correspond par ailleurs à la recharge moyenne annuelle de toutes les nappes dans le bassin crétacé couvrant une aire de près de 11 500 km².

Tableau 5. Bilan global des eaux souterraines dans le bassin crétacé (tout aquifère) (DRHGRZ 2008a).

Table 5. Global assessment of the Cretaceous basin (all aquifer) (DRHGRZ 2008a).

Entrées (Mm ³)	Total	Sorties (Mm ³)	Total
Recharge directe par pluie (bassin crétacé)	24	Total des prélèvements	62
Infiltration des eaux de crues (bassin crétacé) sans les lâchers du barrage Hassan Addakhil	45	Sources	14
Infiltration des lâchers du barrage Hassan Addakhil	5	Khettaras	5
Retours d'infiltration	31	Pompages	37
Abouchements souterrains à partir du Haut Atlas	32	AEP	6
		Flux sortants	75
Total des entrées	137	Total des sorties	137

Enfin, le volume de 137 Mm³ n'a de valeur significative qu'à une échelle interannuelle longue en raison de l'irrégularité et des aléas qui caractérisent le régime pluviométrique et hydrologique dans la région.

Aquifères jurassiques du Haut Atlas: Selon la DRH GRZ (2009) et Hilali (2009), les grands ensembles aquifères du Haut Atlas sont constitués par: Les réseaux aquifères du Lias inférieur et du Domérien calcaire formant un système relativement continu; L'aquifère de l'Aalénien et l'aquifère du Dogger : L'Aalénien et le Dogger forment des ensembles aquifères, organisés en bassins séparés dans chaque cuvette synclinale et généralement sans communication, et comprenant parfois plusieurs niveaux aquifères. La série imperméable du Toarcien-Aalénien inférieur sépare les ensembles aquifères du Lias inférieur-Domérien et ceux de l'Aalénien-Dogger. Des communications entre aquifères sont possibles cependant à la faveur de failles (Nouayti *et al.* 2014). A ces grands ensembles aquifères, se superposent des systèmes de nappes phréatiques du Quaternaire et de sous-écoulement se relayant mutuellement, répartis suivant chaque vallée.

Les valeurs des transmissivités de l'aquifère du Lias inférieur-Domérien varient généralement entre $1,7 \cdot 10^{-5}$ et $6,3 \cdot 10^{-3}$ m²/s. Les débits des ouvrages oscillent entre 0,1 et 120 l/s. Les sources du Lias inférieur présentent fréquemment de gros débits, parfois vaclusiennes (Kacimi *et al.* 2013).

Les valeurs des transmissivités de l'aquifère du Dogger varient entre $1,6 \cdot 10^{-5}$ et $2 \cdot 10^{-2}$ m²/s. Les productivités de l'aquifère sont variables en fonction de la fracturation, de 0 à plus de 100 l/s. Près de 80% du total des forages d'eau captant l'Aalénien ou le Dogger ont des débits inférieurs à 10 l/s. Le reste, soit 20%, ont des débits supérieurs à 10 l/s et peuvent

parfois atteindre les 100 l/s. L'alimentation des calcaires liasiques et du Dogger semblent provenir en totalité des précipitations. L'enneigement ne semble pas jouer un rôle très important. Les pentes sont en général très fortes, ce qui détermine un faible coefficient d'infiltration (DRH GRZ 2009). A l'amont des cluses liasiques, les oueds pérennes ou leur «inféoflux» pourraient constituer un apport sensible et les quelques cas de contacts par failles pourraient assurer un échange entre Dogger et Lias ou inversement.

Les sorties des aquifères jurassiques sont dominées en général par les sources d'émergence se situant au point bas des gorges transversales des anticlinaux. Ces sources présentent parfois de gros débits mais sont variables. Elles ont aussi souvent un caractère de déversement ou de trop plein. Les exutoires du Dogger sont généralement de faible débit et situés en des positions topographiques variables. Il s'agit en effet, de sources de déversement d'un niveau calcaire sur un passage plus marneux, quelquefois favorisées par des accidents. La plupart du temps, le Dogger qui affleure dans le lit d'un oued important provoque des résurgences de la nappe des alluvions.

