



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 335 (2003) 319–326



Géosciences de surface / Hydrologie–Hydrogéologie

Interprétation hydrogéologique de l'aquifère des bassins sud-rifains (Maroc) : apport de la sismique réflexion

Hydrogeological interpretation of the southern Rifean basins aquifer (Morocco): seismic reflection contribution

Lahcen Zouhri ^a, Christian Gorini ^b, Christian Lamouroux ^b, Daniel Vachard ^{c,*},
Mohammed Dakki ^d

^a Centre de calcul et de modélisation de Lens, faculté des sciences Jean-Perrin, université d'Artois, rue Jean-Soubras, BP 18, 62307 Lens cedex, France

^b Laboratoire de géologie structurale et géodynamique, USTL, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France

^c Laboratoire de paléontologie et paléogéographie du Paléozoïque, UMR 8014 CNRS, USTL, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France

^d Office national de la recherche et de l'exploration pétrolière, Rabat, Maroc

Reçu le 30 septembre 2002 ; accepté le 17 février 2003

Présenté par Jean-Paul Poirier

Résumé

L'aquifère du bassin du Rharb est constitué par des matériaux très hétérogènes. L'interprétation des profils obtenus par sismique réflexion réalisés dans cette zone permet de mettre en évidence un dispositif perméable, compartimenté en blocs soulevés et affaissés. Les fossés, identifiés dans la zone septentrionale et méridionale de la région, sont caractérisés par un remplissage plio-quadernaire favorable à l'exploitation hydrogéologique. Deux mécanismes sont responsables de la structuration de l'aquifère plio-quadernaire : la réactivation hercynienne dans la partie méridionale et le glissement gravitationnel des nappes pré-rifaines. Cette réactivation contrôle le sens d'écoulement de la nappe et de l'épaississement des formations aquifères.

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

The aquifer of the Rharb Basin is constituted by heterogeneous material. The seismic reflection interpretation carried out in this area, highlighted a permeable device compartmentalized in raised and subsided blocks. Depressions identified in the northern and southernmost zones are characterized by Plio-Quaternary fillings that are favourable to the hydrogeological exploitation. Two mechanisms contribute to structure the Plio-Quaternary aquifer: the Hercynian reactivation in the southernmost part, and the gravitational mechanism of the Pre-Rifian nappe. The groundwater flow and the aquifer thickening are controlled by this reactivation.

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : LZouhri@netscape.net (L. Zouhri), Daniel.Vachard@univ-lille1.fr (D. Vachard).

Mots-clés : aquifère ; perméables ; sismique ; mécanisme ; réactivation ; gravitationnel ; écoulements souterrains

Keywords: aquifer; permeable; seismic; mechanism; reactivation; gravitational; groundwater flow

Abridged English version

The aquifer of the Rharb Basin is limited by the Rifian Cordillera to the north, and the Mesetian zone to the south (Fig. 1a). The water resources of this area constitute the most important hydraulic potential in Morocco. In the southern part, the groundwater supplies several cities: Rabat, Kenitra, and the industrial capital, Casablanca. Water resources become an economic and social stake (demographic growth) in these areas, where the identification of the permeable zones remains a priority. As a principal example of local applied geology, the geological, lithostratigraphical and structural investigations [8,9] contribute to replace the Rharb Basin in its geodynamical context. The Hercynian accidents are responsible for the structuring of the Palaeozoic basement and control the overlying formations composed of Triassic and Cretaceous deposits [9]. In order to determine the structuring of the Rharb Basin aquifer, this paper used several methods: the seismic reflexion interpretation in association with hydrogeological drillings obtained by the DGH (General Directorate of Hydraulics) and oil wells obtained by the ONAREP (National Office of Research and Petroleum Exploration).

The seismic line R7/2, realized in the Rharb Basin (Fig. 1b), provides the new interpretation as well as the geometry of the aquifer and the groundwater flow.

