

Cartographie des zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines dans le haut bassin du Ziz (Maroc) : Apport de la télédétection et du système d'information géographique

Potential areas mapping for the groundwater storage in the high Ziz basin (Morocco): Contribution of remote sensing and geographic information system

Nordine NOUAYTI^{1*}, Driss KHATTACH¹ & Mohamed HILALI²

1. Université Mohammed Premier, Faculté des Sciences, Laboratoire LGA et COSTE, Avenue Mohammed VI, B.P: 717, Oujda, Maroc *(nordine_svt@hotmail.fr).

2. Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences et Techniques, Equipe de Génie des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Département de Géologie, BP 509, Boutalamine, 52000 Errachidia, Maroc.

Résumé. Dans le haut bassin du Ziz, notamment dans les zones rurales et semi-rurales, l'accès à l'eau potable constitue un facteur primordial dans le développement économique, l'amélioration du niveau de vie des populations et leur stabilisation. Cette étude a pour objectif d'apporter une contribution dans la recherche des zones propices à l'implantation de forages d'eau productifs par une cartographie des zones potentielles de stockage des eaux souterraines. Elle s'est basée sur l'utilisation de la télédétection et du système d'information géographique (SIG) pour couvrir une superficie de 4360 km². Les données relatives à cinq paramètres influençant le stockage des eaux souterraines (la pluviométrie, la lithologie, la fracturation des roches, la pente, le drainage) ont été intégrées dans un modèle empirique qui a été validé par l'utilisation des données de débits des forages et des sources. Les résultats montrent que la zone d'étude est riche en eaux souterraines puisque 60% de sa surface présente un potentiel modéré à élevé pour le stockage des eaux. Le modèle constitue un important outil d'aide à la décision; il permet d'identifier les différentes zones favorables à l'implantation de futurs forages.

Mots-clés: Eaux souterraines, zones de stockage, forage d'eau, Télédétection&SIG, Haut bassin du Ziz, Haut Atlas central-Maroc..

Abstract. In the high Ziz basin, especially in rural and semi-rural areas, access to drinking water is a key factor in economic development, improving the standard of living of populations and their stabilization. The objective of this study is to contribute to the search for areas suitable for the establishment of productive water wells by mapping potential areas for the storage of groundwater. It is based on the use of remote sensing and geographic information system (GIS) to cover the entire area (4360 km²). Data on five parameters influencing groundwater storage (rainfall, lithology, fracture rocks, slope and drainage) have been integrated into an empirical model, which was validated by using outflow data of wells and springs. Results show that the basin is potentially rich in ground water, since 60% of high Ziz basin has moderate to very high potential for groundwater storage. The model constitutes an important decision support tool since it allows identifying the different favorable zone drilling locations.

Keywords: Groundwater, storage areas, water drilling, Remote Sensing & GIS, the high Ziz basin, Central High Atlas-Morocco.

Abridged English version

The arid regions of Morocco, where rainfall is not regular, are suffering from water scarcity. The problem is exacerbated by the excessive exploitation of water resources for agriculture, mining or industrial activities. Access to potable water, especially in rural and semi-rural of the high basin of Ziz (Fig. 1) is a primary factor in economic development, improving the standard of living of populations and their stabilization. Geologically, the Jurassic series form the major part of Mesozoic

terrains of the High Atlas; they are based conformably on the red clastic formations of lower Triassic-Liasic. Their lithology consists essentially of dolomite, limestone, calcareous marl alternations and silico-clastic detritus. The objective of this study is to assess the potential of ground water storage and to contribute in the search for suitable areas for the implementation of productive water points and to allow a good coverage of water needs of the region. In the literature review that was carried out for this study (Tab. 1), it was found that the involved factors in determining potential areas for groundwater storage were different, and this, in turn, affected the

study conclusions, and reveals different levels of satisfaction for the used methods. The majority of these factors are summarized in Table 2. It implies rainfall, rock type, lineaments, slope and drainage. Landsat 7 ETM+ image and a DTM obtained from SRTM allowed us to identify and digitize two factors: lineaments and slope. The integration of these factors in a systematic method (Fig. 2) will result in a map showing potential zones for groundwater storage, with a number of categories. GIS allows the integration of different factors, with the following weights (Fig. 2): rainfall (15%), rock fractures /lineaments (30%), lithology (30%), drainage (10%) and slope (15%).

Data manipulation results

The influencing factors on groundwater storage were determined and digitally mapped as thematic layers. This included rainfall, lithology, rock fractures, slope and drainage. Rainfall availability is the source of water. The resulting map was classified into five major classes (Fig. 3) : >250, 250-200, 200-150, 150-100 and <100mm/year. The map shows that the north areas receive much more water than the south areas. Lithology is a major water-controlling factor since it governs the flow and storage regime. It is represented by the geographic distribution of different rock formations. The data comes from the available 1/200000 geological maps of Midelt (Dubar 1949) and of Rich-Boudnib (Choubert *et al.* 1956). Further modification of those maps was performed after taking account of remote sensing data. In particular, the use of Landsat 7 ETM (pixel size 30 m) satellite images was helpful in this regard; thus, boundaries of many rock formations were corrected. Consequently, an empirical classification of the lithologic formations was carried out; thereafter, a map with five classes was produced to reveal rock formations of similar hydrologic properties (Fig. 4, Tab. 3). Fractures in rocks enhance the permeability and porosity of rocks and then permit surface water to infiltration easily. They are included to identify potential areas for groundwater storage. Fracture systems can be successfully recognized by remote sensing. The lineaments density was expressed by classifying the area into specific frames (1.66 km x 1.66 km, Fig. 5). and the number of lineaments in each frame was counted. The directions of these lineaments are NE-SW to W-E (Fig. 6). The resulting lineaments density map was divided into five classes (Fig. 7). Slope plays a role in increasing water-flow velocity with a subsequent reduction in vertical percolation, and thus affecting recharge processes. The greater slope, the more rapidly surface water will flow and less recharge will result. In this study, the generation of a slope map (Fig. 8) was obtained from a digital elevation model (DEM), which gives a three-dimensional view of the field surface. The classification adopted is the SOTER (SOils and

TERain) model (European Commission 1995, Tab. 4). The rate of surface-water recharge into groundwater is governed also by the characteristics of the drainage system. The resulting drainage density map yielded five drainage classes by following the same approach used in representing the lineament density map. Therefore, each class represents a range number of drainage segments per unit of area, these classes were: <0.3, 0.3-0.6, 0.6-0.9, 0.9-1.2, >1.2 km/km² (Fig. 9).

Model and data validation

We have verified the model by drilling rates. In this context, it should be borne in mind that these factors are geographically dependent. Incorporating these factors into a model will result in an empirical model showing areas of potential groundwater storage (Fig. 10). This model presents 10.1% of the total area (4273.9 km²) corresponds to the zone of very high recharge potential, 20% high potential, 29% moderately potential, 27% and 15% low to very low recharge potential of groundwater in the study area (Fig. 10). Verification by drilling and springs flow rates was performed to validate the model, this can be achieved by comparing the productivity of ground water in dug wells and the resulting model. From the flow of water point we unveiled a good agreement between the different area productivities and flows of water points (Figures 11, 12 and 13). Thus, this empirical model will enable operators to optimize the time and financial resources to carry out works that have much chance to be productive.

Conclusion

The method described is an empirical method using remote sensing and GIS in groundwater exploration, and succeeds in proposing potential sites to dig water wells, since they have the advantage of covering large areas, like the case study of high Ziz basin, within a short time and at least cost. This study presents a method to integrate influencing factors on groundwater storage (rainfall, lithology, fracture rocks, slope and drainage), and thus to reveal the resulting information in map format, showing spatial data for areas with different potential for groundwater storage. It is a new method applied, focusing on the high Ziz basin. A model was produced, indicating potential areas for groundwater storage. The model shows that about 60% of high Ziz basin has moderate to very high potential for groundwater storage, indicating that the high Ziz basin is potentially rich in groundwater. The model was found to be quite satisfactory and could be exploited for the selection of favorable areas to dig water wells. the model is presented as a tool decision-making aid and also a pre-prospecting which can avoid heavy, slow and expensive research phases.

