

Développement d'un sih pour l'amélioration des connaissances techniques sur le réservoir et le fonctionnement hydrodynamique de la nappe de Rmel (Maroc)
Development of HIS to improve technical knowledge on the reservoir and hydrodynamic functioning of the Rmel aquifer (Morocco)

Mohamed Jalal El Hamidi, Abdelkader Larabi, Mohamed Faouzi and Rachid Essafi

Volume 32, Number 2, 2019

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1065204ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1065204ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

El Hamidi, M. J., Larabi, A., Faouzi, M. & Essafi, R. (2019). Développement d'un sih pour l'amélioration des connaissances techniques sur le réservoir et le fonctionnement hydrodynamique de la nappe de Rmel (Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 32(2), 147-162.
<https://doi.org/10.7202/1065204ar>

Article abstract

The majority of urban and rural centres of Low-Loukkos basin (Northern Morocco) are generally located on the coast and coastal plains. Due to demographic and agricultural development, increase in water demand has led to pressure on groundwater resources. This situation has caused significant drops in groundwater level and may eventually lead to a deficit in the water balance of the aquifer, as well as a degradation of the freshwater quality by seawater intrusion. The study area of Rmel-Ouled Ogbane aquifers covers approximately 305 km² and is located in Low-Loukkos basin to the south of the city of Larache. In order to improve the characterization of the aquifers, we chose to organize all data in standard formats stored in a digital HIS (Hydrogeological Information System) database. This HIS database presents a varied menu related to reservoir aquifers and water resources. Data have been obtained from different sources on different supports and have been processed and organized in a single database with spatial coordinates. A Visual Basic application has also been developed for a better use and management of this HIS database. Several thematic maps of the aquifers and hydrodynamic functioning of water resources have been produced to be exploited by decision makers. These products of HIS database allowed to update the water balance and to build a good conceptual model of the aquifers conducting to the development of a set of groundwater numerical simulation models consisting in a mathematical model in steady state and transient flows, and a pollutant transport model to simulate seawater intrusion in these aquifers.

DÉVELOPPEMENT D'UN SIH POUR L'AMÉLIORATION DES CONNAISSANCES TECHNIQUES SUR LE RÉSERVOIR ET LE FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE DE RMEL (MAROC)

Development of HIS to improve technical knowledge on the reservoir and hydrodynamic functioning of the Rmel aquifer (Morocco)

MOHAMED JALAL ELHAMIDI^{*}, ABDELKADER LARABI¹, MOHAMED FAOUZI¹, RACHID ESSAFF²

¹Centre Régional de l'Eau du Maghreb, AMERN, École Mohammadia d'ingénieurs, Université Mohammed V de Rabat, Avenue Ibn Sina, Rabat 10080, Maroc

²Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), Ministère Délégué Chargé de l'Eau, Rabat 10080, Maroc

Reçu le 21 mars 2019, accepté le 8 avril 2019

RÉSUMÉ

La majorité des centres urbains et ruraux du bassin du Bas-Loukkos (nord du Maroc) sont généralement situés sur la côte et les plaines côtières. L'augmentation de la demande en eau due à la démographie et au développement agricole est accompagnée par une pression sur les eaux souterraines. Cette situation a entraîné une baisse significative du niveau piézométrique et peut éventuellement causer un déficit du bilan hydrique de la nappe en provoquant une dégradation de la qualité de l'eau douce par invasion des eaux marines. La zone d'étude de Rmel-Oulad Ogbane, couvrant une superficie de 305 km², est située dans le bassin du Bas-Loukkos au sud de la ville de Larache. Afin de fournir une meilleure caractérisation de l'aquifère, il a été décidé d'organiser toutes les données dans des formats standard stockés dans une base de données numérique SIH (Système d'information hydrogéologique). Cette base de données SIH développée englobe un menu très varié relatif aux réservoirs et aux fonctionnements

hydrodynamiques des ressources en eau. Les données issues de plusieurs sources et sur différents supports ont été traitées et organisées dans une base de données commune avec des coordonnées spatiales référencées. Une application Visual Basic a été aussi développée pour une meilleure utilisation et gestion de cette base de données sous SIH. Ainsi, plusieurs cartes thématiques relatives aux réservoirs et aux ressources en eau ont été produites pour être exploitées par le décideur. Ces produits de la base de données SIH ont permis l'actualisation du bilan hydrique de la nappe, la construction d'un bon modèle conceptuel des aquifères conduisant au développement d'un modèle mathématique en régimes permanent et transitoire, ainsi qu'un modèle de transport simulant l'intrusion de l'eau de mer dans ces aquifères.

Mots-clés : *base de données SIH, Rmel-Oulad Ogbane, application Visual Basic, cartes thématiques, réservoirs aquifères, fonctionnements hydrodynamiques, bilan hydrique, modèle conceptuel.*

ABSTRACT

The majority of urban and rural centres of Low-Loukkos basin (Northern Morocco) are generally located on the coast and coastal plains. Due to demographic and agricultural development, increase in water demand has led to pressure on groundwater resources. This situation has caused significant drops in groundwater level and may eventually lead to a deficit in the water balance of the aquifer, as well as a degradation of the freshwater quality by seawater intrusion. The study area of Rmel-Ouled Ogbane aquifers covers approximately 305 km² and is located in Low-Loukkos basin to the south of the city of Larache. In order to improve the characterization of the aquifers, we chose to organize all data in standard formats stored in a digital HIS (Hydrogeological Information System) database. This HIS database presents a varied menu related to reservoir aquifers and water resources. Data have been obtained from different sources on different supports and have been processed and organized in a single database with spatial coordinates. A Visual Basic application has also been developed for a better use and management of this HIS database. Several thematic maps of the aquifers and hydrodynamic functioning of water resources have been produced to be exploited by decision makers. These products of HIS database allowed to update the water balance and to build a good conceptual model of the aquifers conducting to the development of a set of groundwater numerical simulation models consisting in a mathematical model in steady state and transient flows, and a pollutant transport model to simulate seawater intrusion in these aquifers.

Key words: *HIS database, Rmel-Oulad Ogbane, Visual Basic application, thematic maps, reservoir aquifers, hydrodynamic functioning, water balance, conceptual model.*

1. INTRODUCTION

Les ressources en eau souterraine au Maroc représentent la source primordiale d'approvisionnement qui souffre de la pénurie d'eau en raison des conditions arides et semi-arides, aggravées par les changements climatiques globaux qui touchent le monde entier. De nombreuses zones côtières accueillent des populations à forte densité, environ 50 % de la population mondiale vit à moins de 60 km du littoral (ESSINK, 2001). Plus de 17 millions de personnes vivent dans les villes côtières du Maroc et ce nombre ne cesse de croître (RGHP, 2014). En effet, en 2015, plus de 50 % de la population totale du pays vit dans les zones côtières, avec une proportion croissante de la population rurale en raison de la pauvreté et de l'exode rural (RGHP, 2014). Cette situation rend plus de pression sur

de nombreux aquifères côtiers menant à la salinisation dans la frange côtière. Le système aquifère côtier de Rmel-Oulad Ogbane est reconnu comme l'un des aquifères importants au Maroc qui est affecté par la salinisation de la frange côtière de Rmel.

L'aquifère est étendu sur une superficie de 305 km² est située dans le bassin du Bas-Loukkos au nord du Maroc. Elle sert à l'alimentation en eau potable des villes de Larache, de Ksar-El-Kébir (avec des prélèvements estimés à 8,5 millions de mètres cubes en 2014) et des centres ruraux (ABHL, 2014). En plus, les eaux de la nappe sont aussi destinées à l'irrigation (environ 6,1 millions de mètres cubes par année) pour soutenir l'irrigation par les eaux de surface du périmètre de petite et moyenne hydraulique (PMH) (ORMVAL, 2014). Le développement économique et social qu'a connu la région a entraîné une pression croissante sur les eaux souterraines. L'accroissement de la demande en eau dû à la poussée démographique et au développement du secteur agricole et industriel s'est accompagné d'une pression sur les eaux de la nappe. Ce qui a conduit à terme de causer un déficit du bilan hydrique de la nappe. Par conséquent, la nappe a subi un léger déstockage de l'eau souterraine et une dégradation de la qualité de l'eau par invasion des eaux marines et par la pollution d'origine agricole (les fertilisants et les nitrates phytosanitaires) (PDAIRE, 2010).

La gestion rationnelle et durable de ces ressources en eau souterraine est indispensable pour le développement de ce pays. La mise en œuvre de cette gestion nécessite une connaissance approfondie et précise des ressources en eau, du réservoir et des paramètres qui y sont associés, ainsi que de la disponibilité des données et de leur variabilité dans le temps et dans l'espace. L'objectif de la présente étude est de fournir un produit d'aide à la prise de décision quant à la gestion et la planification des ressources en eau dans la nappe de Rmel-Oulad Ogbane.

Afin de mieux évaluer son potentiel hydrogéologique, il est nécessaire de cartographier les différentes données concernant la topographie, l'hydrologie, la climatologie, la géologie, l'hydrogéologie, l'utilisation des ressources en eau, la qualité des eaux, etc. Ces données autour desquelles s'articule cette base de données sont collectées auprès des différents partenaires et organismes locaux et régionaux (agences et offices), et aussi en consultant des travaux de recherche ou rapports techniques réalisés antérieurement. Il a été constaté que la majorité des documents et données sont présentés sous une forme qui présente beaucoup d'inconvénients et de difficultés pour leur exploitation, en particulier pour la présente étude et les études futures. Ces documents sont difficilement accessibles, fragmentaires et non organisés, et nécessitent d'être actualisés pour assurer le contrôle, le suivi et la gestion. D'autre part, le croisement d'informations issues de différentes sources, lorsqu'il s'agit d'élaborer des cartes thématiques, est délicat et en particulier lorsque les échelles sont différentes.