Former studies of the basin allow us to identify more hydrogeological information [1,2,7,10]. Essentially composed of Plio-Quaternary deposits, the aquifer displays several lithologies: sandstones, sands, limestones, and sandy clays. These deposits rest on a Mio-Pliocene blue marls substrate. The structure of the impermeable was previously regarded as homogeneous, with rare local undulations [2]. In order to understand the distribution of the permeable area, the geological sections have been realized (A, Figs. 1b and 2) according to an N°30 direction. The crossing of this latter with the new seismic section R7 contributes (i) to refine the anterior work [9], (ii) to specify the geometry of the aquifer, in particular in the northern part of the Rharb, (iii) to identify the structures and to deter-

mine a direction of underground flow according to the reconstructed geometry.

The device defined by the analysis of the section (A) reveals a thickening of the Plio-Quaternary sequences from the SSW towards the NNE. Two ditches have been distinguished on the level at MAM1 and the R7/2 (Fig. 2) whose Quaternary filling comprises mainly sandy marls, coquinas, limestones, and sands. These formations can respectively reach 630 and 760 m at the level of the MAM1 and R7/2. Transmissivity values defined in the western zone varied between 2.8×10^{-3} to $1.5 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; those of permeability between 1.8×10^{-4} to $3.8 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. These ditches and their substrate rest either on Cretaceous formations (MAM1), or a Pre-Rifian Complex, which is characterized by a mixture of allochthonous Triassic and Cretaceous deposits affected by internal structures (IS).

The combination of the seismic profile R7 (Fig. 3) and the geological section reveals an aquifer system compartmentalized into horsts and grabens, in which the northern ditch is geometrically relatively identical to that of the southernmost part (Fig. 2). Both are limited by accidents affecting at the same time the Miocene and the Plio-Quaternary. This configuration governs the groundwater flow and allows us to identify the location where the aquifer is thicker. The same structures have been encountered in the eastern part (Fig. 4): the hydrogeologic substrate and the overlying permeable deposits are compartmentalized in raised and subsided zones; the Pre-Rifian Complex (CP) is strongly tectonized, with individualization of internal structures; the Palaeozoic basement is influenced by the Hercynian structures (HS). In the southernmost and northern parts, the structuring of ditches and aquifer is relatively similar, but the controlling mechanisms are different.

In the southern part of the Rharb Basin, the geodynamic study [8,9] shows the reactivation of the Hercynian structures which compartmentalize the Palaeozoic and Triassic basement in half-grabens. These faults are identified from the seismic profile interpretation (Fig. 4). Two great Hercynian faults have

been identified in the area: (i) K2SFZ (Kenitra–Sidi Slimane Fault Zone) with direction N°120E becoming N°90E to the east; (ii) RKFZ (Rabat–Kenitra Fault Zone). These structures, respectively linked to the two great regional accidents of Rabat–Tiflète [6] and Rabat–Agadir [5], might represent the structures generated by the especially normal faulting of the Sheared Zone during the central-Atlantic opening. The individualization of grabens and horsts occurred coevally with the Triassic rifting, when this opening began.

In the eastern part of the Rharb Basin, the development of the Plio-Quaternary basins is characterized by a thickening of the permeable bodies from the south towards the north. The analysis and the interpretation of the piezometric results (1995) and the thickness of the aquifer formations (Fig. 5) show a groundwater flow and the aquifer thickening towards the north and towards the Atlantic Ocean. These two parameters (flow and thickness) are controlled by the Hercynian normal faulting (obvious on the profile of Fig. 4), which compartmentalizes the Plio-Quaternary device (Fig. 2) in horsts and grabens.

In the northern part of the Rharb, the aquifer thickening towards the north and in particular in the ditch, and the structuring of the permeable bodies are caused by the gravitational movement of the Pre-Rifain nappes, and its subsequent stop against the K2SFZ fault. On the other hand, in the southernmost part, this thickening is strongly influenced by the structuring of the Palaeozoic basement (Fig. 4). This device thus results of the reactivation of the Hercynian structures even Caledonian (normal faulting). The Plio-Quaternary aquifer (PQ) is compartmentalized in raised and subsided blocks.