INTRODUCTION

L'exploration des eaux souterraines est devenue un sujet de préoccupation, en particulier dans les zones souffrant d'une pénurie d'eau. Les méthodes classiques appliquées pour les eaux souterraines n'ont pas souvent identifié les domaines prometteurs pour le stockage des eaux souterraines, pris ici dans le sens des réserves renouvelables, liées à l'emmagasinement des aquifères libres ou captifs. À cet égard, la télédétection et les techniques de SIG ont récemment attiré l'attention de nombreux chercheurs. Cet article présente une application au haut bassin du Ziz caractérisé par une pénurie d'eau liée au climat aride et sec avec des faibles précipitations et des hautes températures accompagnées d'une forte évaporation. Par ailleurs, les ressources en eau renouvelables sont souvent limitées devant une demande croissante de cette ressource. Vu l'insuffisance des eaux de surface et des nappes superficielles, la recherche de nouvelles ressources en eau s'est résolument orientée vers les nappes profondes. Cependant, de nombreux forages sont avérés négatifs. L'objectif de cette étude est d'identifier les zones propices à l'implantation des forages par la délimitation des aires favorables

aux stockages des eaux souterraines. Pour ce faire nous avons fait appel aux techniques de télédétection et le système d'information géographique. Cette approche s'est avérée être performante pour couvrir de larges zones, dans un délai court et à moindre coût. Elle a été utilisée par de nombreux auteurs pour la cartographie des zones potentiels de stockage des eaux souterraines (Mashael 2010), des zones favorables à l'implantation des forages à gros débits (Savane 1997, Saley 2003, Jourda 2005, Jourda *et al.* 2006) et pour la reconnaissance des réservoirs discontinus (Savané *et al.* 1997, Kouamé 1999).

Dans le cadre de cette étude nous sommes focalisés sur le haut bassin du Ziz (HBZ) (Fig. 1), situé dans la partie orientale du Haut Atlas central. Le HBZ représente le principal champ de genèse des ressources en eau du haut bassin du Ziz entier, dont dépendent les oasis sud-atlasiques de la vallée moyenne du Ziz et surtout du Tafilalt, et qui sont depuis 1970 régularisées par le barrage Hassan Addakhil. Toute augmentation des prélèvements et consommations d'eau (que ce soit pour l'alimentation en eau potable ou l'irrigation) dans le haut bassin du Ziz sera nécessairement au détriment des oasis en aval.

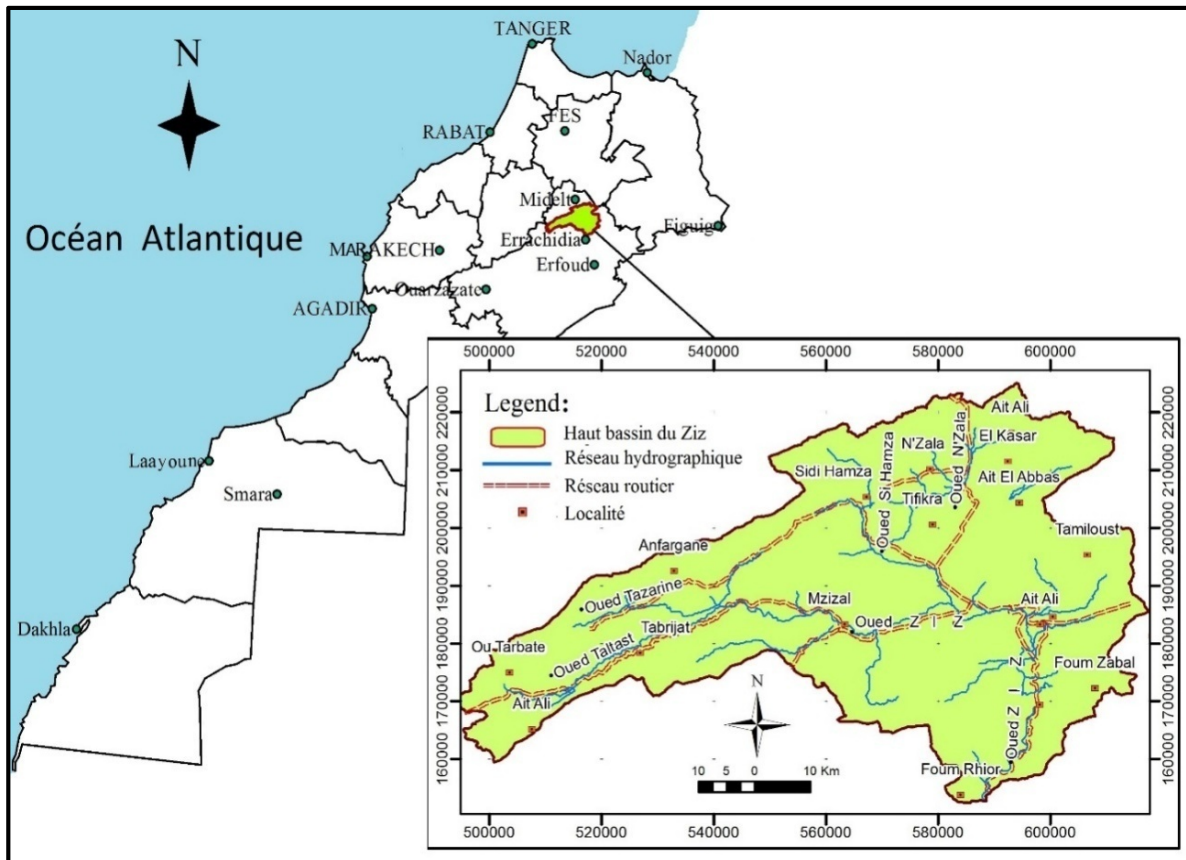


Figure 1: Carte de localisation du haut bassin du Ziz (Projection conique Lambert Nord).

Figure 1: Location map the high Ziz basin (Conical projection Lambert Nord).

Tableau 1. Une sélection des études qui ont utilisé la télédétection pour l'exploration des eaux souterraines (Mashael 2010)(Résultats satisfaisants :la satisfaction est indiquée par les auteurs et dépend de la vérification des résultats, Supposés Résultats : la méthode est proposée mais non confirmée).

Table 1. A selection of studies using remote sensing for groundwater exploration (Mashael 2010) (Satisfaction was indicated by authors depending on the verification of the obtained results, supposed Results: the method is proposed, but not confirmed).

Auteurs et année	Paramètres	Résultats
Meisler 1963	Linéaments	Non satisfaisants
Rauch & Lariccia 1978	Linéaments	Non satisfaisants
Taylor 1980	Linéaments et traces de fractures	Non satisfaisants
El-Shazly <i>et al.</i> 1983	Caractéristiques géomorphologiques, couverture des sols, végétation et unités géologiques	Supposés
Seelan 1983	Lithologie, morphologie, sol et utilisation des terres	Non satisfaisants
Salman 1983	Caractéristiques de drainage	Hypothèse
Ahmed <i>et al.</i> 1984	Linéaments et intensité de drainage	Hypothèse
El-Baz 1992	Topographie, linéaments et drainage	Satisfaisants
Gustafsson 1994	Linéaments et végétation	Satisfaisants
Teeuw 1995	Linéaments	Satisfaisants
Sander <i>et al.</i> 1996	Végétation, drainage, lithologie et linéaments	Satisfaisants
Savane <i>et al.</i> 1996	Lithologie et linéaments	Satisfaisants
Edet <i>et al.</i> 1998	Lithologie et linéaments	Satisfaisants
Robinson <i>et al.</i> 1999	Drainage et linéaments	Supposés
Das 2000	Géologie, géomorphologie, sols, couverture terrestre / utilisation des terres et linéaments	Supposés
Bilal & Ammar 2002	Linéaments, drainage et lithologie	Satisfaisants
Sener <i>et al.</i> 2005	Géologie, linéaments, utilisation des terres	Satisfaisants
Kumar <i>et al.</i> 2007	Géomorphologie, géologie, fractures, pente	Satisfaisants
Ganapuram <i>et al.</i> 2008	Morphologie, structures géologiques, drainage, pente, couverture terrestre / utilisation	Supposés

Tableau 2. Les facteurs majeurs influençant le stockage de l'eau souterraine.

Table 2. Major factors influencing groundwater storage.

Facteur influençant	Élément influençant	Élément de commande
Pluie	Taux de précipitation	Eau tant que source
Lithologie	Type de roche	Perméabilité à l'eau
Fracture des roches	Systèmes de fractures	
Pente		Energie d'écoulement d'eau
Drainage	Densité	Perméabilité à l'eau et débit

APERÇU GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Sur le plan géologique, des séries jurassiques carbonatées reposent en concordance sur les formations détritiques rouges du Trias-Lias inférieur. Leur nature lithologique est essentiellement constituée par des dolomies, des calcaires, des alternances marno-calcaires et des dépôts détritiques silico-clastiques (Chafiki *et al.* 2007, Charrière 1990, Hinaje 1995, Sadki *et al.* 1999).