Concernant les termes du bilan des aquifères jurassiques, les pluies constituent l'essentiel de la recharge des aquifères jurassiques au niveau des aires d'affleurement, soit près de 140 Mm³/an (ABH GZR 2011). Les sources constituent la part la plus importante des sorties du bilan avec près de 150 Mm³/an. Le drainage souterrain et les pompages sont respectivement de l'ordre de 32 Mm³/an et 4,6 Mm³/an. Le bilan établi indique une ressource renouvelable globale de près de 187 Mm³/an d'eaux souterraines (Tab. 6).

Tableau 6. Bilan des aquifères jurassiques du Haut Atlas (DRH GRZ 2009).

Table 6. Global assessment of Jurassic aquifers in the High Atlas (GRZ HR 2009).

Composante	Terme du bilan	Volume (Million m ³)
Entrées	Infiltration pluviale	140
	Retours d'irrigation	47.3
	Total entrées	187.3
Sorties	Sources	150
	Pompages	4.6
	Drainage souterrain	32
	Total sorties	186.6

CONCLUSION

La cartographie des ressources en eau du bassin du Rhéris revêt un intérêt primordial pour l'évaluation et la gestion rationnelle des ressources en eau. Elle est capitale pour l'exploitation et la planification de la ressource, la conception et la construction des ouvrages hydrauliques de la région d'étude.

Le résultat final de la présente étude est une carte de synthèse des ressources en eau qui comporte 4931 km du réseau hydrographique, 52 seuils de dérivation, 3 barrages, 6 systèmes aquifères, 654 ouvrages (forage et puits), 31 sources et 385,6 km de khetaras (Fig. 9). La carte des ressources en eau établie dans la présente étude permet de dégager les éléments suivants :