1. Introduction

La reconstitution de la configuration géométrique des systèmes aquifères représente une étape majeure dans la compréhension de leur fonctionnement hydrogéologique. Les structures reconstituées peuvent jouer un rôle dans les relations entre les unités hydrogéologiques et permettent éventuellement de se prononcer sur le sens d'écoulement de la nappe. L'aquifère côtier du bassin du Rharb qui se trouve entre les domaines Rifain et Mésétien (Fig. 1a) est doté d'un potentiel

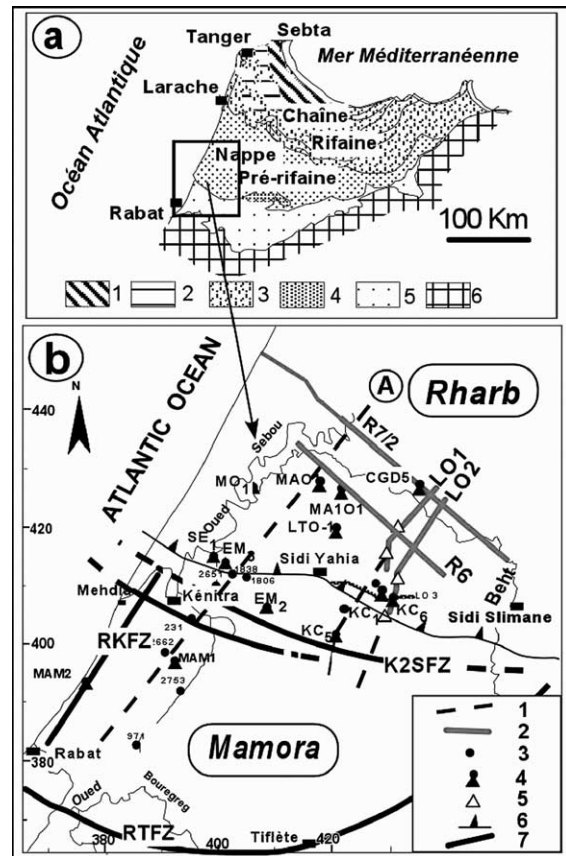


Fig. 1. (a) Domaines structuraux du Nord du Maroc et localisation de la zone étudiée : 1, domaine interne ; 2, unité de flysch ; 3, domaine Maghrébin ; 4, plate-forme d'accrétion ; 5, foredeep ; 6, avant-pays (d'après [3], modifié). (b) Localisation de la section sismique R7/2 et de la coupe géologique A réalisée dans la portion occidentale du bassin du Rharb–Mamora : 1, coupes géologiques ; 2, profils sismiques ; 3, forages hydrogéologiques ; 4, forages pétroliers ; 5, projections sismiques ; 6, front de nappe ; 7, failles. RTFZ : faille de Rabat–Tiflète ; RKFZ : faille de Rabat–Kenitra ; K2SFZ : faille de Kenitra–Sidi Slimane.

Fig. 1. (a) Structural domains of northern Morocco and location of the study area: 1, Internal Domain; 2, Flysch Unit; 3, Maghrebian Domain; 4, Accretionary Wedge; 5, Foredeep; 6, Foreland (after [3], modified). (b) Location of the seismic line R7/2 and of the geological section A realized in the western area of the Rharb–Mamora Basin: 1, geological sections; 2, seismic lines; 3, hydrogeological drillings; 4, oil wells; 5, seismic projections; 6, front of nappe; 7, faults. RTFZ: Rabat–Tiflète faulting zone; RKFZ: Rabat–Kenitra faulting zone; K2SFZ: Kenitra–Sidi Slimane faulting zone.

hydraulique très important à l'échelle du pays. Dans sa portion méridionale, qui correspond à la région