Ainsi et pour les besoins de la présente étude, ce travail vise à l'élaboration d'une base de données SIH qui s'avère une nécessité pour harmoniser et centraliser dans un même support toutes les couches d'informations actualisées relatives au réservoir aquifère et aux ressources en eau dans la zone d'étude. Ce système permet : *i*) de fournir une information fiable et de « qualité », *ii*) de faciliter la coopération entre les différents intervenants dans le domaine d'eau souterraine et assiste les décideurs à l'exploitation, au recoupement des couches d'informations de la base de données cartographique et *iii*) la visualisation des cartes thématiques/synthétiques, qui sont des outils précieux pour la prise de décisions. La mise en œuvre d'une application sous l'environnement Visual Basic a été conçue selon les besoins des gestionnaires et des décideurs afin de comprendre son fonctionnement hydrogéologique spatio-temporel. Cette action facilite la consultation, la personnalisation et la duplication des informations en relation avec les différents aspects des ressources en eau. Plusieurs modèles géostatistiques ont été aussi élaborés pour le compte de cette nappe (EL HAMIDI *et al.*, 2018) et les résultats principaux ont été intégrés dans ce SIH. De même que les résultats du modèle mathématique en régime permanent et transitoire de l'écoulement et du transport de polluants, y compris l'intrusion marine dans les deux nappes (Output) (EL HAMIDI *et al.*, 2016a; EL HAMIDI *et al.*, 2016b; LARABI *et al.*, 2016) ont été aussi intégrés, exploitées et mieux représentées sous SIH. Tous ces résultats serviront à mieux planifier, gérer et contrôler les ressources en eau souterraine de la nappe.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe dans le sous-bassin hydrographique du Bas-Loukkos au sud immédiat de la ville de Larache au nord-ouest du Maroc (Figure 1). Elle s'étend sur une superficie de 305 km² environ et longe l'océan Atlantique à l'ouest. Elle est limitée par les limons gris du talus de la rive gauche de l'oued Loukkos à l'est et les affleurements marneux mio-pliocènes au sud-est (THAUVIN, 1971). Au sud, par la remontée du substratum constituant ainsi une ligne de partage des eaux qui sépare la nappe Rmel-Oulad Ogbane de celle de Dradère-Souëire. Elle est drainée par les oueds Sakh-Sokh et Smid-El-Ma/El-Kihel. La zone d'étude s'inscrit dans un contexte climatique humide à subhumide sec marqué par l'influence adoucissante de l'Atlantique qui diminue vers l'est (zone de Oulad Ogbane) où il acquiert un caractère plus continental (MESSAOUD, 1963).

Géologiquement, les travaux réalisés par MESSAOUD (1963) et THAUVIN (1971) ont permis d'identifier et de

caractériser les principales unités lithostratigraphiques dans la zone d'étude. La série stratigraphique des formations de Rmel-Oulad Ogbane se compose comme suit :

- Mio-pliocène représenté par les marnes bleues qui constituent le substratum imperméable de l'aquifère.
- Pliovillafranchien : les formations marines et dunaires du pliovillafranchien, constituées de grès coquillers, de sables et de marnes plus ou moins sableuses. Ces formations sont recouvertes par des cailloutis à ciment argileux rouge et des limons sableux rouges du Villafranchien.
- Quaternaire : les grès lumachelliques marins du Quaternaire ancien évoluent latéralement vers les alluvions fluviales et les grès dunaires du Quaternaire continental à l'est au centre de la plaine. Le Quaternaire récent est représenté par des alluvions, des sables fins et des dunes et n'affleure que le long des oueds.

De point de vue hydrogéologique, l'aquifère de Rmel-Oulad Ogbane est constitué par un complexe très hétérogène de formations fluviolacustres. Il est constitué principalement des grès coquillers du Moghrébien (CHOUBERT et AMBROGGI, 1953) surmontés par des sables et des limons rouges plus ou moins marneux du Quaternaire dans la zone de Rmel, et qui évoluent latéralement à l'est vers des galets et limons sableux dans la zone des Oulad-Ogbane. Par endroits, une formation intermédiaire de sables argileux et d'argiles sableuses s'intercale entre les deux unités du Moghrébien et Quaternaire et peut constituer un écran semi-perméable isolant les deux unités hydrogéologiques (DRPE, 1987).

2.2 Démarche méthodologique et contrainte

L'élaboration de la base de données de l'étude se traduit par un grand nombre de contraintes ayant orienté les choix de réalisation en plusieurs étapes qui consistent en l'acquisition des données géographiques et tabulaires, la structuration de la géodatabase sous Access, la structuration de la géodatabase sous ArcCatalog et ArcMap et enfin le développement d'une extension sous Visual Basic.

2.2.1 Acquisition des données géographiques et tabulaires

La mise en place de la base de données consiste en la collecte des données relatives aux différents aspects en relation avec les ressources en eau souterraine et le réservoir aquifère (topographie, hydrologie, climatologie, géologie, géométrie du réservoir, hydrogéologie, utilisation des ressources en eau, qualité des eaux, etc.) dans la zone d'étude et leur intégration dans la base de données géographiques. Les données autour desquelles s'articule cette base de données sont collectées auprès des différents organismes locaux et régionaux (Agence de bassin hydraulique du Loukkos [ABHL], Direction de la recherche et de la planification de l'eau [DRPE], Office régional

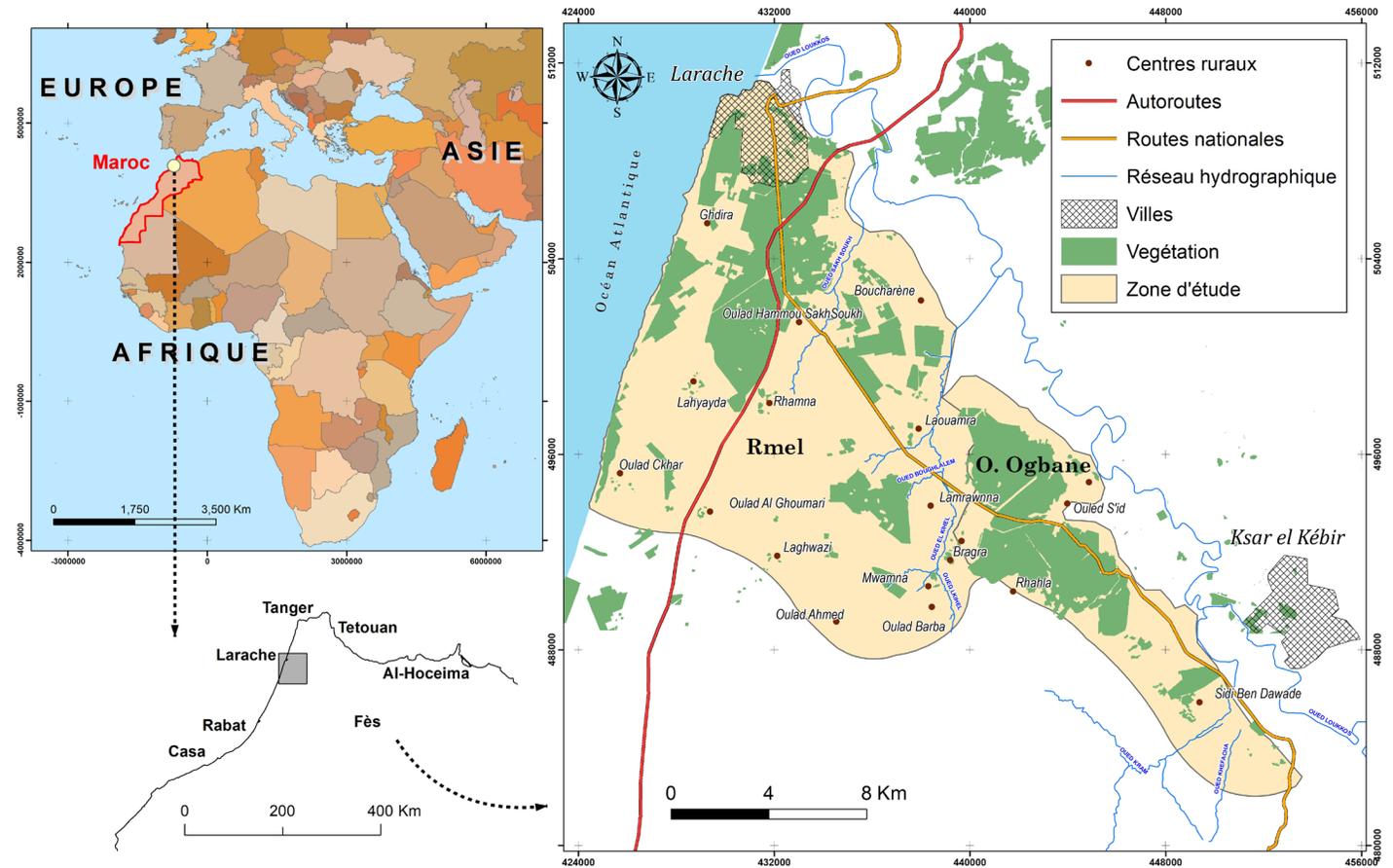


Figure 1. Carte de situation de la zone d'étude (Rmel-Oulad Ogbane).
Location map of the study area (Rmel-Oulad Ogbane).

de mise en valeur du Loukkos [ORMVAL], Office national de l'électricité et de l'eau [ONEE Tanger, ONEE Kénitra, ONEE Rabat], Régie autonome intercommunale de distribution d'eau et d'électricité de la province de Larache [RADEEL] et École Mohammadia d'ingénieurs [EMI]) et ont été, généralement, recueillies sous copie conforme (rapports, fiches techniques, listes, tableaux, cartes, coupes).

L'intégration de ces données issues de différentes sources a été réalisée par saisie des données alphanumériques, en scannant les cartes, profils et coupes, par numérisation des documents cartographiques réalisés dans le cadre des études antérieures et des entités spatiales auxquelles ont été rattachés leurs attributs et données sémantiques descriptives toponymiques et aussi bien quantitatives que qualitatives.

Ces données collectées datent depuis le début des années 1950 à l'année 2016 et ont été recueillies à partir de six principales organisations citées plus haut. Toutes ces données recueillies ont été homogénéisées et stockées dans un réseau de bases de données de différents types : relationnelle, sous forme de géodatabase et sous forme de couches d'informations (BD MONAROO - Base de données Modélisation de la nappe Rmel-Oulad Ogbane) (Figure 2).

La base de données hydrogéologique de l'aquifère côtier de Rmel-Oulad Ogbane (GWDB-ROOCA : Groundwater Database of Rmel-Oulad Ogbane Coastal Aquifer) doit donc être à même d'accepter de nombreuses bases volumineuses; c'est un outil dynamique qui doit être mis à jour au fur et à mesure de la collecte des données actualisées par l'utilisateur ou le gestionnaire, et doit être défini dans un système de coordonnées spatiales unique.