Sur le plan hydrogéologique, le haut bassin du Ziz renferme un ensemble d'unités hydrogéologiques souvent communicantes entre elles : Lias, Aalénien et Dogger (Nouayti *et al.* 2015b). Ces aquifères donnent naissance à plusieurs sources telles que Sidi Hamza et Moulay Ali Cherif. Les valeurs de la conductivité électrique oscillaient entre 358,88 et 10897,79 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Nouayti *et al.* 2015a). Le sens d'écoulement des

eaux souterraines se font de l'Ouest vers l'Est dans la partie occidentale et du nord vers le sud dans la partie orientale (Nouayti *et al.* 2016). L'objectif de cette étude est d'élaborer un modèle qui présente les zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines au niveau du haut bassin du Ziz.

DONNEES ET METHODES

Différents facteurs sont impliqués dans la détermination des domaines potentiels pour le stockage des eaux souterraines. Mashael (2010) a procédé à la synthèse de plusieurs travaux en indiquant la qualité des résultats obtenu selon les paramètres utilisés (Tab. 1). Cet auteur considère que les facteurs majeurs influençant le stockage de l'eau souterraine sont (Tab. 2): (1) les précipitations en tant que source d'eau; (2) le type de roches pour lequel le

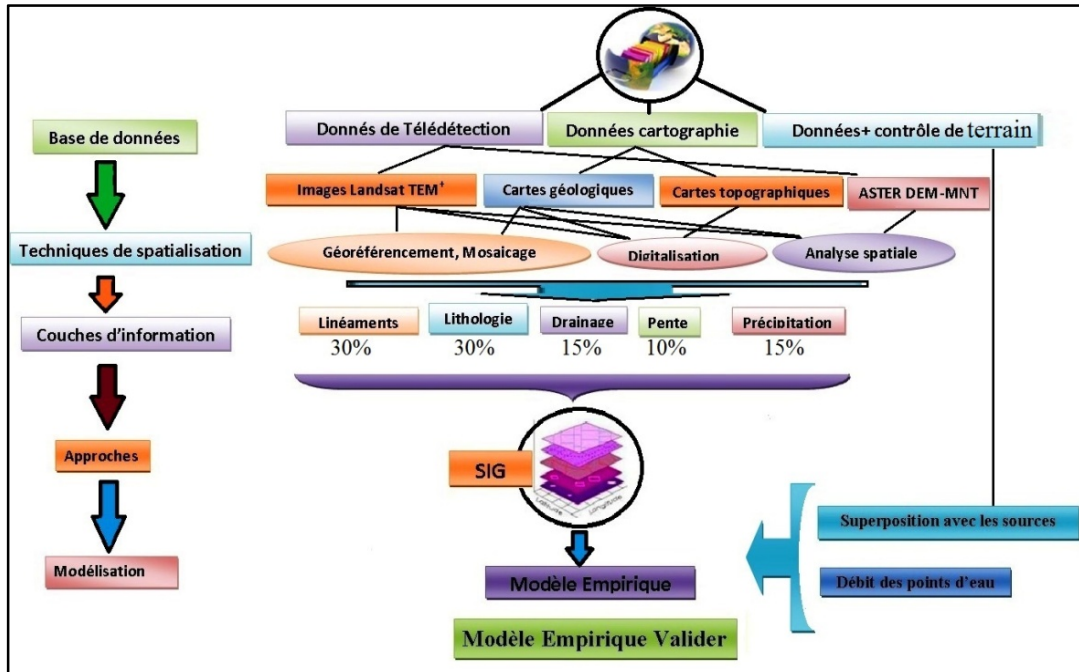


Figure 2. Organigramme de la méthodologie adoptée pour le Modèle empirique.
 Figure 2. Organizational methodology adopted for empirical Model.

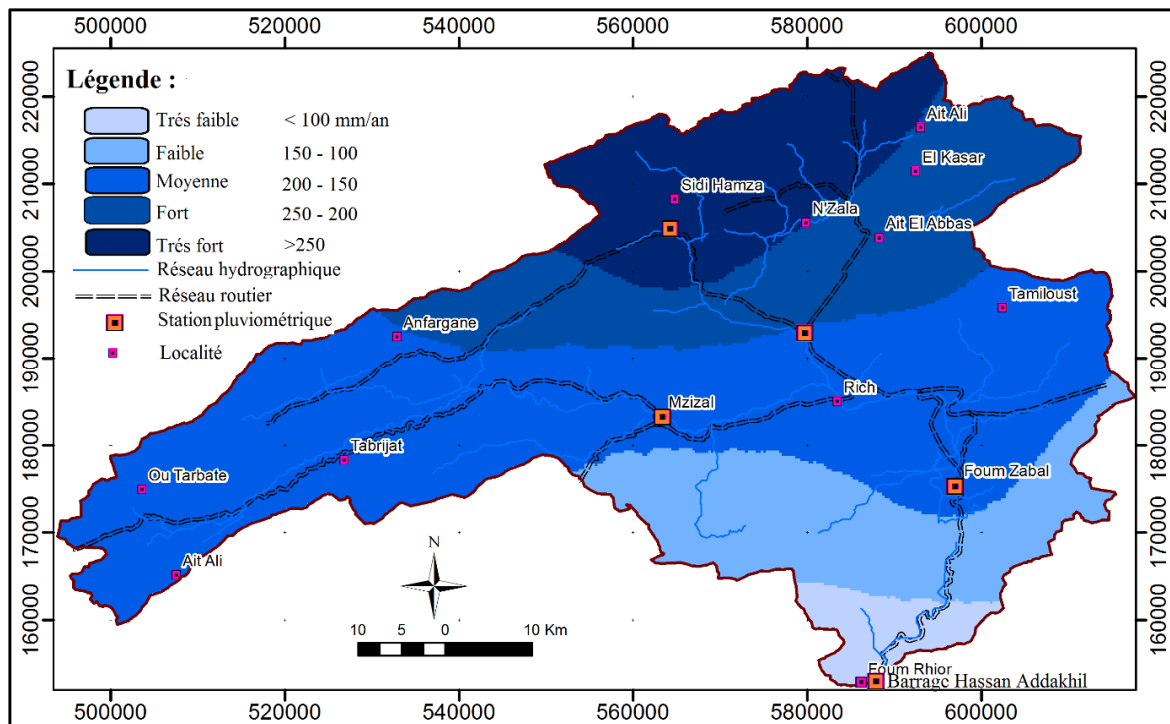


Figure 3. Carte des classes des pluies dans le haut bassin du Ziz.
 Figure 3. Rainfall map classes of the high Ziz basin.

caractère lithologique régit le débit et le régime de stockage; (3) la fracturation qui augmente la perméabilité et la porosité des roches ce qui facilite l'infiltration des eaux de surface; (4) la pente est un autre facteur d'influence, elle contrôle le débit d'eau et son énergie; (5) les caractéristiques du drainage ont

également un rôle dans la distribution des eaux de ruissellement et donnent une indication sur le régime de l'infiltration. L'intégration de ces facteurs dans un modèle se traduira par un modèle empirique montrant les zones de potentiel de stockage des eaux souterraines, avec un certain nombre de catégories.

Tableau 3. Classes lithologiques du haut bassin du Ziz en fonction de leur potentiel pour le stockage des eaux souterraines.
 Table 3. Lithological classes in the high Ziz basin based on their potential for groundwater storage.