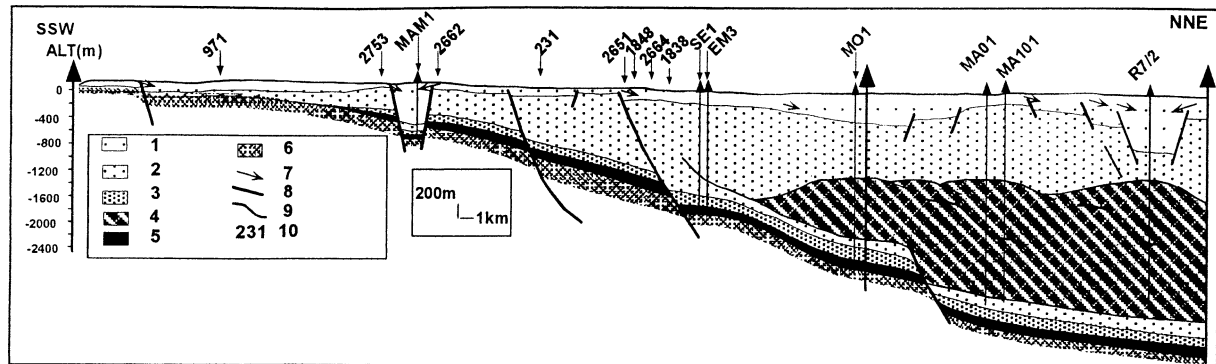


Fig. 2. Structure des fossés plio-quaternaires et des formations sous-jacentes : 1, Plio-Quaternaire ; 2, Miocène supérieur ; 3, Miocène inférieur ; 4, complexe pré-rifain ; 5, Crétacé ; 6, Paléozoïque ; 7, écoulement souterrain ; 8, failles ; 9, structures internes ; 10, forages.

Fig. 2. Structure of the Plio-Quaternary depression and underlying sequences: 1, Plio-Quaternary; 2, Upper Miocene; 3, Lower Miocene; 4, Pre-Rifain Complex; 5, Cretaceous; 6, Palaeozoic; 7, groundwater flow; 8, faults; 9, internal structure; 10, wells.

de la Mamora (Fig. 1b), la nappe alimente conjointement les grandes villes comme Rabat-Salé, Kénitra et Casablanca, la capitale industrielle, détenant 70% des emplois. L'eau devient un enjeu économique et social (croissance démographique) dans ces régions, où l'identification des zones perméables demeure une priorité. Le bassin du Rharb a fait l'objet d'une étude géologique, lithostratigraphique et structurale [8–10], qui a contribué à le replacer dans son cadre géodynamique global. Les accidents hercyniens sont responsables de la structuration du socle paléozoïque et contrôlent le dépôt des formations sus-jacentes triasiques et crétacées [9]. Généralement, les méthodes utilisées pour définir la géométrie des aquifères et de leur substratum sont basées sur des applications de la géophysique électrique [4]. Dans cet article, la structuration de l'aquifère du bassin du Rharb sera définie à partir de l'interprétation d'une nouvelle section sismique réflexion, la **R7** (Fig. 1b), qui, après transformation des vitesses migrées en profondeur, fournit des données nouvelles sur la géométrie du réservoir et sur l'écoulement souterrain. Le calage de ce profil a été établi à partir de forages pétroliers obtenus auprès de l'Onarep (Office national de la recherche et de l'exploration pétrolière, Maroc). L'interprétation des forages hydrogéologiques fournis par la DGH (direction générale de l'Hydraulique, ministère des Travaux publics, Maroc) a servi à déterminer les unités aquifères.