Il y a lieu de souligner que certaines cartes et données de géolocalisation d'un bon nombre de points d'eau recueillies (MESSAOUD, 1963) étaient initialement définies dans le système de coordonnées américain. Il était donc nécessaire de les transformer, via un logiciel spécifique, pour les représenter dans le système de projection marocain.

L'intégration de toutes les données collectées au sein d'un modèle d'information géographique, leur affichage, leur superposition et leur croisement nécessite au préalable une harmonisation stricte du système de coordonnées spatiales. Toutes les données à caractère géographique de types objets vectoriels (points, arcs et polygones), images ou grille de

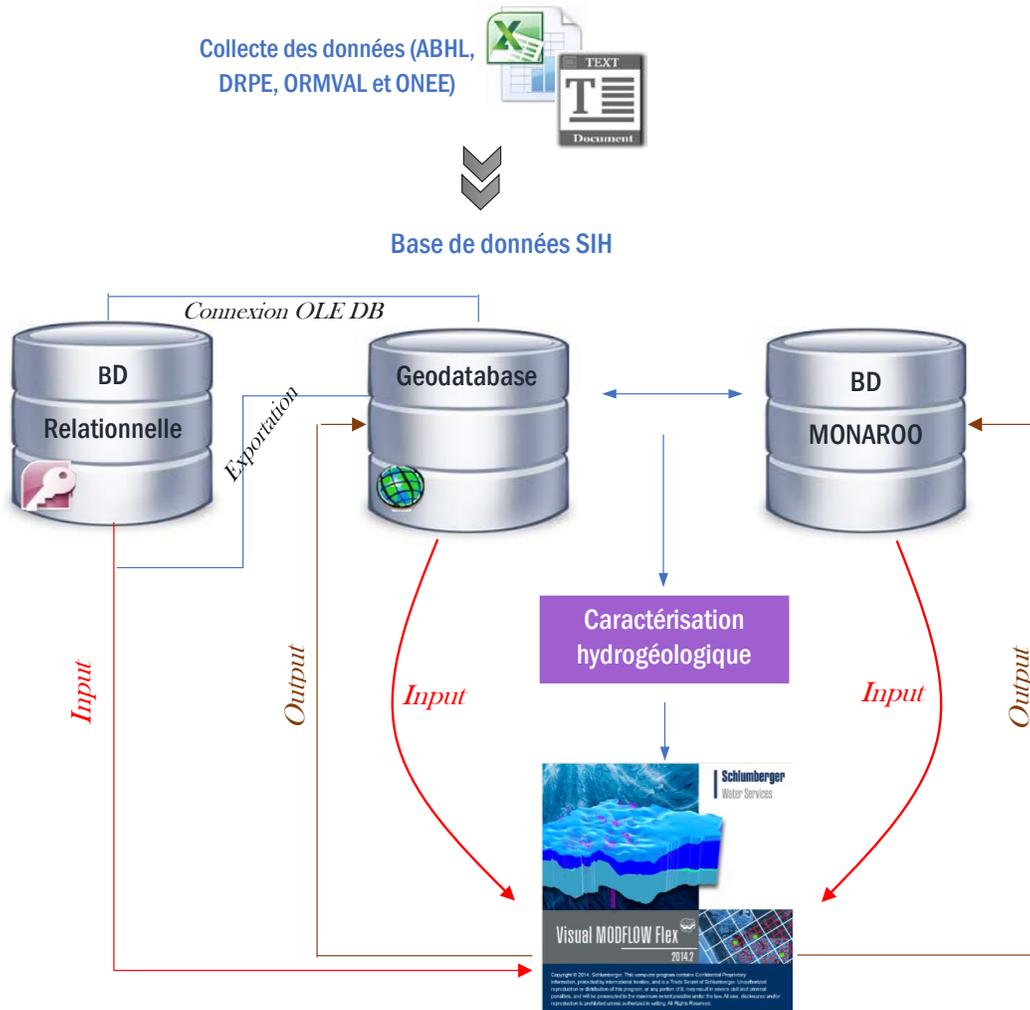


Figure 2. Principe d'organisation de la base de données SIH (GWDB-ROOCA). ABHL - Agence de bassin hydraulique du Loukkos; DRPE - Direction de la recherche et de la planification de l'eau; ORMVAL - Office régional de mise en valeur du Loukkos; ONEE - Office national de l'électricité et de l'eau potable.

Organization of the HIS database (GWDB-ROOCA). ABHL - Hydraulic Basin Agency of Loukkos; DRPE - Research and Planning of Water Administration; ORMVAL - Regional Office of Agricultural Development of Loukkos; ONEE - National Office of Electricity and Drinking Water.

données *raster* doivent être représentées sous un même type de système de coordonnées spatiales géographique ou projeté.

2.2.2 Structuration de la GWDB-ROOCA sous Access

Cette base de données utilise la structure du fichier de données Microsoft Access et offre une souplesse d'utilisation du système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR). Le développement de cette robuste base de données garantit le succès de la gestion des données. Elle facilite l'accès et la mise à jour, et elle permet de créer des requêtes pour la visualisation et l'analyse des données nécessaires pour le modèle.

La plupart des données recueillies dans cette base de données concernent les eaux souterraines, la nature de l'aquifère et ses conditions aux limites. Elle comprend toutes les informations

relatives à l'utilisation des eaux souterraines par les villes de Larache et de Ksar el Kébir et les points d'eau ainsi que des informations sur les zones d'irrigation, l'hydrochimie, les variations du niveau de l'eau et les propriétés hydrodynamiques qui caractérisent l'aquifère de la région.

La structure de la base de données comporte 13 grandes tables (Tempér_BOEM, Tempér_Larache, Tempér_Laouamra, Stations_Météo, Analyses Physico-Chimiques, Centres ruraux, Précip_Larache, Précip_Laouamra, Précip_BOEM-Mrissa, Retour_Irrigation ORMVAL, Retour_Irrigation_SODEA_CAL_Particuliers, Recharge_R-OO et Points d'eau) qui sont directement liées à une table centrale appelée Aquifer_R-OO par une relation un-à-plusieurs (Figure 3). En outre, la table des Points d'eau est liée à la table de la stratigraphie par une

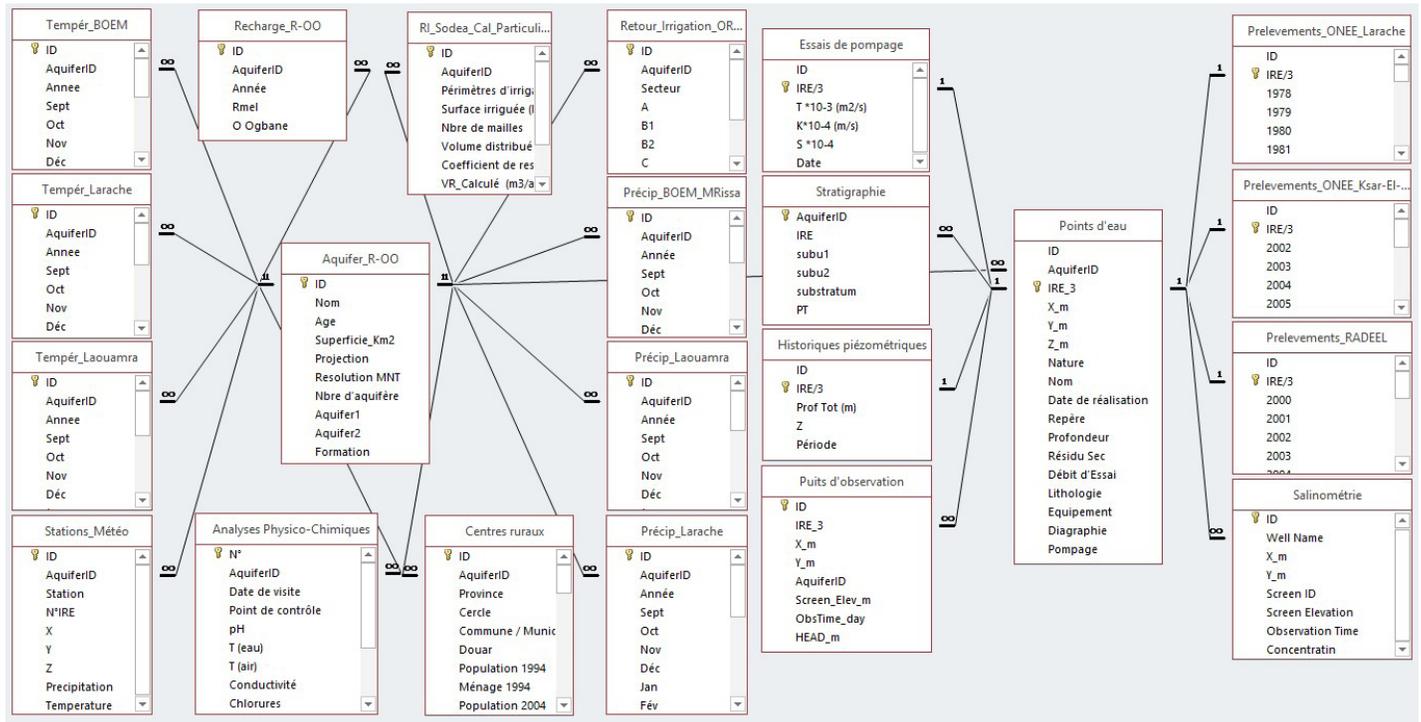


Figure 3. Modèle physique de la base de données relationnelle sous Access de la zone d'étude.
Physical model of the relational database in Access of the study area.

relation un-à-plusieurs et avec les sept autres tables par une simple relation de un-à-un.

L'exploration de la base de données alphanumérique est effectuée sous l'application Microsoft Access via un menu général de la base de données relationnelle sous Access (Figure 4) et s'ouvre directement à partir du fichier BD-Rmel-O. Ogbane.accdb. Ceci permet d'accéder rapidement et facilement à la base de données alphanumérique. Ce menu possède deux ensembles de données avant et après traitement des données collectées et qui sont :

- Consultation des fiches et documents : ce groupe contient un ensemble de données tabulaires collectées auprès des organismes et offices, par exemple les données climatiques et les données de forages.
- Traitement et analyse des données : ce groupe de données contient des graphiques et des diagrammes obtenus après traitement et analyse de ces données tabulaires collectées.