Groupe géologique majeur	Type de roche	Potentialité pour le stockage des eaux souterraines
Quaternaire	Eboulis, cônes de déjection, alluvions, conglomérat dolomitique	Elevée
Bajocien-Bathoien	Marno-calcaires à dominance calcaire	Modérée
Aalénien	Marno-calcaires à dominance calcaire	Très élevée
Trias	Roches magmatiques	Faible
Toarcien	Marno-calcaires à dominance marneuse	Très faible
Domérien	Marno-calcaires à dominance calcaire	Très élevée

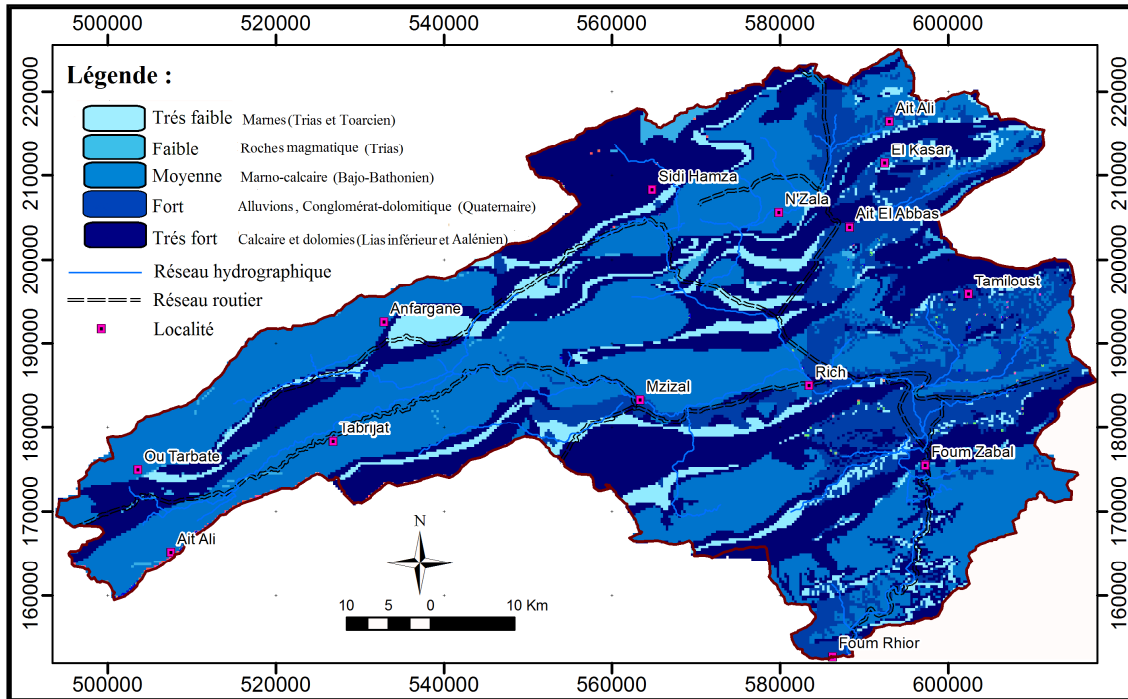


Figure 4. Carte des classes de la lithologie dans le haut bassin du Ziz.

Figure 4. Map of lithology classes in the high Ziz basin.

Dans cette étude nous avons adopté la démarche présentée dans l'organigramme de la figure 2. Nous avons considéré que les deux facteurs linéaments et lithologie sont des paramètres prépondérants en leur attribuant un poids de 30% chacun. Les poids affectés aux trois autres facteurs, Précipitations, Drainage et Pente, sont respectivement de 15%, 15% et 10%.

LES DONNEES DU MODELE

Pluies

La répartition géographique et l'intensité des précipitations dans le haut bassin du Ziz ont été analysées en appliquant la méthode des isohyètes. Les données pluviométriques ont été acquises à partir des enregistrements fournis par l'agence du bassin hydraulique du Guir-Ziz-Rheris. La carte obtenue a été classée en cinq grandes catégories (Fig. 3) : >250, 250-200, 200-150, 150-100 et <100 mm / an. La carte montre que la pluviométrie varie de 120 à plus de 250 mm. Elle augmente du sud vers le nord.

Lithologie

La lithologie, comme un facteur majeur contrôlant le stockage des eaux, est représentée par la répartition géographique des différentes formations rocheuses. Elle a été extraite des cartes géologiques disponibles: Carte géologique de Midelt au 1/200.000 (Dubar 1949) et carte géologique de Rich et Boudnib au 1/200.000 (Choubert *et al.* 1956). Une classification supervisée des formations lithologiques a été réalisée à partir des images satellite ETM+. Une carte avec cinq classes de formations rocheuses ayant des propriétés hydrologiques similaires a été produite (Fig. 4, Tab. 3). La carte de la lithologie classée en cinq classes a été utilisée comme l'une des couches SIG.

La fracturation

Linéaments

Les fractures dans les roches augmentent la perméabilité et la porosité secondaire et, par

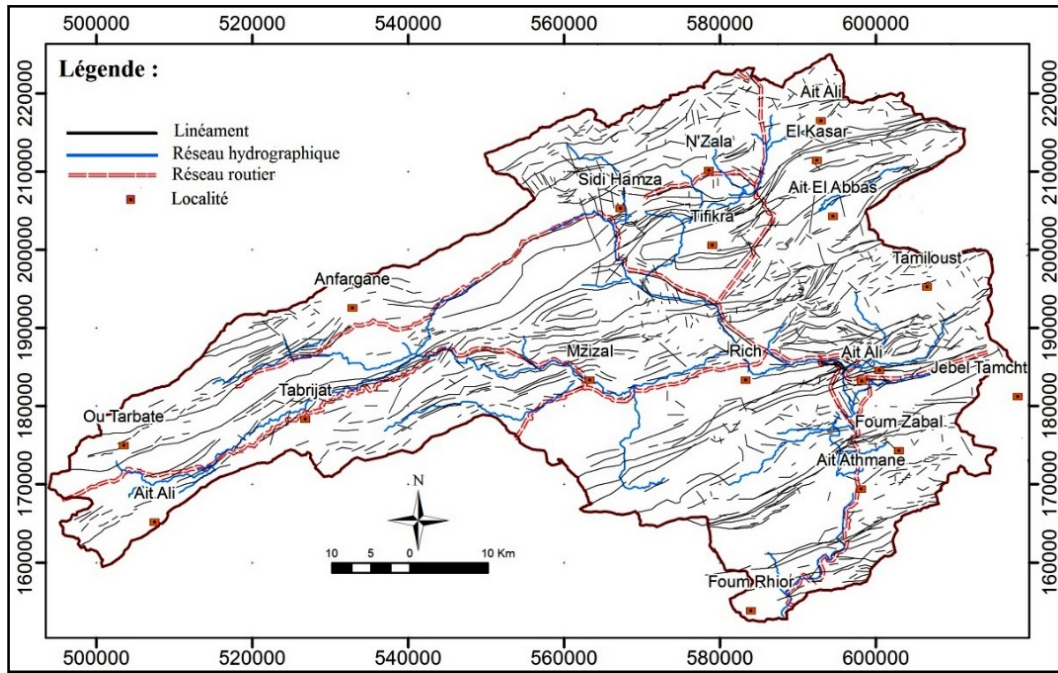


Figure 5. Carte des linéaments du haut bassin du Ziz.
 Figure 5. Lineaments map of the high Ziz basin.

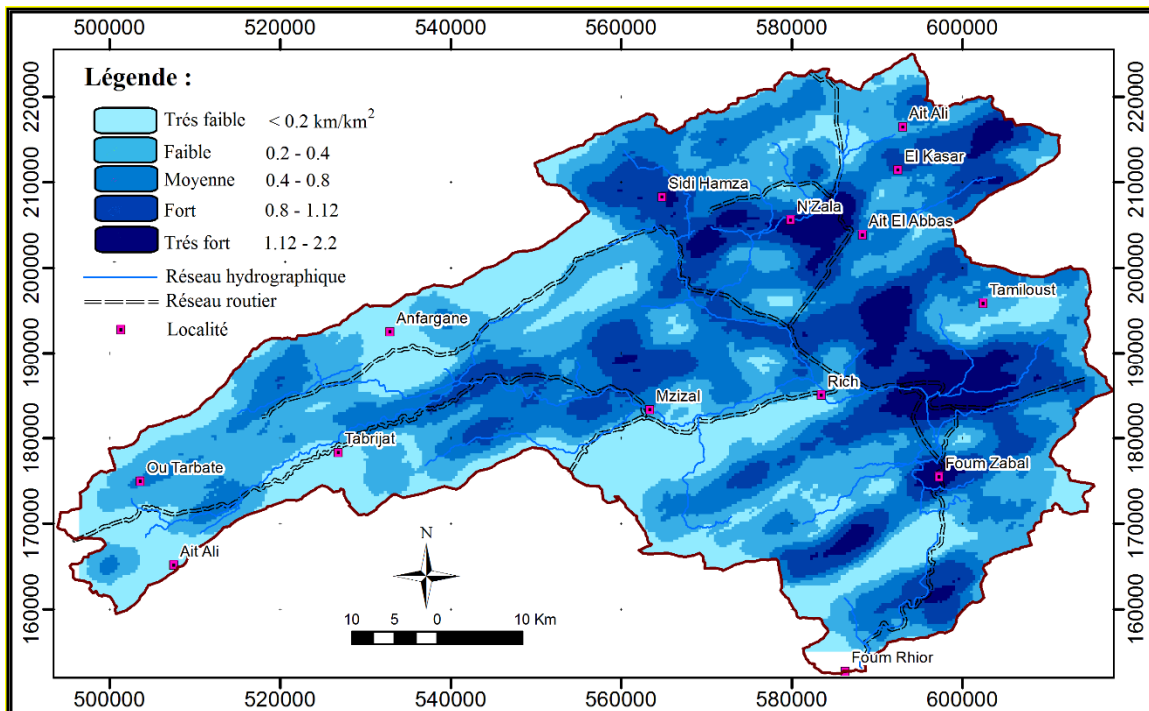


Figure 6. Carte des classes de densité des linéaments Km/Km².
 Figure 6. Map of lineament density classes Km/Km².