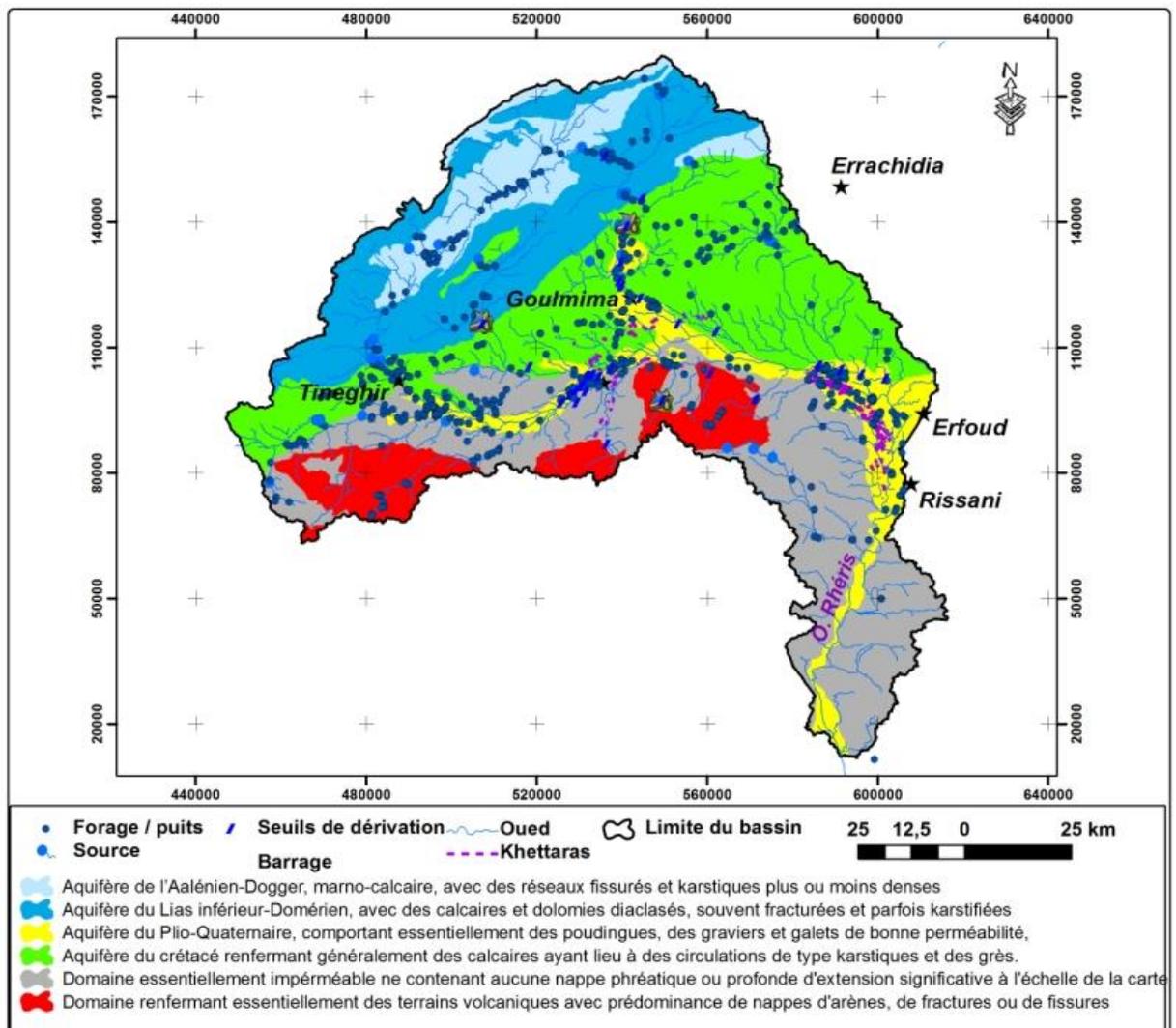


Figure 9. Carte de synthèse des ressources en eau du bassin versant de l'oued Rhéris.

Figure 9. Water Resources synthesis Map of the Rheris watershed.

Plusieurs aquifères sont identifiés dans le bassin du Rhéris, notamment l'aquifère discontinu du Paléozoïque (zone de l'Anti-Atlas) renfermé dans des grès quartzitiques fracturés, ou parfois dans des schistes altérés. Les aquifères du Jurassique situés dans le Haut Atlas sont généralement renfermés dans des calcaires, dolomies et marno-calcaires (aquifères du Lias, Aalénien,...). Les aquifères du Crétacé (bassin crétacé d'Errachidia) sont à dominance de grès, sables et calcaires. Les aquifères du Plio-Quaternaire sont situés le long des principaux cours d'eau (aquifères alluviaux) et au niveau de la plaine du Tafilalet (entre Erfoud et Rissani).

Les zones les plus prospectées sur le plan hydrogéologique (par puits et forages) sont celles situées dans les vallées du Haut Atlas, dans le plateau du bassin crétacé d'Errachidia et dans les zones des plaines. Les points d'eau, en particulier les forages et les puits se situent dans des zones à vocation agricole, ou à usage domestique, et d'accès facile pour leur réalisation. Les khetaras inventoriées dans le bassin sont utilisées pour l'irrigation des palmeraies du Sud de Goulmima, de Jorf-Fezna et Hannabou. Ces khetaras captent en grande partie les eaux de l'aquifère du Plio-Quaternaire et de la l'infra-cénomanien.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent aux responsables de tous les services de l'Agence du Bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhéris d'Errachidia et à la gérante du bureau d'étude RESSAM pour leur aide fructueuse et la mise à notre disposition de tous les moyens logistiques, données et documents. Les évaluateurs anonymes sont remerciés pour leurs commentaires et suggestions.