2.2.3 Structuration de la GWDB-ROOCA sous ArcCatalog et ArcMap

L'application ArcCatalog de l'outil ArcGIS permet de concevoir les bases de données, de gérer les stocks de données spatiales, de créer des géodatabases, de répertorier et d'organiser les données géographiques, d'afficher et de mettre à jour les métadonnées.

La base de données mise en place comporte quatre géodatabases :

- La géodatabase « Base de données » regroupe les objets vectoriels classés en fonction de leurs thématiques et les catalogues d'images (*raster catalog*) qui répertorient les images *raster*, les données en grilles et en tesselles (TIN) destinées pour la représentation des données continues. Dans le détail, les objets vectoriels de la géodatabase constituent des séries de jeux de classes d'entités (*feature dataset*) qui rassemblent des couvertures d'entités apparentées (ex. : situation de la zone d'étude, administration, hydrologie, climatologie, hydrogéologie, géométrie du réservoir, etc.). Au sein de ces jeux, on retrouve différentes classes d'entités (*feature class*) qui correspondent à la même thématique et qui décrivent les différents aspects et sous-thèmes en rapport avec les ressources en eau dans la zone d'étude (Figure 5) (ex. : le jeu de classe d'entités « administration » englobe plusieurs classes d'entités qui correspondent à la même thématique qui sont : provinces, communes, villes, etc.), avec l'historique de toutes les cartes antérieures établies dans le cadre des études antérieures collectées auprès des différents organismes locaux et régionaux (agences et offices) et en consultant des travaux de recherche réalisés antérieurement.
- La géodatabase « Modèle géostatistique » rassemble les cartes de prédiction des variables qui évoluent dans l'espace (variables régionalisées) à l'aide d'une méthode

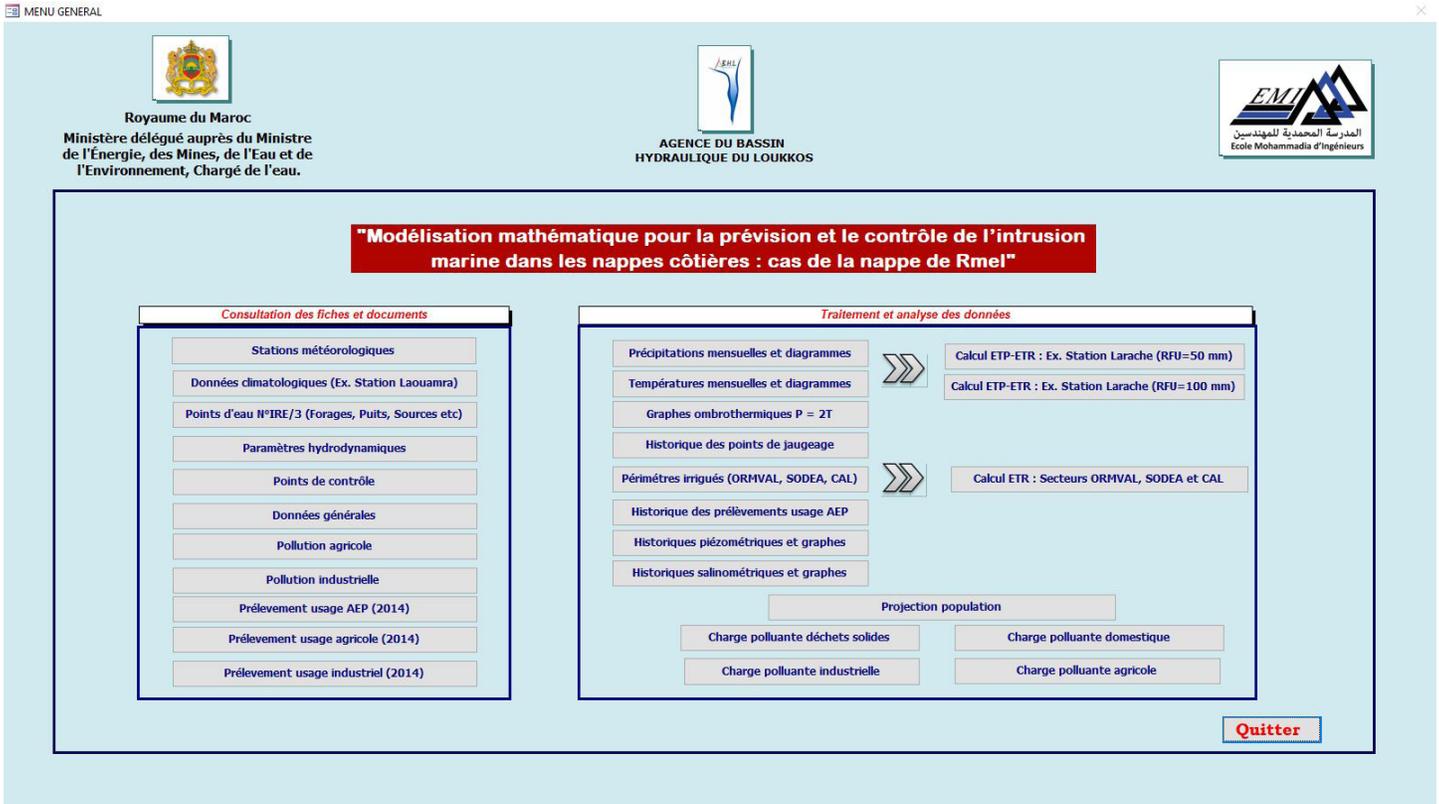


Figure 4. Menu général de la base de données relationnelle sous Access avant et après traitement et analyse des données de la zone d'étude. *General menu of the relational database in Access before and after treatment and data analysis of the study area.*

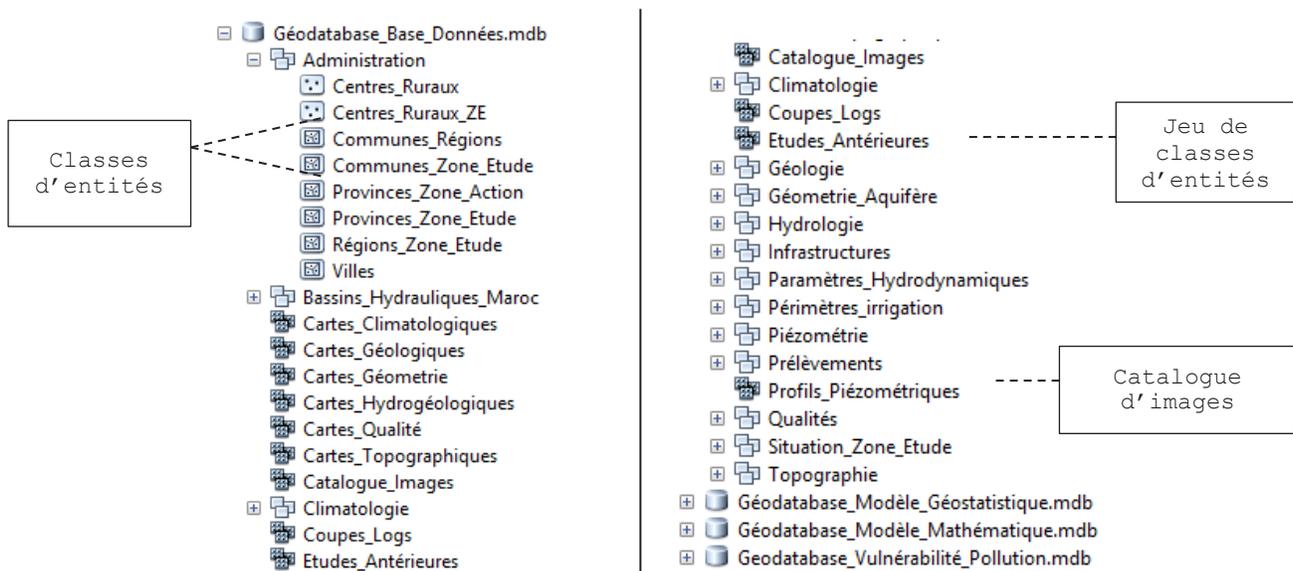


Figure 5. Structure de la géodatabase SIH (GWDB-ROOCA) sous ArcCatalog. *SIH geodatabase (GWDB-ROOCA) structure in ArcCatalog.*

d'interpolation; le krigeage ordinaire, dans un SIH (EL HAMIDI *et al.*, 2018). Le test de normalité et l'analyse des tendances globales ont été appliqués à chaque variable pour sélectionner le modèle de variogramme approprié et vérifier les résultats à l'aide de la validation croisée. Ainsi, plusieurs cartes thématiques relatives aux réservoirs et aux ressources en eau ont été produites pour être exploitées par le décideur.

3. La géodatabase « Modèle mathématique » englobe l'ensemble des données d'entrées (modèle conceptuel) au modèle mathématique et regroupe les résultats des modèles simulés (les sorties) de l'eau souterraine en régime permanent de l'année 1961 et en régime transitoire pour la période 1962 à 2014 de l'écoulement, du transport de polluants et d'intrusion marine à densité variable de la nappe de Rmel-Oulad Ogbane sur la base du code MODFLOW, 2000/SEAWAT (GUO et LANGEVIN, 2002).
4. Enfin, la géodatabase « Vulnérabilité à la pollution » contient quatre scénarios choisis pour leurs régimes pluviométriques et systèmes hydroagricoles afin de comprendre la dynamique spatio-temporelle de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère Rmel-Oulad Ogbane par la méthode DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987). Chaque scénario rassemble les sept paramètres environnementaux : (*D*) profondeur de l'eau, (*R*) recharge efficace, (*A*) milieu aquifère, (*S*) type de sol, (*T*) topographie, (*I*) impact de la zone non saturée et (*C*) conductivité hydraulique de l'aquifère. Ensuite, l'élaboration de la carte finale est obtenue en calculant la somme pondérée à partir des cartes reclassifiées (matricielles) des paramètres obtenus selon l'indice DRASTIC.

L'exploration de la base de données cartographique est effectuée sous l'interface de l'application ArcMap d'ArcGIS Desktop (Figure 6). Dans la table des matières en mode de données (*data view*), apparaît la liste des couches d'information ou thèmes intégrées au projet et qu'on peut afficher, interroger, modifier et publier. Chaque couche de ce bloc de données (groupe de couches) montre l'emplacement des entités spatiales, leur type et ce qui les caractérise.