2. Analyse sismique et géométrique du réservoir du bassin

Les travaux effectués dans le bassin ont permis d'acquérir plusieurs informations hydrogéologiques [1,2,7,10]. L'aquifère, essentiellement d'âge plio-quaternaire est composé de divers sédiments : grès, sables, calcaires et argiles sableuses. Ces dépôts reposent sur un imperméable mio-pliocène constitué de marnes bleues. La structure de l'imperméable a été considérée pendant longtemps comme homogène, avec seulement quelques ondulations locales [2]. Afin de mieux comprendre la répartition des zones perméables, nous avons réalisé une coupe géologique (A, Fig. 2) de direction N°30. Sa réalisation est fondée sur les données de forages (hydrogéologiques et pétroliers) et de sismique réflexion. L'intersection de cette dernière avec la nouvelle section sismique **R7** contribue : (a) à affiner les travaux antérieurs [9]; (b) à préciser la géométrie de l'aquifère, notamment de la partie septentrionale du bassin du Rharb; (c) à identifier les structures, et à déterminer un sens d'écoulement souterrain en fonction de la géométrie reconstituée. L'analyse de la coupe (A) montre un dispositif qui se caractérise par un épaissement des séries plio-quaternaires et un approfondissement de leur substratum hydrogéologique du sud-sud-ouest vers le nord-nord-est. On distingue deux fossés au niveau de MAM1 et de R7/2 (Fig. 2), dont le remplissage plio-quaternaire comporte essentiellement des marnes sableuses, des luma-