conséquent, augmentent le flux vertical de l'eau. Pour cette raison, les fractures dans les roches ont été considérées comme un facteur majeur, puis inclus dans l'identification des domaines potentiels pour le stockage des eaux souterraines. Les systèmes de fractures peuvent être détectés par la télédétection

avec succès. Toutefois, les systèmes existants sont des fractures observées comme des éléments linéaires sur des images satellite, d'où, ces caractéristiques sont indiquées comme "linéaments". Habituellement, un linéament est défini comme toute caractéristique observable linéaire géomorphologique qui peut être

attribuée à des structures géologiques, notamment des fractures ou des contacts lithologiques (O'Leary *et al.* 1976). Les éléments linéaires non géologiques détectés à partir d'images satellite Landsat ETM+ doivent être éliminés. La figure 5 présente la carte des linéaments géologiques ; la majorité des linéaments correspond à des structures géologiques connues (Teixell *et al.* 2003, Benammi *et al.* 2001, El Kochri & Chorowicz 1996, Piqué *et al.* 2000, Sadki *et al.* 1999). La grande densité des linéaments indique une haute perméabilité et porosité dans les roches et vice versa.

Densité des linéaments

La carte de la densité des linéaments (Fig. 6) a été produite en adoptant une maille de 1,66 km x 1,66km. Cette carte constituée de cinq classes (très faible,

Tableau 4. Classification de la pente selon le modèle SOTER.
Table 4. Classification of the slope from the SOTER model.

Pente (%)	Description	Potentialité pour le stockage des eaux
<2	Plat	Très élevée
2-8	Vallonné	Elevée
8-15	Roulant	Modérée
15-30	Peu raide	Faible
>30	Raide	Très faible

faible, moyenne, forte et très forte) a révélé que :

- La densité du réseau des failles à l'échelle de la région épouse parfaitement l'organisation des structures géologiques majeures selon une orientation atlasique ;
- La superposition de cette carte avec les cartes géologiques montre que les formations jurassiques sont celles qui présentent la forte densité, ce sont ces formations qui occupent les cœurs des anticlinaux souvent associés à des failles inverses ou chevauchantes ;
- les cœurs des synclinaux sont à faible densité, ce sont des formations en général peu rigides où les structures cassantes sont difficiles à mettre en évidence à partir des images satellitaires, d'ailleurs ce sont en général des fonds plats souvent occupés par des terrains plus récents (Quaternaire).

Analyse statistique et directionnelle

L'analyse statistique des linéaments (Fig. 7) permet de mieux comprendre la géométrie du réseau des linéaments et l'identification des principales directions au niveau de la région. Nous avons utilisé la méthode des rosaces directionnelles en longueurs cumulées par classes de 10 degrés. A l'échelle de la zone d'étude, le diagramme des rosaces montre que les directions dominantes sont d'orientation NE-SW à E-W conformes aux directions atlasiques majeures de cette partie du Haut Atlas.

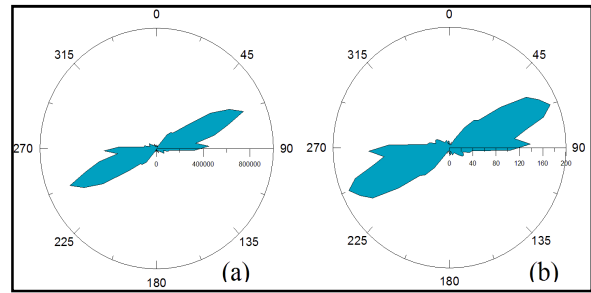


Figure 7. Rosaces directionnelles(a : longueur totale, b : fréquences).

Figure 7. The directional rosettes (a: total length, b: frequencies).

Pente

Ce facteur joue un rôle dans l'augmentation de la vitesse de l'écoulement de l'eau avec une réduction subséquente de la percolation verticale et ainsi dans l'affectation du processus de la recharge. Plus la pente est forte, plus l'eau de surface circule rapidement et moins la nappe se recharge. Dans cette étude, la génération d'une carte des pentes (Fig. 8) a été obtenue à partir d'un modèle d'élévation numérique (DEM), qui donne une vue tridimensionnelle de la surface du terrain. Le DEM a été obtenu en utilisant des données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) avec une résolution de 30m. La classification s'est basée sur le modèle SOTER (European Commission Soil Terrain Database 1995), (Tab. 4).

Drainage

Le taux de recharge des aquifères par les eaux de surface est régi également par les caractéristiques du système de drainage. Par conséquent, le drainage est souvent impliqué dans des études similaires, et parfois il est intégré avec les linéaments pour proposer des domaines potentiels pour le stockage des eaux souterraines (Edet *et al.* 1998, Robinson *et al.* 1999). Plus le système de drainage est dense plus le taux de recharge est élevé. Pour le haut bassin du Ziz, les caractéristiques de drainage ont été extraites directement à partir des cartes topographiques (échelle 1/50.000) et SRTM.

Cinq classes de drainage ont été définies (Fig. 9) : <0.3, 0.3-0.6, 0.6-0.9, 0.9-1.2, >1.2 km/km², avec >1.2 représentant le plus fort potentiel de stockage des eaux souterraines.

MODELE EMPIRIQUE

Le modèle empirique (Fig. 10) est obtenu après la superposition et l'intégration des paramètres qui influencent le stockage des eaux souterraines dans la région grâce au SIG, à savoir, la pluviométrie, la lithologie, la fracturation des roches, la pente et le drainage.

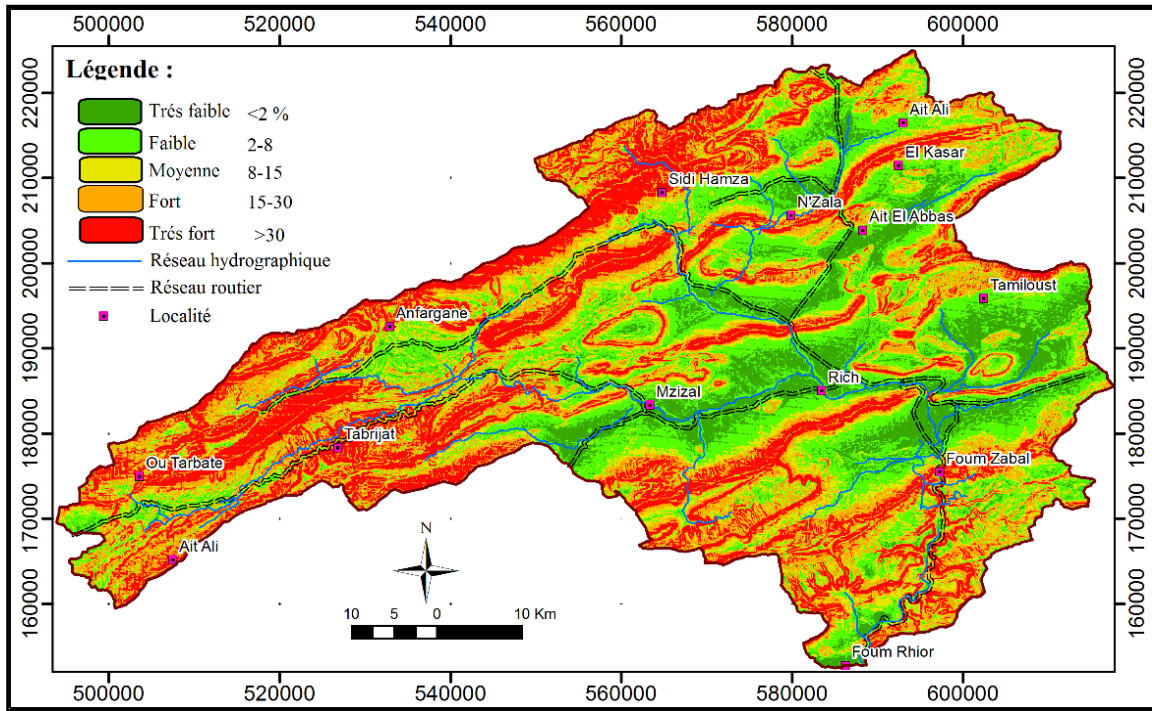


Figure 8. Carte des classes de pente.