Il est à souligner qu'en plus de la « Base de données » de Rmel-Oulad Ogbane, on a prévu une autre base de données relative au modèle géostatistique, au modèle mathématique de l'intrusion marine et à la vulnérabilité à la pollution de la nappe de Rmel-Oulad Ogbane. Ces résultats sont intégrés et alimentés au fur et à mesure de la construction des modèles de la nappe.

2.2.4 Développement de l'extension MONAROO

Pour faciliter aux gestionnaires et décideurs l'exploitation de la base de données, nous avons procédé à la mise en œuvre

d'une extension flexible qui gère, extrait et superpose les couches d'information et des couvertures incorporées dans la base de données développée. Les couches thématiques/synthétiques obtenues ont été organisées dans les menus et sous-menus. Cette action facilite la consultation, la personnalisation et la duplication des informations en relation avec les différents aspects des ressources en eau.

À l'instar des études antérieures (KINUTHIA *et al.*, 2006; NAIHA *et al.*, 2006), le script Visual Basic a été choisi pour développer cette extension dans l'ArcGIS. Dans ce cas, nous avons opté pour le développement d'une extension en Visual Basic du type à caractériser l'utilisation de la base de données SIH (BURKE, 2003; ENSG, 2003).

L'extension développée porte le nom de MONAROO (Modélisation de la nappe Rmel-Oulad Ogbane) (Figure 7). Il s'agit de scripts personnalisés, en menus intégrés à la barre d'outils de la base de données cartographique BD_MONAROO. Ces menus personnalisés en boutons de contrôle offrent une gamme de fonctionnalités additionnelles simples à manipuler et rapides à exécuter permettant aux différents niveaux d'utilisateurs la consultation, l'affichage et la mise à jour des cartes thématiques.

Cette barre a été personnalisée selon une interface conviviale de sorte à faciliter l'affichage, la consultation et l'exploitation des couches d'information groupées par thématiques. En effet, l'interface élaborée est constituée d'une série de composantes (barre des menus, menus, sous-menus et boutons de contrôle) structurées de façon à refléter les différents blocs d'informations et thématiques relatives à la caractérisation et l'exploitation des ressources en eau de la nappe de Rmel-Oulad Ogbane, ainsi que les données d'entrées/sorties au modèle mathématique d'intrusion marine de la nappe. D'une manière générale, la barre d'outils MONAROO renferme quatre menus : menu « Base de données », menu « Modèle géostatistique », menu « Modèle mathématique » et menu « Vulnérabilité à la pollution », dont chacun comporte des menus, des sous-menus et des boutons de contrôle comme il est illustré par la figure 7.

Le menu « Base de données » donne les cartes thématiques/synthétiques obtenues, en ce qui concerne la situation de la zone, la présentation de la zone, hydro-climatologie, le réservoir aquifère, etc. Le menu « Modèle géostatistique » renferme les cartes de prédiction des variables régionalisées, exemple : la topographie, la géométrie, les paramètres hydrodynamiques, l'hydrogéologie, etc. Le menu « Modèle mathématique » comporte l'ensemble des données d'inputs au modèle mathématique et regroupe les sorties des modèles simulés de l'eau souterraine de l'écoulement et à densité variable. Le menu « Vulnérabilité à la pollution » rassemble les cartes de vulnérabilité de Rmel-Oulad Ogbane, par la méthode DRASTIC.

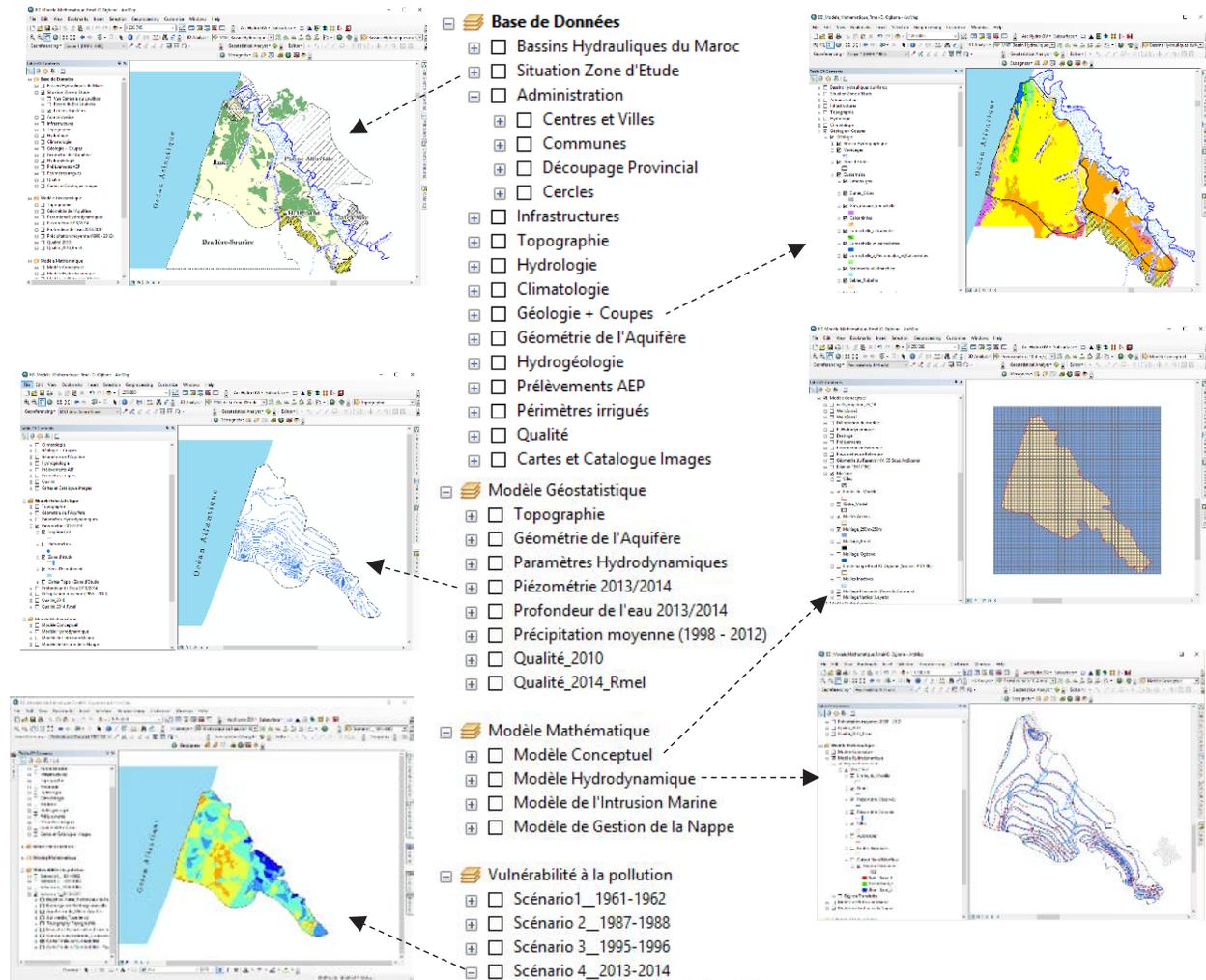


Figure 6. Structure de la base de données SIH (GWDB-ROOCA) sous ArcMap. HIS database (GWDB-ROOCA) structure in ArcMap.

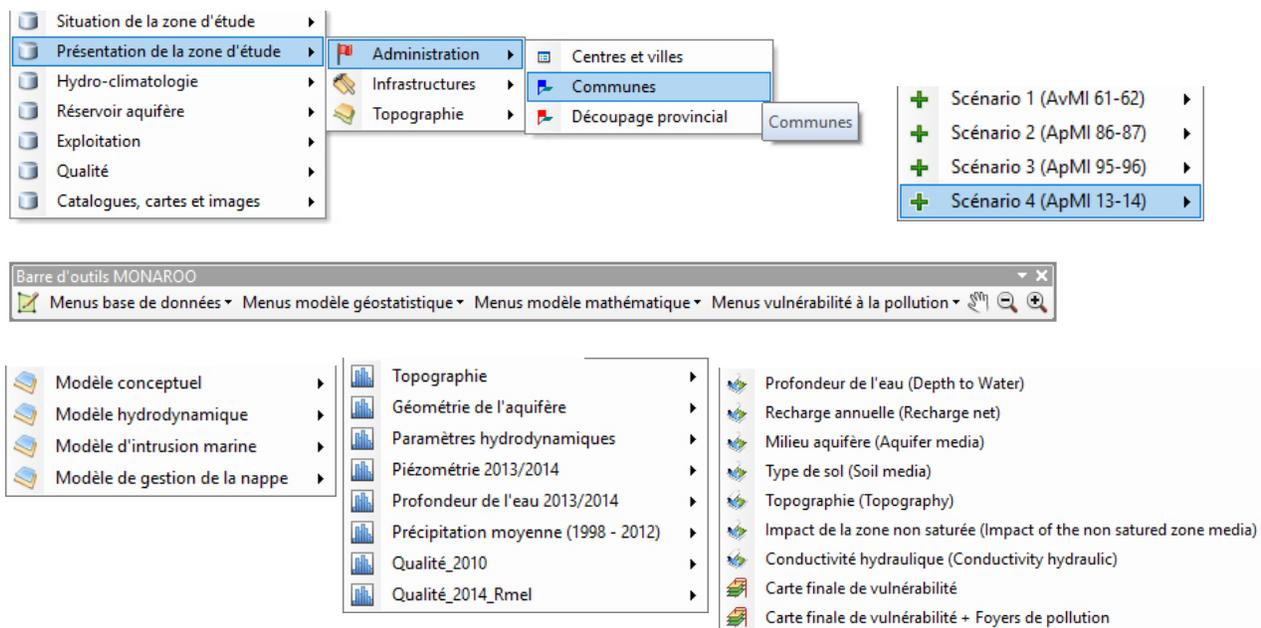


Figure 7. Barre d'outils MONAROO. MONAROO toolbar.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Cartes thématiques décisionnelles

Grâce à cette base de données sous SIH, on peut intégrer différentes informations géospatiales à traiter, afin de produire des cartes thématiques/synthétiques décisionnelles. Ainsi, on a choisi d'extraire des cartes thématiques qui récapitulent et synthétisent les connaissances actualisées acquises sur le réservoir aquifère, l'hydrodynamisme et le fonctionnement, le modèle conceptuel, les conditions aux limites et la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution de la nappe de Rmel-Oulad Ogbane (Figure 8). Ces cartes, qui sont issues de traitements de données variées, sont mises à la disposition des gestionnaires et des différents intervenants dans le domaine des ressources en eau dans la zone de Rmel-Oulad Ogbane pour aider à la prise de décision en matière de gestion intégrée et la mise en œuvre de politiques de protection et de suivi.