REFERENCES

- Agence du Bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhéris (ABH GZR) 2011. Actualisation du Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau des bassins de Guir, Rhéris, Ziz et Maïder (provinces d'Errachidia, Ouarzazate, Zagora et Figuig). *Rapport définitif de la mission 1*, 147-153.
- Bahaj T., Kacimi I., Hilali M., *et al.* 2013. Preliminary study of the groundwater geochemistry in the sub-desert area in Morocco: case of the Ziz-Ghris basins. *Procedia Earth and Planetary Science*, 7, 44 – 48.
- Baki S., Hilali M., Kacimi I. *et al.* 2014a. Utilisation du SIG pour la caractérisation des paramètres morphométriques des bassins haut-atlasiques : Cas du bassin versant de l'oued Igoudmane en amont du barrage Timkit (sud-est Maroc). *Proceeding, 2ème Colloque Internationale des Utilisateurs des SIG, Meknès*, p 644.
- Baki S., Hilali M. & Kacimi I. 2014b. Le bassin de Rhéris (provinces de Tineghir et d'Errachidia) : un patrimoine oasien riche en sources et khetaras. *4ème Workshop International de Géo-éco-tourisme (WIGET4) Tata*, p 123.
- Baki S., Hilali M., Kacimi I. *et al.* 2016. Etude de la vulnérabilité intrinsèque à la pollution et qualité des eaux de surface dans les zones arides : cas du bassin versant de l'oued Rhéris (Sud-Est du Maroc). *Journal of Materials and Environmental Science*, 7 (11), 3961-3972.
- Ben Brahim M., 2003. Les khetaras (qanat) du Tafilalet (SE. Maroc): Passé, présent et futur. *Internationales Frontinus*, Symposium Walferdange. Luxembourg Schriftenreihe Der Frontinus-Gesellschaft. Vol. 26, 99-123.
- Chamayou J. & Ruhard J.P. 1977. Sillon préafricain à l'est du Siroua: les bassins de Ouarzazate et de Errachidia (Ksar-es-Souk)- Boudenib. In: *Ressources en Eau du Maroc*, tome 3, Domaines atlasique et sud-atlasique. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, 231, 224-242.
- Direction Régionale de l'Hydraulique du Guir-Rhéris-Ziz (DRH GRZ) 2008a. Etude de synthèse hydrogéologique du bassin crétacé d'Errachidia. *Rapport définitif de la mission 2*, 186-194.
- Direction Régionale de l'Hydraulique du Guir-Rhéris-Ziz (DRH GRZ) 2008b. Elaboration du bilan hydrologique des bassins de Guir, Rhéris, Ziz et Maïder. *Rapport de la mission 1*, 76 p.
- Direction Régionale de l'Hydraulique du Guir-Rhéris-Ziz (DRH GRZ) 2009. Etude de synthèse hydrogéologique du Haut Atlas faisant partie des bassins du Guir, Rhéris et Ziz (provinces d'Errachidia, Ouarzazate et Figuig). *Rapport de la mission 2*, 129 p.
- Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (D.R.P.E) 1996. Etude du plan directeur de l'aménagement des eaux des bassins sud-atlasique. *Mission 1 : Etudes des ressources en eau*. 120 p.
- El Ouali A. 1992. *Contribution du Haut Atlas central au Sud de Midelt à l'alimentation des aquifères profonds du bassin crétacé d'Errachidia*. Thèse Univ. Franche-Comté, France, 234 p.
- Hilali M., Larabi A., Sahbi H. *et al.* 2009. Apport de la géophysique à l'identification des réservoirs aquifères situés dans les zones de haute altitude : cas de la région de Gourrama (Haut Atlas du Maroc). *Communication orale. 4ème congrès maghrébin de Géophysique appliquée*, Bizerte-Tunisie, 150-151.
- Kabiri L. 2003. *Impact des changements climatiques et anthropiques sur les ressources en eau dans l'oasis de Ferkla*. Rapport d'Habilitation de Recherche. Université Moulay Ismail. 26p.
- Kacimi I., Bahaj T., Hilali M. *et al.* 2013. Hydrogéochimie et qualité des eaux dans les bassins subdésertiques marocains (Ziz et Rhéris). *Actes du colloque CFH-AIH-AHSP-AGSO sur « Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources : Quoi de neuf ? Bordeaux-France*, 255-262.
- Kassou N., Bahaj T., Morarech M., *et al.* 2016. Assessment of groundwater chemistry for the Reg Basin (Oriental Anti-Atlas), south-eastern Morocco. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7 (12), 4511-4524.
- Kettani A., Hilali M., Kacimi I. *et al.* 2011. Palmeraie de Maadid (région du Tafilalet au Sud du Maroc) : Problématique des ressources en eau et élaboration d'un système d'information hydrologique et hydrogéologique. *Actes de la conférence internationale sur l'information géospatiale : effets et impacts des changements climatiques en Afrique*, 101-102.

- Margat J. 1952. Le Haut Atlas calcaire – (Hydrogéologie du Maroc-Chap. VI-2). *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 97, 254-262.
- Margat J. 1962. Mémoire explicatif de la carte hydrogéologique au 1/50000 de la plaine du Tafilalet. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 150 bis, 242p.
- Nouayti N., Khattach D. & Hilali M. 2014. Contribution de la géophysique à l'étude de la structure du Haut Bassin de Ziz (Maroc): Implications hydrogéologiques. Communication orale, 41st International Congress *Groundwater: Challenges and strategies*. Marrakech, 15-19.
- Ruhard J.P. 1977. Le bassin quaternaire du Tafilalet. In: Ressources en Eau du Maroc, tome 3, Domaines atlasique et sud-atlasique. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 231, 352-415.
- Strahler A. N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology", *Geological Society of America Bulletin*, 63 (11), 1117–1142

Manuscrit reçu le 30.12.2015
Version révisée acceptée le 25.04.2017
Version finale reçue le 26.05.2017
Mise en ligne le 27.05.2017