Figure 8. Slope map classes.

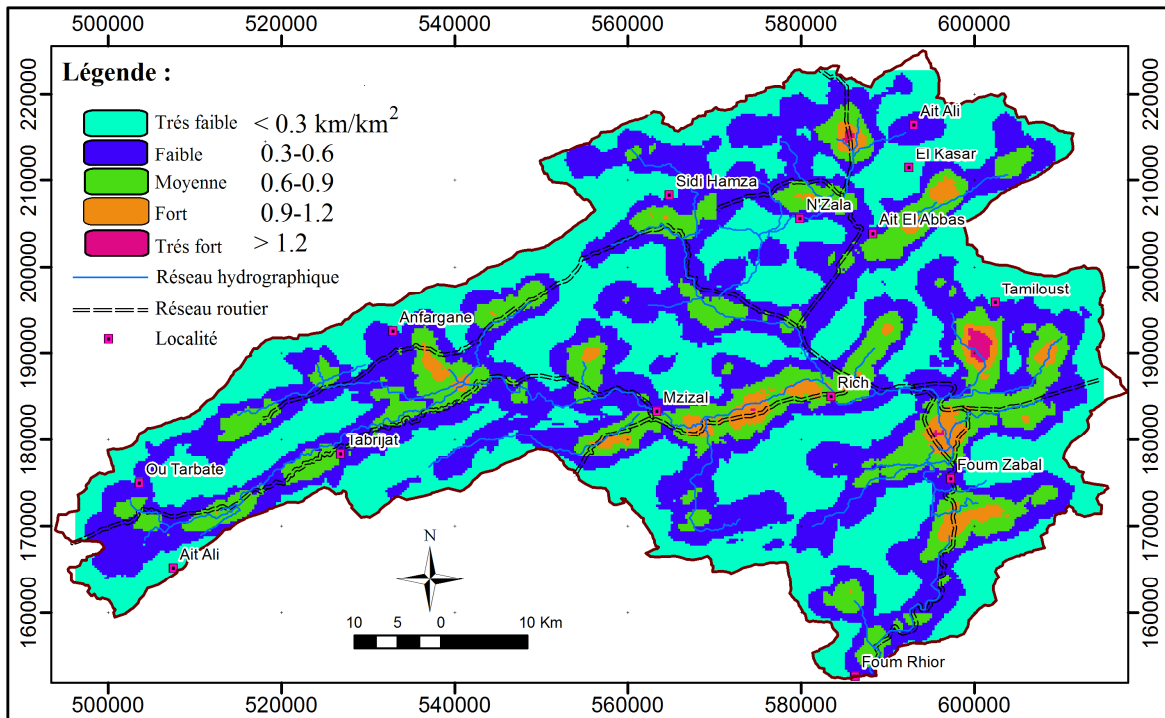


Figure 9. Carte des classes de densité de drainage Km/km².

Figure 9. The map of drainage density classes Km / km².

Le modèle obtenu révèle que 10.1% de la superficie totale (4360 Km²) correspond à la zone du potentiel de recharge le plus élevé, 20% haute potentialité, 29% modérément potentielle, 27% et

15% faible à très faible potentiel. La superficie des surfaces à potentiel modéré à très élevée représente environ 60% de la superficie totale ; ce qui indique que le haut bassin du Ziz est potentiellement riche en

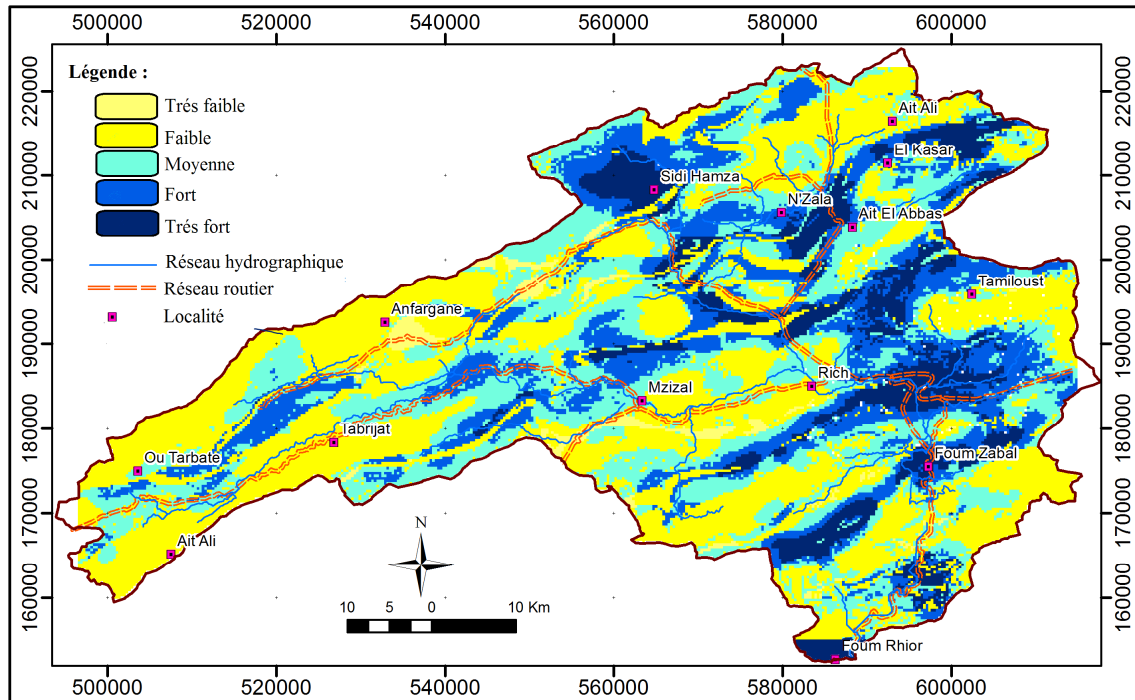


Figure 10. Modèle Empirique montrant les domaines potentiels pour stockage des eaux souterraines.

Figure 10. Empirical Model showing groundwater potential zones of the study area.

eaux souterraines. Cependant, la fiabilité des résultats doit être étudiée afin de valider le modèle élaboré.

La validation du modèle

La démarche de validation du modèle empirique s'est basée sur les débits des points d'eaux (156 puits et forages) et des sources (7 sources). Ces derniers ont été répartis en cinq classes en fonction de leurs débits (Figures 12, 13). A l'exception d'une source, les débits des sources sont en bonne concordance avec les classes des potentialités hydriques. En effet, les sources ayant des débits supérieurs à 5l/s se situent au niveau des zones à très fort potentiel alors que les sources à faibles débits se localisent au niveau des zones à faible potentiel. Pour les forages, nous constatons que (Fig. 11):

- 74% des points à très forts débits se situent dans les zones de fort à très fort potentiel ;
- 44% des points à forts débits se situent dans les zones de fort à très fort potentiel ;
- 79% des points à faibles débits se situent dans les zones de faible à moyen potentiel ;

96% des points à très faibles débits se situent dans les zones de faible à moyen potentiel. En se basant sur le test de validation par les débits des sources et des forages on peut conclure que le modèle élaboré est assez satisfaisant.