3.2 Hydrogéologie

Le sous-menu « Hydrogéologie » du menu « Réservoir aquifère » englobe les cartes et données qui permettent d'appréhender le fonctionnement spatio-temporel de la nappe de Rmel-Oulad Ogbane. Il inclut les cartes des différents points d'eau de reconnaissance et d'exploitation, les cartes des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, les cartes et historiques piézométriques et les cartes des profondeurs de l'eau de la nappe.

La banque de données relative aux cartes piézométriques intégrées à notre base de données permet d'analyser les situations piézométriques à différentes périodes et offre le choix entre plusieurs états piézométriques qui datent de 1961-1962 à l'actuel : 1961-1962 (MESSAOUD, 1963), 1972 (BONNET et BUFFET RAIS, 1973), 1985 (DRPE, 1987), 1992 (LARABI et BOUHMAÏ, 2001), 1999 (ARBAÏ, 1999) et 2000 (ONEE, 2002).

La figure 9 illustre la situation de la surface piézométrique de la nappe en période d'étiage de 1961-1962. L'examen de cette piézométrie montre que l'écoulement général de la nappe s'effectuait du sud-ouest vers le nord-est (oued Loukkos) avec un gradient hydraulique estimé entre 3×10^{-3} et 7×10^{-3} dans la zone centrale de Rmel et à la limite de la zone alluviale à l'est. Ce gradient est assez important ($1,5 \times 10^{-2}$) au sud-ouest des Oulad Ogbane où la nappe circule dans les galets marneux et limoneux. Dans la partie occidentale (bande côtière), l'écoulement de la nappe devient est-ouest (direction de l'océan) avec un gradient hydraulique de l'ordre de $4,5 \times 10^{-3}$.

Au sud-ouest de la zone de Rmel, le soulèvement du substratum imperméable du Mio-pliocène se traduit par une ligne des partages des eaux souterraines pour constituer un haut fond. Ce substratum marneux affleure le long de la limite occidentale des Oulad Ogbane. La superposition de la carte piézométrique de l'étiage moyen 1961-1962 (MESSAOUD, 1963) et de la carte géologique (au 1/50 000) relativement récente (ESGM, 1999) a permis de corriger les imperfections du tracé piézométrique et de rectifier la limite de la zone d'étude réalisée par le Plan Directeur d'Aménagement intégré des Ressources en eau (PDAIRE, 2010) au niveau des zones d'affleurement des marnes au sud-est de la zone d'étude. Ainsi, l'extension de la zone d'étude a augmenté de 2,5 % par rapport à l'extension initiale soit 313 km² (Figure 9).

3.3 Bilans hydriques

Une étude hydrogéologique détaillée a été effectuée par MESSAOUD (1963) dans le bassin du Bas-Loukkos. Elle a permis de comprendre le comportement des eaux souterraines dans cette région hétérogène et de préciser une exploitation plus rationnelle. Ainsi, et sur la base des données disponibles à cette époque, parmi l'essentiel de la contribution de cet auteur, il a estimé un bilan de l'exploitation des eaux et la valeur des débits disponibles. Par conséquent, certaines composantes de ce bilan font défaut telles que les sorties latérales du réservoir qui sont recalculées et estimées dans ce manuscrit.

La base de données sous SIH a été aussi exploitée pour calculer, évaluer et estimer le bilan hydrique de ce réservoir en 1963 (Tableau 1) sur la base de l'inventaire global et détaillé de tous les points de pompage (puits, forages et sources), des données météorologiques relativement précises que nous disposons sur la zone d'étude et du débit latéral estimé en 1963.

D'autres essais de bilan de la nappe Rmel ont été établis pour 1972, 1986, 1999, 2000 et 2004. Ces bilans sont destinés à donner des ordres de grandeurs pour les différents termes du bilan. La comparaison des résultats des essais de bilan entrepris dans le cadre des études antérieures montre des estimations aberrantes qui empêchent la quantification des différents termes du bilan.

La comparaison des résultats des essais du bilan et les données collectées au sein de l'ORMVAL concernant les apports des surplus d'irrigations paraissent aberrantes. Les différents essais de bilan établi par la DRPE en 1987 (DRPE, 1987), ARBAÏ en 1999 (ARBAÏ, 1999), et le PDAIRE en 2003 (PDAIRE, 2010) ont montré que la nappe est en parfait équilibre. Or, la nappe Rmel est sollicitée par la surexploitation AEP urbaine et rurale, les prélèvements SODEA, CAL, SUCRAL et particulier. Afin d'équilibrer le bilan de la nappe,

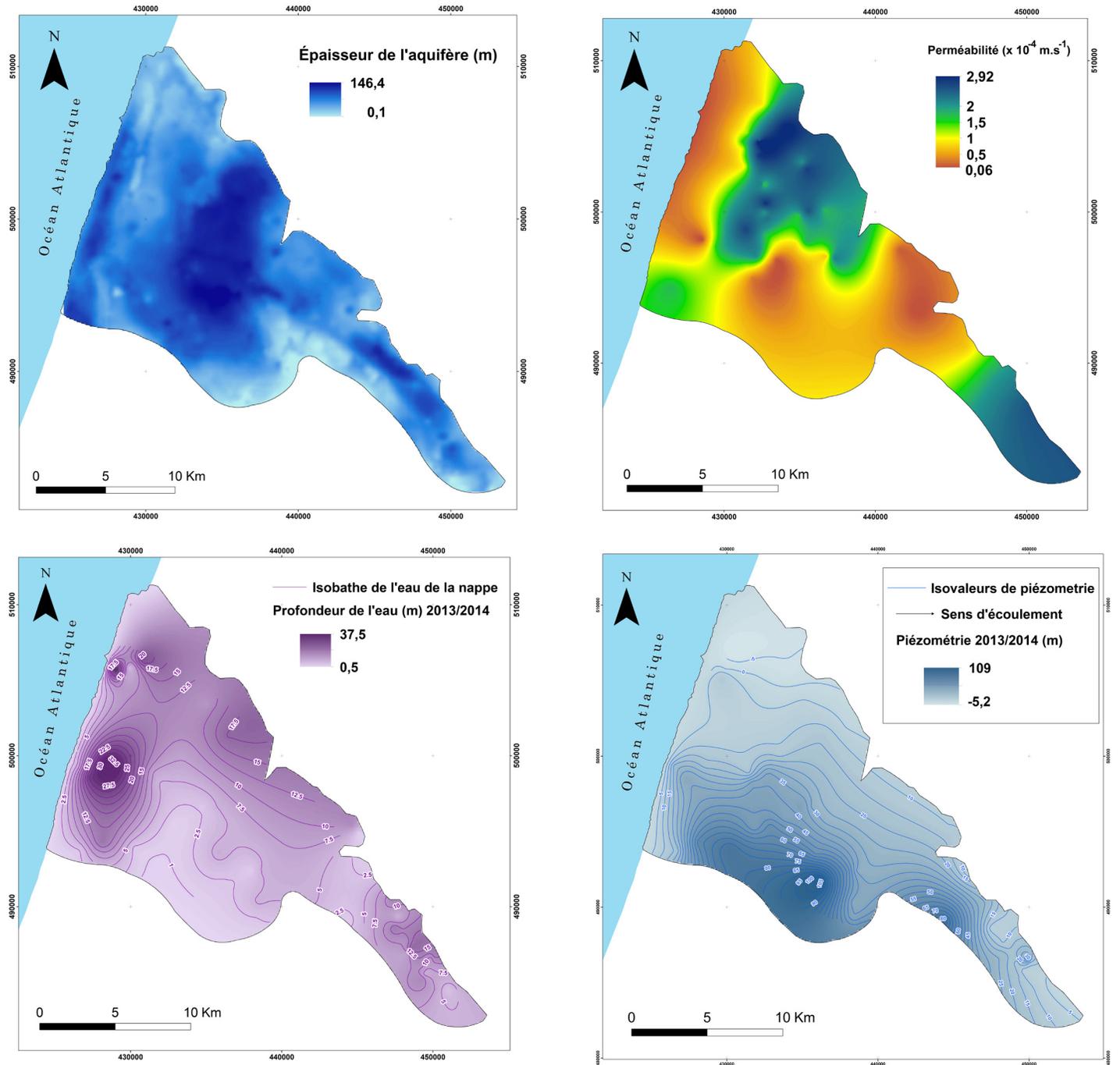


Figure 8. Exemples de cartes thématiques produites de la nappe Rmel-Oulad Ogbane.
 Examples of thematic maps produced for the Rmel-Oulad Ogbane aquifer.