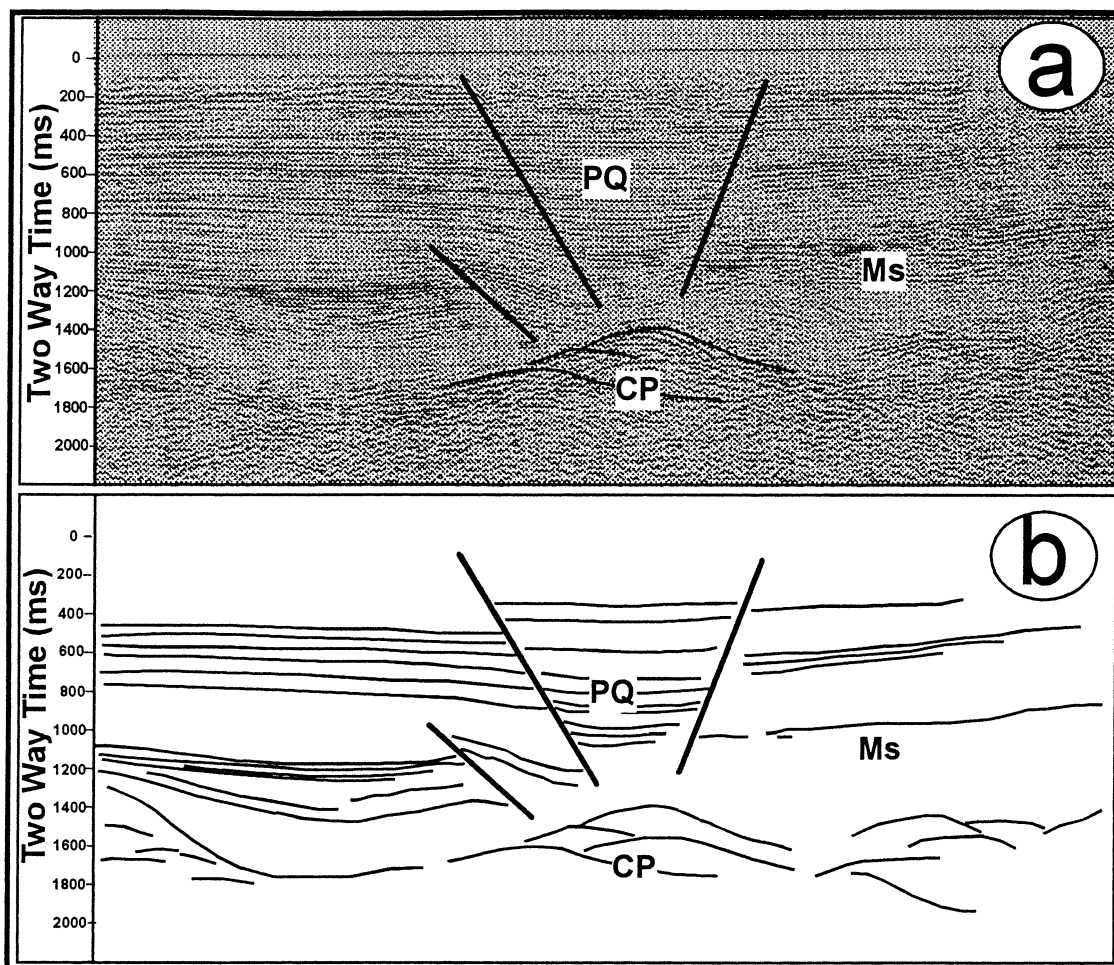


Fig. 3. (a) Profil sismique **R7/2** réalisé dans le bassin du Rharb : **PQ**, aquifère plio-quaternaire ; **MS**, Miocène supérieur ; **CP**, complexe pré-rifain. (b) Interprétation sismique du profil **R7/2** et détail du fossé plio-quaternaire de la section **R7/2**.

Fig. 3. (a) Seismic line **R7/2** realized in the Rharb basin: **PQ**, Plio-Quaternary aquifer; **MS**, Upper Miocene; **CP**, Pre-Rifean Complex. (b) Seismic interpretation of the **R7/2** line and detail of the Plio-Quaternary depression.

chelles, des calcaires sableux et des sables. Ces formations peuvent atteindre respectivement une épaisseur de 630 m (MAM1) et de 760 m (**R7/2**). Les valeurs de la transmissivité déterminées dans la zone occidentale varient entre $2,8 \times 10^{-3}$ et $1,5 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; celles de perméabilité entre $1,8 \times 10^{-4}$ à $3,8 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$.

Ces fossés et leur imperméable hydrogéologique reposent, soit sur des formations crétacées (MAM1), soit sur un complexe pré-rifain, qui se caractérise par un mélange de formations allochtones (triasiques et crétacées) affectées par des structures internes (**IS**).

La combinaison du profil sismique **R7** (Fig. 3) et de la coupe géologique traduit un système aquifère compartimenté en horsts et grabens, dans lequel s'individualise un fossé septentrional relativement identique à celui de la partie méridionale (Fig. 2). Les deux sont limités par des accidents affectant à la fois le Miocène et le Plio-Quaternaire. Comme l'indique cette figure, une telle disposition guide le sens d'écoulement souterrain et conduit à localiser les endroits où l'aquifère devient plus épais. Des structures identiques se rencontrent dans la portion orientale (Fig. 4) : le sub-