Cette étude montre que les sources les plus productives se situent dans des zones très hautes et

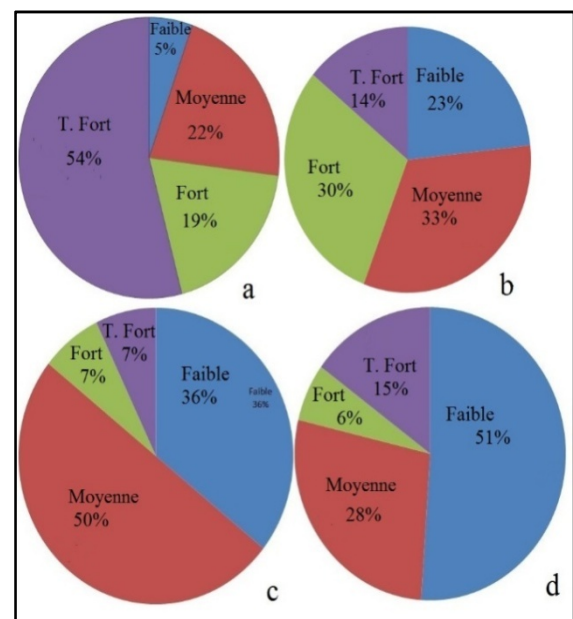


Figure 11. Diagrammes montrant la situation des points d'eau dans le Modèle; a) Points d'eau avec débit très fort; b) Points d'eau avec débit fort; c) Points d'eau avec débit moyen; d) Points d'eau avec débit faible.

Figure 11. Diagram showing the situation of water points in the Model; a) Water points with very high outflow; b) Water points with high outflow; c) Water points with medium outflow; d) Water points with Low outflow.

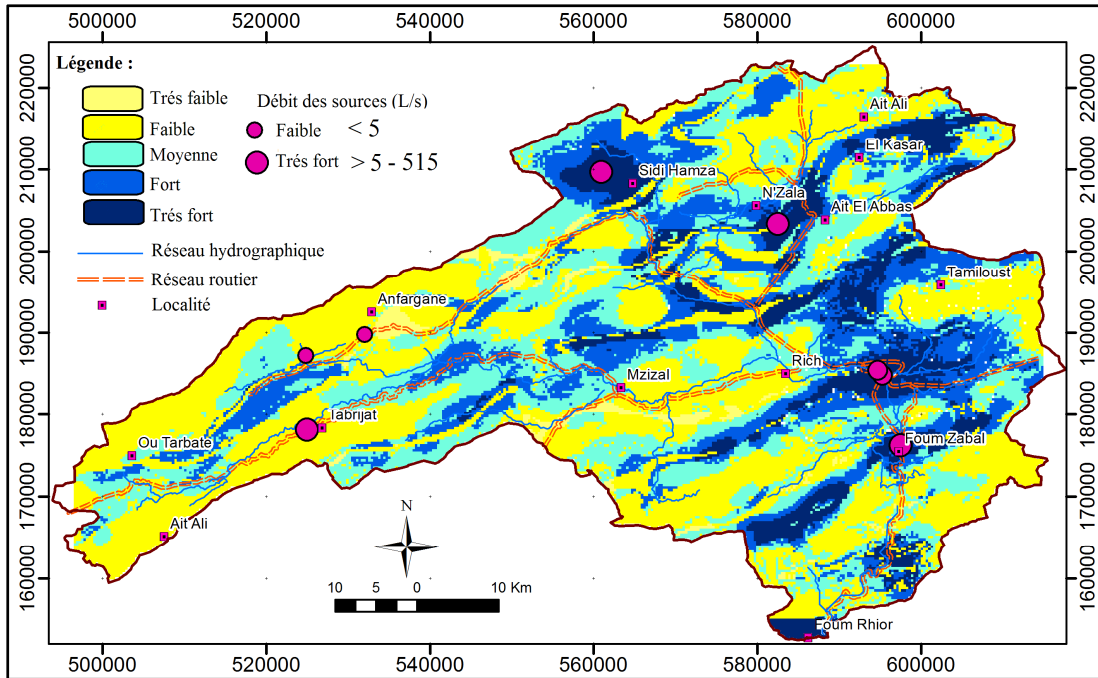


Figure 12. Situation des sources avec leur productivité dans le modèle potentiel de stockage des eaux souterraines.
 Figure 12. Location of springs and their productivity in the potential model of groundwater storages.

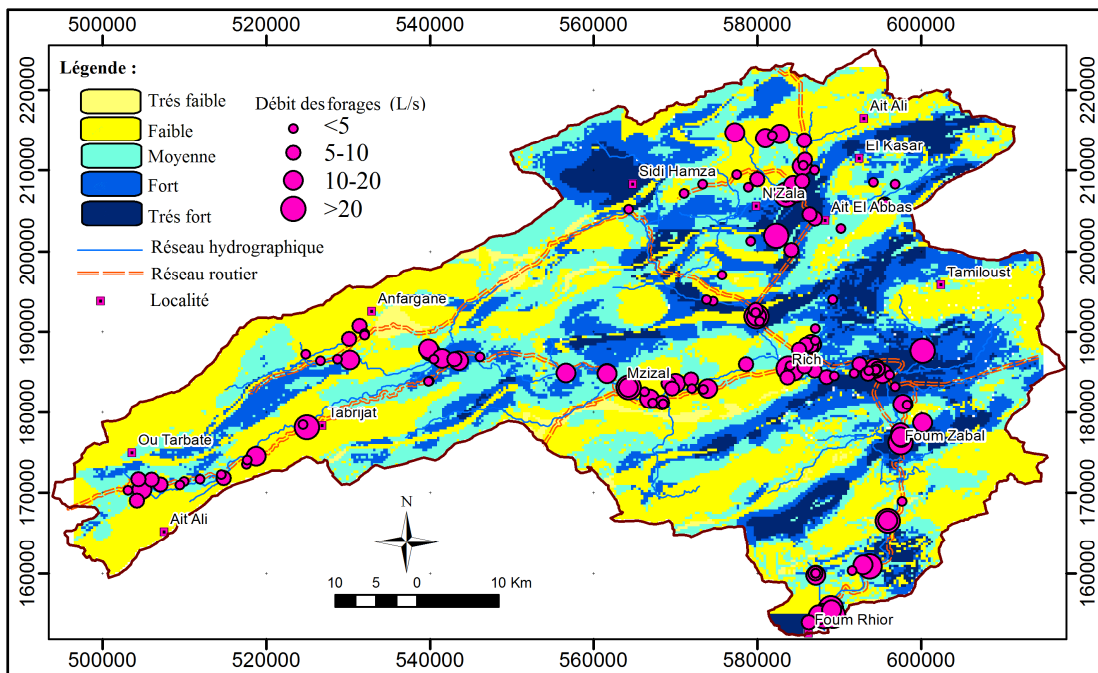


Figure 13. Situation des forages et de leur productivité dans le modèle potentiel de stockage des eaux souterraines.
 Figure 13. Location of boreholes and their productivity in the potential model storages of groundwaters.

à fortes pentes. Ce qui fait, il y a problème d'accès à ces sources par la population qui sont obligées de se servir des sources des zones relativement basses. C'est le rôle des autorités locales et la société civile pour renforcer les infrastructures (piste, etc.) et faciliter l'accès à ces ressources.

CONCLUSION

Un modèle empirique de recharge pour le haut bassin du Ziz a été élaboré et validé par l'utilisation des débits des points d'eau. Dans l'ensemble, il existe une bonne concordance entre les forages et les

sources à forts débits et les classes à fort potentiel de stockage des eaux.

La superficie des surfaces à potentiel modéré à très élevé représente environ 60% de la superficie totale ; ce qui indique que le haut bassin du Ziz est potentiellement riche en eaux souterraines. Le modèle a été jugé assez satisfaisant et peut être exploité pour le choix des zones favorables à l'implantation de forages. Il présente de nombreux atouts, car il apporte une contribution incontestable à la gestion des ressources en eau. Il se présente comme un outil d'aide à la décision et constitue aussi une pré-prospection qui peut éviter des phases de recherches lourdes, lentes et coûteuses. Par ailleurs, une gestion équilibrée et concertée amont/aval du haut bassin du Ziz entier serait à concevoir et à mettre en œuvre, sous l'autorité de l'Agence du Bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhénis.

Le présent modèle est un système évolutif qui peut être amélioré par l'intégration de nouvelles données plus précises et plus représentatives comme la perméabilité et la "transmissivité".

REMERCIEMENTS

Les évaluateurs anonymes sont remerciés pour leurs commentaires et suggestions.