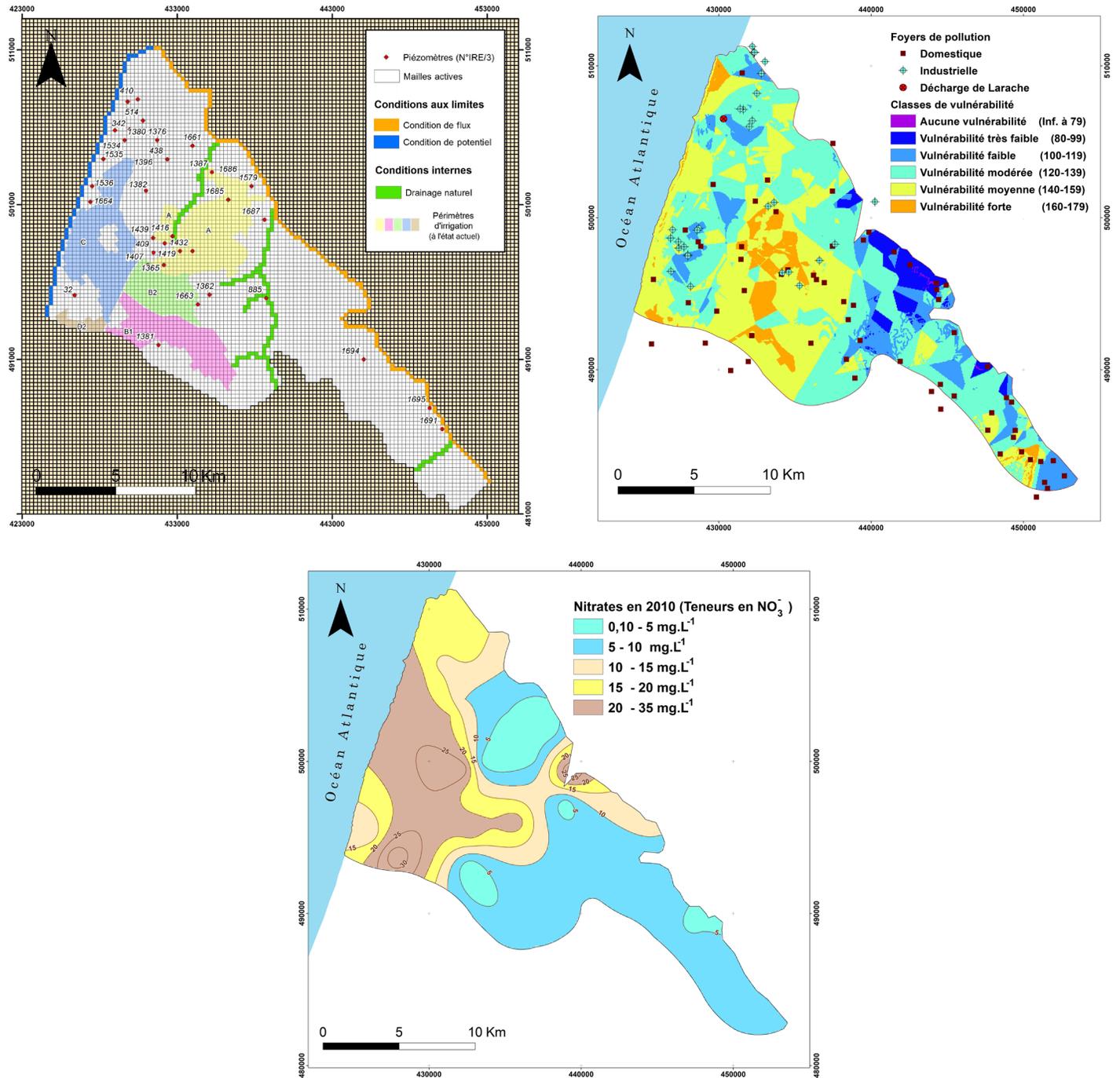


Figure 8. (suite)
(continued)

Exemples de cartes thématiques produites de la nappe Rmel-Oulad Ogbane.
Examples of thematic maps produced for the Rmel-Oulad Ogbane aquifer.

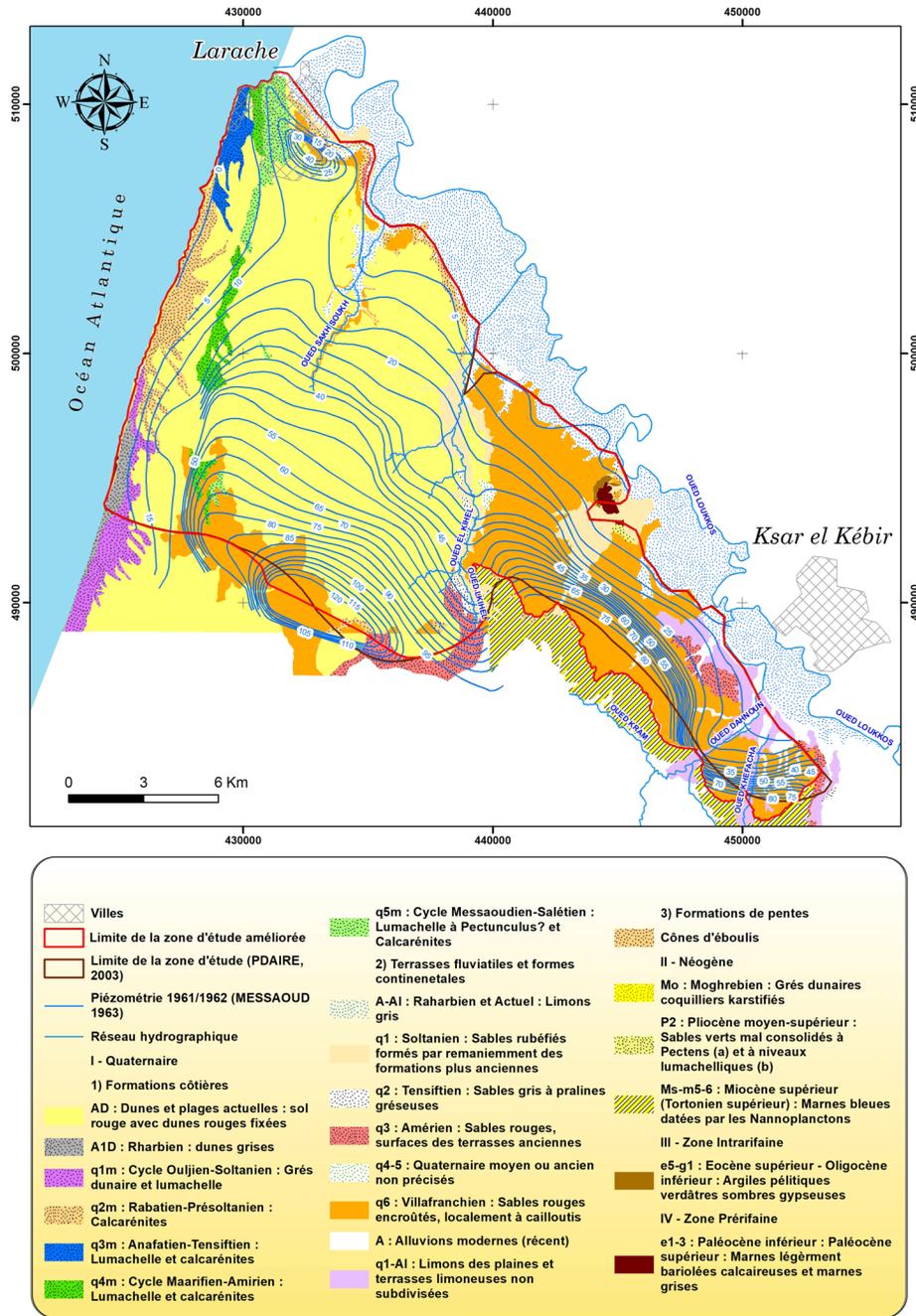


Figure 9. Recouvrement de la carte géologique et de la carte piézométrique de 1963.
Overlap of the geological map and piezometric map of 1963.

les écoulements vers l'océan sont sous-estimés. Seule l'étude du bilan établi par l'ONEE pour l'année 2000 (ONEE, 2002) a souligné un léger déstockage de la nappe.

Cependant, un bilan de la nappe de Rmel-Oulad Ogbane a été établi pour l'année hydrologique 2013-2014. Le tableau 2 résume les différentes composantes du bilan. Les résultats obtenus montrent un déstockage de la nappe estimé à 3,3 millions de mètres cubes par année engendré par l'accroissement des prélèvements pour l'AEP, agricoles et la réduction de la recharge naturelle de la nappe par précipitation qui constitue

la principale source d'alimentation de la nappe de Rmel-Oulad Ogbane.

3.4 Récapitulatif des données du modèle conceptuel

La base de données SIH (GWDB-ROOCA) constitue la trame essentielle du modèle conceptuel et du fonctionnement hydrogéologique. Ce modèle conduit à déterminer les processus de fonctionnement dynamiques des entités et des relations entre elles. L'injection de toutes ces données dans le code

Tableau 1. Bilan hydrique recalculé de la nappe Rmel-Oulad Ogbane en 1963.
Table 1. Recalculated water balance of the Rmel-Oulad Ogbane aquifer in 1963.

Entrées	Q ^a (L·s ⁻¹)	Q (m ³ ·a ⁻¹)	Sorties	Q (L·s ⁻¹)	Q (m ³ ·a ⁻¹)
Apports de la nappe			Prélèvements de la nappe		
Infiltration pluviale	1 887,5	59 524 200	AEP Larache	0	0
Surplus d'irrigation	68,4	2 157 062	AEP Rurale	0	0
			Pompages agricoles	285,4	9 000 374
			Pompages industriels	0	0
			Écoulements naturels		
			Vers la nappe alluviale	160,3	5 055 221
			Oueds, sources et marais	926	29 202 336
			Sorties vers la mer	584,2	18 423 331
Total entrées	1955,9	61 681 262	Total sorties	1 955,9	61 681 262
Entrées - Sorties					0

^a Q est le débit des entrées de la nappe issu des infiltrations pluviales et des surplus d'irrigation

Tableau 2. Bilan hydrique estimé de la nappe Rmel-Oulad Ogbane pour l'année hydrologique 2013-2014.
Table 2. Estimated water balance of the Rmel-Oulad Ogbane aquifer for the hydrological year of 2013-2014.

Entrées	Q ^a (L·s ⁻¹)	Q (m ³ ·a ⁻¹)	Sorties	Q (L·s ⁻¹)	Q (m ³ ·a ⁻¹)
Apports de la nappe			Prélèvements de la nappe		
Infiltration pluviale (305 km ²)	1 139,2	35 928 965	AEP Rurale	18,3	576 480
Surplus d'irrigation	329,6	10 394 266	AEP Urbain ONEE	185,3	5 844 252
Retour des pompages agricoles	39,1	1 233 463	AEP Urban RADEEL	71,8	2 264 700
			Pompages agricoles	195,6	6 167 314
			Pompages industriels	7,8	245 518
			Écoulements naturels		
			Sorties vers la mer	293,2	9 246 355
			Oueds, sources et marais	292,5	9 224 911
			Vers la nappe alluviale	550,0	17 346 061
Total entrées	1 508	47 556 693	Total sorties	1 615	50 915 176
Entrées - Sorties				-107	-3 358 482

^a Q est le débit des entrées de la nappe issu des infiltrations pluviales et des surplus d'irrigation

informatique conduira aux calculs en régime permanent puis en transitoire. Le tableau 3 ci-dessous synthétise les données qui ont permis l'établissement du modèle conceptuel.