REFERENCES

- Ahmed F., Andrawis A. & Hagz Y. 1984. Landsat model for groundwater exploration in the Nuba Mountains, Sudan. *Advances in Space Research*, 4, 11, 123-131.
- Benammi M., El Arbi T. & Chakiri S. 2001. Les chevauchements frontaux du Haut Atlas central marocain : styles structuraux et taux de raccourcissement différentiel entre les versants nord et sud. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, 333, 241-247.
- Bilal A. & Ammar O. 2002. Rainfall water management using satellite imagery: examples from Syria. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 2, 207-219.
- Chafiki D., El Hariri A., Souhel A. *et al.* 2007. Données lithostratigraphiques et bio-stratigraphiques sur le Lias dans le cadre de deux transects du Haut Atlas central (Beni Mellal et Midelt-Errachidia, Maroc). *Journal of African Earth Sciences*, v 49, 90-102.
- Charrière A. 1990. *Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinental : le Moyen Atlas au S de Fès (Maroc)*. Thèse Doctorat d'Etat, Toulouse, 589p.
- Choubert G., Dubar G. & Hindermeyer J. 1956. Carte géologique du Haut Atlas au nord Ksares Souk et de Boudnib: Feuilles Riche et Boudnib au 1/200 000. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, n°81.
- Das D. 2000. GIS application in hydrogeological studies. <http://www.gisdevelopment.net/application/nrm/water/overview/wato0003.htm>.
- Dubar G. 1949. Carte géologique provisoire du Haut Atlas de Midelt au 1/200 000. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, n°59bis.
- Edet A., Okereke S., Teme C. *et al.* 1998. Application of remote sensing data to groundwater exploration: a case study of the Cross River State, south eastern Nigeria. *Hydrogeological Journal*, 6, 3, 394-404.
- El-Baz F. 1992. Preliminary observations of environmental damage due to the Gulf war. *Natural Resources Forum* 16, 1, 71-75.
- El Kochri A. & Chorowicz J. 1996. Oblique extension in the Jurassic trough of the central and eastern High Atlas (Morocco). *Canadian Journal of Earth Science*, 33, 84-92.
- El Moorjani Z. 2003. *Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc)*. Thèse de doctorat, Université de Genève. Terre et Environnement, 300p.
- El-Shazly M., El Raikaiby M. & El Kassas A. 1983. Groundwater investigation of Wadi Araba area, Eastern Desert of Egypt, using Landsat imagery. *Proceeding 17th Symposium on Remote Sensing of the Environment*. Ann Arbor, Michigan, Harwood, New York, 1003-1113.
- European Commission Soil terrain database. 1995. Land Management & Natural Hazards Unit. *IES and JRC, European Commission*, Brussels. <http://eu soils.jrc.ec.europa.eu/projects/SOTER/SoterModel.html>.
- Fetter C. 1994. Applied hydrogeology, 3rd ed. *Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ*, 680p.
- Ganapuram S., Kumar G., Krishna I. *et al.* 2008. Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing and GIS. *Advances in Engineering Software*, 40 (7), 506-518.
- Gustafsson P. 1994. SPOT satellite data for exploration of fractured aquifers in a semi-arid area in Botswana. *Hydrogeological Journal*, 2, 2, 9-18.
- Hinaje S. 1995. *Apport de l'analyse de la tectonique cassante tardi et post-panafricaine à la modélisation de la mise en place des minéralisations dans la boutonnière de Bou-Azzer (Anti-Atlas, Maroc)*. Thèse de 3ème cycle, Faculté des Sciences, Rabat, 238p.
- Jourda P. 2005. *Méthodologie d'application des techniques de Télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, 430p.
- Jourda P., Saley M., Djagoua E. *et al.* 2006. Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : Approche par analyse multicritère et test de validation. *Revue Internationale de Télédétection*, vol. 5, 4, 339-357.
- Kouamé K. 1999. *Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitaires et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydro-géologique*. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université de Cocody, 250p.
- Kouamé K. 2007. *Contribution à la gestion intégrée des ressources en eaux (GIRE) du district d'Abidjan (Sud*

- de la Côte d'Ivoire*) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution. Thèse unique de doctorat, Université de Cocody, 225p.
- Kumar P., Gopinath G. & Seralathan O. 2007. Application of remote sensing and GIS for the demarcation of groundwater potential areas of a river basin in Kerala, southwest coast of India. *International Journal of Remote Sensing*, 28(24), 5583-5601.
- Mashaal A. 2010. Mapping potential areas for groundwater storage in Wadi Aurnah Basin, western Arabian Peninsula, using remote sensing and geographic information system techniques. *Hydrogeology Journal* 18, 1481-1495.
- Meisler H. 1963. Hydrogeology of the carbonate rocks of the Lebanon Valley. 4th Series Groundwater Report, W17, *Pennsylvania Geological Survey*, Harrisburg, PA, p 81.
- Nouayti N., Khattach D. & Hilali M. 2015a. Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco). *Journal of Materials and Environmental Science*, 6, 4, 1068-1081.
- Nouayti N., Khattach D. & Hilali M. 2015b. Contribution of the 3D Geological Model to the Study of the High Basin Ziz Jurassic Aquifers Structure (Central High Atlas, Morocco). *Journal of Geographic Information System*, 7, 294-300.
- Nouayti N., Khattach D., Hilali M. *et al.* 2016. Assessment of metal contamination in Jurassic water tables of Ziz high basin (Central High Atlas, Morocco). *Journal of Materials and Environmental Science*, 7, 5, 1495-1503.
- O'Leary D., Friedman J. & Poh H. 1976. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, 87, 1463-1469.
- Piqué A., Charroud M., Laville E. *et al.* 2000. The Tethys southern margin in Morocco: Mesozoic and Cainozoic evolution of the Atlas domain. *Mémoires du Muséum National d'Histoire Naturelle*, 182, 93-106.
- Rauch H. & Lariccia M. 1978. Water well yield related to lineaments in carbonates and shale of Hagerstown Valley, Maryland. *Transactions-American Geophysical Union*, 59 (4), 1-208.
- Robinson C., El-Baz F. & Singhory V. 1999. Subsurface imaging by RADARSAT: comparison with Landsat TM data and implications for groundwater in the Selima area, northwestern Sudan. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25, 3, 268-277.
- Sadki D., Elmi S., & Amhoud H. 1999. Les formations jurassiques du Haut Atlas central marocain : corrélation et évolution géodynamique. *Colloque National sur le Jurassique Marocain*, 122-123.
- Saley M. B. 2003. *Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuité pseudo-image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)*. Thèse unique de doctorat, université de Cocody, 209p.
- Salman A. 1983. Using Landsat image interpretation prospection around Qena providence, Egypt. *International Journal of Remote Sensing*, 4, 1497-1489.
- Sander P., Chesley M., Minor T. 1996. Groundwater assessment using remote sensing and GIS in a rural groundwater project in Ghana: lessons learned. *Hydrogeology Journal*, 4(3), 78-93.
- Seelan K. 1983. Satellite data in aid of groundwater exploration: a case study from Karnataka, India. *Int. Conf. on Groundwater and Management*, Sydney, 169-173.
- Savane I. 1997. *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale*. Thèse d'Etat, Université de Cocody, 396p.
- Savané I., Gozé B. & Biemi J. 1997. Évaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données LANDSAT (bassin d'Odienné, Côte d'Ivoire). *Actes de l'Atelier international sur la télédétection et la gestion des ressources en eau*, Éd. FAO, Rome, 144-156.
- Savane I., Goze B. & Gwyn H. 1996. Etude cartographique et structurale à l'aide des données Landsat de la région d'Odienné. Cartographic and structural study using Landsat in the Ivory Coast. In: *Proceedings of the 26th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Vancouver, BC, 92-97.
- Sener E., Davraz A. & Ozcelik M. 2005. An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: a case study in Burdur. Turkey. *Hydrogeological Journal*, 13, 5, 826-834.
- Taylor L. 1980. Fracture traces and water wells: a review. *Pennsylvania Geology*, 11(3), 2-4.
- Teeuw R. 1995. Groundwater exploration using remote sensing and a low-cost geographic information system. *Hydrogeological Journal*, 3, 3, 21-30.
- Teixell A., Luisa, M. A., Julivert M. *et al.* 2003. Tectonic shortening and topography in the central High Atlas (Morocco). *Tectonics*, 22, 5, 1051.

Manuscrit reçu le 24/06/2016

Version révisée acceptée le 21/09/2017

Version finale reçue le 09/11/2017

Mise en ligne le 20/11/2017