4. CONCLUSION

L'élaboration de la base de données SIH GWDB-ROOCA, l'intégration des résultats des modèles géostatistiques, mathématiques et de vulnérabilité à la pollution de la nappe de Rmel-Oulad Ogbane ont été réalisées sur plusieurs étapes, à commencer par la collecte des données de différentes sources et sur différents supports, leur validation, leur organisation,

leur structuration en couches d'information selon l'objectif assigné; et enfin le développement d'une application sous l'environnement Visual Basic (extension MONAROO). Cette dernière a été conçue pour aider les gestionnaires et décideurs à l'exploitation de cette base de données cartographique et la visualisation des cartes thématiques/synthétiques qui sont des outils de valeur pour la prise de décisions. Cette base de données contient toutes les informations actualisées relatives au réservoir aquifère et aux ressources en eau dans la zone d'étude; topographie, hydrologie, climatologie, géologie, géométrie du réservoir, hydrogéologie, utilisation des ressources en eau, qualité des eaux, résultats des modèles géostatistiques, mathématiques et de vulnérabilité à la pollution de la nappe de Rmel-Oulad Ogbane. Grâce à cette base de données actualisée, plusieurs cartes décisionnelles ont été produites et représentent

Tableau 3. Synthèse des éléments utilisés pour l'établissement du modèle conceptuel.
Table 3. Summary of the elements used to establish the conceptual model.

Eléments du modèle		Modèle conceptuel	Valeurs affectées pour démarrage de calcul
Géologie/litho-Stratigraphie	Nature de l'aquifère	Tri-couche, libre	–
	Conditions aux limites	Flux imposé au nord	Débit = 13 850 m ³ ·j ⁻¹
		Flux nul au sud	Débit = 0 m ³ ·j ⁻¹
		Potentiel imposé à la limite occidentale	H = 0 m
Toit et mur	Z(x, y) = Niveau du sol/océan U1(x, y) = Niveau du toit de la couche intercalaire/océan U2(x, y) = Niveau du toit de la couche du Moghrébien/océan S(x, y) = Niveau du substratum/océan	Valeurs par point (x, y, niveaux)	
Hydrogéologie	Paramètres hydrodynamiques	Perméabilité Coefficient d'emménagement	K = 5,4 x 10 ⁻³ m·s ⁻¹ (valeur moyenne) S = 2 x 10 ⁻² (valeur moyenne)
	Hydro-climatologie	Recharge par pluies efficaces (P _{eff})	P _{eff} répartie sur toute la zone P _{eff} = 195,16 mm·a ⁻¹
Retour de l'irrigation (R _{irr})		R _{irr} sur des zones spécifiées correspondant aux périmètres irrigués R _{irr} = 52,78 mm·a ⁻¹	
Réseau hydrologique : pérenne/saisonnier		Oueds Sakh-Sokh, Smid El Ma, El Kihel et Dahnoun Conductance varie de 45,65 à 1 321,24 m ² ·j ⁻¹	
Prélèvements	Puits AEP	Sorties du système	24 659 m ³ ·j ⁻¹
	Puits irrigation		

toutes l'état amélioré des connaissances du réservoir aquifère et son fonctionnement hydrodynamique, et en particulier son extension et son bilan hydrique. Ces données sont, en l'occurrence, centralisées au Ministère délégué chargé de l'Eau et peuvent être mises à la disposition des gestionnaires que ce soient pour la mise en œuvre de projets socio-économiques ou pour mener des études d'impact sur les ressources en eau.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche est en partie réalisé dans le cadre d'une convention entre l'École Mohammadia d'ingénieurs (EMI), le Ministère délégué chargé de l'Eau (DRPE) et l'Agence du bassin hydraulique du Loukkos (ABHL). Il fait partie aussi d'une thèse de doctorat du premier auteur à l'École Mohammadia d'ingénieurs, Université Mohamed V de Rabat, supervisée par les deux auteurs. À cette occasion, les auteurs remercient le Ministère délégué chargé de l'Eau et l'ABH du Loukkos pour l'accès aux données, rapports techniques et la logistique accordée pendant les missions de terrain.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGENCE DU BASSIN HYDRAULIQUE DU LOUKKOS (ABHL) (2014). *Variation annuelle des prélèvements de Larache et de Ksar-El-Kébir de la nappe de Rmel-O. Ogbane*. Rapport technique ABHL, Tétouan, Maroc, 10 p.
- ALLER L., T. BENNET, J. LEHR et R. PETTY (1987). *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings*. US Environmental Protection Agency, EPA 600/2-87-035, Washington (DC), États-Unis, 20 p.
- ARBAI A. (1999). *Étude hydrogéologique et modélisation de la nappe de Rmel*. Mémoire de fin d'étude, École Hassania des Travaux Publics, Maroc, 89 p.
- BONNET M. et A. BUFFET RAIS (1973). *Étude des modèles de simulation en hydrogéologie*. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, France, 478 p.
- BURKE R. (2003). *Getting to know Arcobjects - Programming ArcGIS with VBA*. 1^{re} édition, ESRI Press, États-Unis, 436 p.

- CHOUBERT G. et R. AMBROGGI (1953). *Note préliminaire sur la présence de deux cycles sédimentaires dans le Pliocène marin au Maroc*. Notes et mémoire du service géologique du Maroc, N° 117, Tome 7, Maroc, 72 p.
- ÉDITIONS DU SERVICE GÉOLOGIQUE DU MAROC (ESGM) (1999). *Carte géologique d'Arbaoua, Mechr Bel Ksiri (Échelle 1/50.000)*. Ministère de l'Énergie et des Mines, Rabat, Maroc.
- ESSINK G.H.P.O. (2001). Improving fresh groundwater supply-problems and solutions. *Ocean Coast. Manage.*, 44, 429-449.
- DIRECTION DE RECHERCHE ET DE PLANIFICATION DE L'EAU (DRPE) (1987). *Étude hydrogéologique de la nappe de Rmel (région de Larache, Maroc)*. Rapport technique DRPE, N° 8, 87/DRH/003/SHG, Direction de la région hydraulique du Loukkos, Tétouan, Maroc, 91 p.
- EL HAMIDI M.J., A. LARABI et M. FAOUZI (2016a). Role of human activities on climate change and its impacts on water resources in Morocco. *5^e Colloque International « Environnement et Développement Durable »*, 10-15 octobre 2016, Rabat, Maroc, 8 p.
- EL HAMIDI M.J., A. LARABI et M. FAOUZI (2016b). Impact of climate change on groundwater resources in Morocco: the case of the Loukkos basin. *International Conference Water, Energy and Climate Change (WECC-2016)*, 1-4 juin 2016, Marrakech, Maroc, 2 p.
- EL HAMIDI M.J., A. LARABI, M. FAOUZI et M. SOUISSI (2018). Spatial distribution of regionalized variables on reservoirs and groundwater resources based on geostatistical analysis using GIS: case of Rmel-Oulad Ogbane aquifers (Larache, NW Morocco). *Arab. J. Geosci.*, 11, 1-18.
- ÉCOLE NATIONALE DES SCIENCES GÉOGRAPHIQUES (ENSG) (2003). *Introduction to programming in VBA under ArcGIS*. Centre d'Études et de Recherches en SIG (CERSIG), France, 96 p.
- GUO W. et C.D. LANGEVIN (2002). *User's guide to SEAWAT, a computer program for simulation of three-dimensional variable density groundwater flow*. US Geological Survey, Open-File Report 01-434, Tallahassee (FL), États-Unis, 77p.
- KINUTHIA J., A.J. RODRIGUES et R. OLUOCH (2006). Wildlife SIG: Spatial analysis and visualisation in Masai Mara (Kenya). *Geospatial World*. <https://www.geospatialworld.net/article/wildlife-gis-spatial-analysis-and-visualisation-in-masai-mara/> (consultation le 8 novembre 2018).
- LARABI A. et B. BOUHMADI (2001). *Caractéristiques hydrogéologiques des sites d'étude : Système aquifère de Rmel-Larache, l'exploitation conjointe des eaux de surface et des eaux souterraines dans les nappes côtières (étude comparative entre des cas Marocains et Espagnols)*. Rapport 59/PR/99 de l'action intégrée, de coopération et de recherche entre l'Université de Grenade et l'École Mohammadia d'ingénieurs de Rabat, Espagne, Maroc, 55 p.
- LARABI A., M.J. EL HAMIDI, M. FAOUZI et I. BOUAAMLAT (2016). Modeling the impacts of climate change on the aquifers in Morocco. *7th International Conference on Water the Resources and Arid Environments (ICWRAE 7)*, 4-6 décembre 2016, Riyad, Arabie Saoudite, 10 p.
- MESSAOUD M. (1963). *Rapport hydrogéologique du bassin du Bas Loukkos*. MTPC/DH/DRE, 1^{er} tome, Vol. 2, Maroc, 134 p.
- NAIHA S. (2006). *Développement d'un SIG pour l'aide à la gestion des ressources en eau de la nappe côtière de Sous-Chtouka (Agadir, Maroc)*. Thèse de doctorat, École Mohammadia d'ingénieurs, Maroc, 208 p.
- OFFICE NATIONAL DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE L'EAU (ONEE) (2002). *Renforcement de l'AEP de la ville de Larache - Étude de la qualité de la nappe de Rmel*. Rapport technique ONEE, N° 71-6-0060/1, Maroc, 321 p.
- OFFICE REGIONAL DE MISE EN VALEUR AGRICOLE DU LOUKKOS (ORMVAL) (2014). *Rapport d'activité de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Loukkos*. Rapport technique ORMVAL, Ksar El Kébir, Maroc, 158 p.
- PLAN DIRECTEUR D'AMÉNAGEMENT INTÉGRÉ DES RESSOURCES EN EAU (PDAIRE) (2010). *Analyse et synthèse des connaissances actuelle dans le domaine des ressources eau, Mission 1.1. Ressources en eau souterraines*. Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos, Maroc, 123 p.
- RECENSEMENT GÉNÉRAL DE LA POPULATION ET DE L'HABITAT (RGHP) (2014). Population légale des régions, provinces, préfectures, municipalités, arrondissements et communes du royaume d'après les résultats du RGPH 2014 (12 régions). https://rgph2014.hcp.ma/downloads/Publications-RGPH-2014_t18649.html (consultation le 19 décembre 2018).
- THAUVIN J.P. (1971). *Ressources en eau : le bassin du bas Loukkos, domaines du Rif et du Maroc oriental*. Tome 1, Éditions Service Géologique du Maroc, Rabat, Maroc, 307 p.