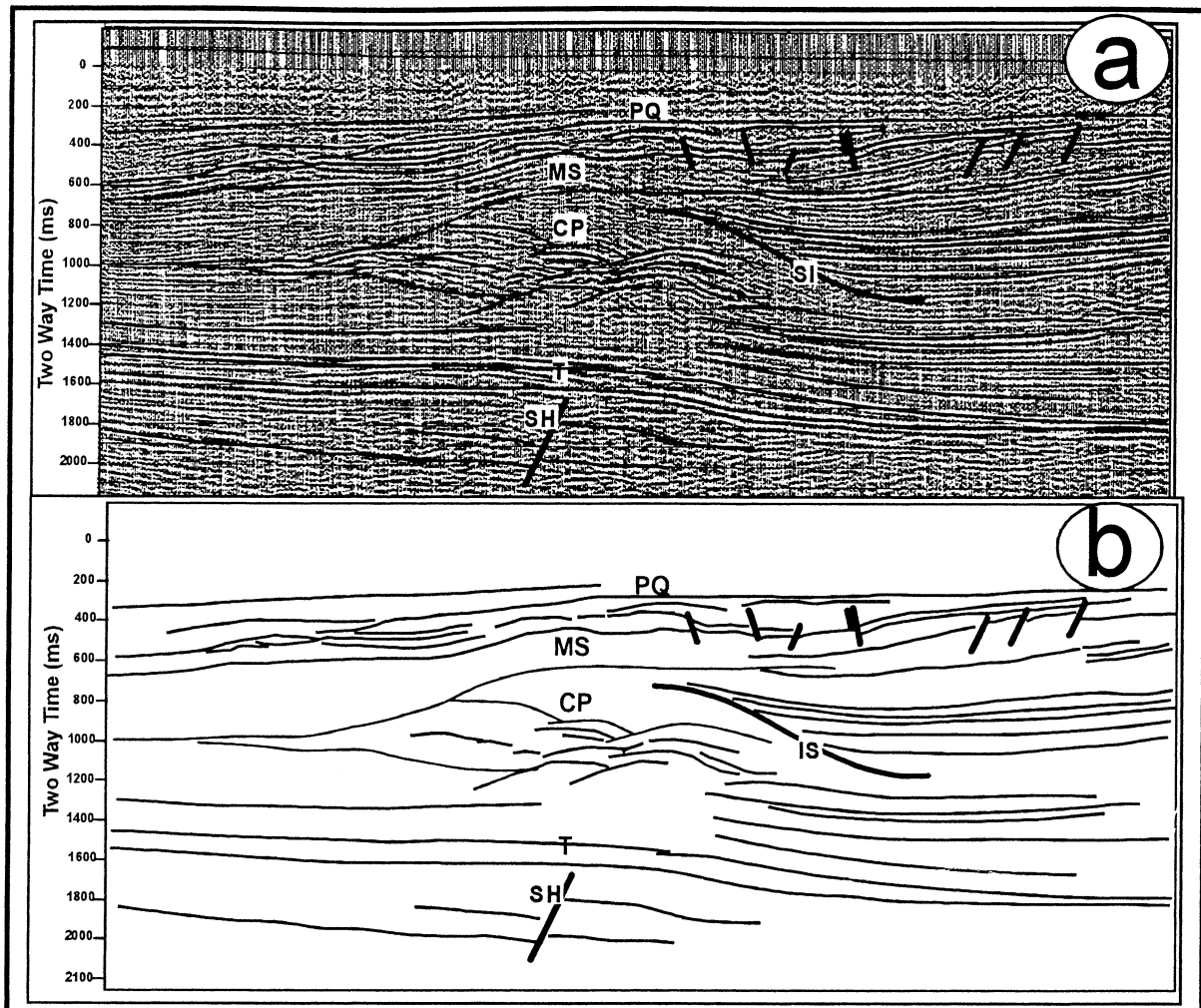


Fig. 4. Structure hercynienne et structuration du substratum hydrogéologique. Profil sismique LO2 (a) et son interprétation (b) : PQ, aquifère plio-quaternaire ; MS, Miocène supérieur ; CP, complexe pré-rifain ; T, Trias ; SH, structure hercynienne ; SI, structure interne.

Fig. 4. Hercynian structure and individualisation of the hydrogeological basement. LO2 seismic line (a) and its interpretation (b): PQ, Plio-Quaternary aquifer; MS, Upper Miocene; CP, Pre-Rifean Complex; T, Triassic; SH, Hercynian structure; SI, internal structure.

stratum hydrogéologique et les formations perméables sus-jacentes sont compartimentés en zones hautes et affaissées ; le complexe pré-rifain (CP) est fortement tectonisé, avec des structures bien individualisées ; le socle paléozoïque est influencé par des structures très anciennes (HS). Les structurations des fossés et de l'aquifère sont relativement identiques (partie méridionale et septentrionale), mais les mécanismes sont différents.

3. Discussion

L'étude géodynamique [8,9] révèle, dans la partie méridionale du bassin, des structures hercyniennes réactivées qui compartimentent le socle paléozoïque et triasique en demi-grabens. Ces accidents sont bien visibles le long du profil sismique (Fig. 4). Deux grandes failles hercyniennes ont été identifiées dans la région : (1) la faille **K2S** (Kénitra–Sidi Slimane), de direc-

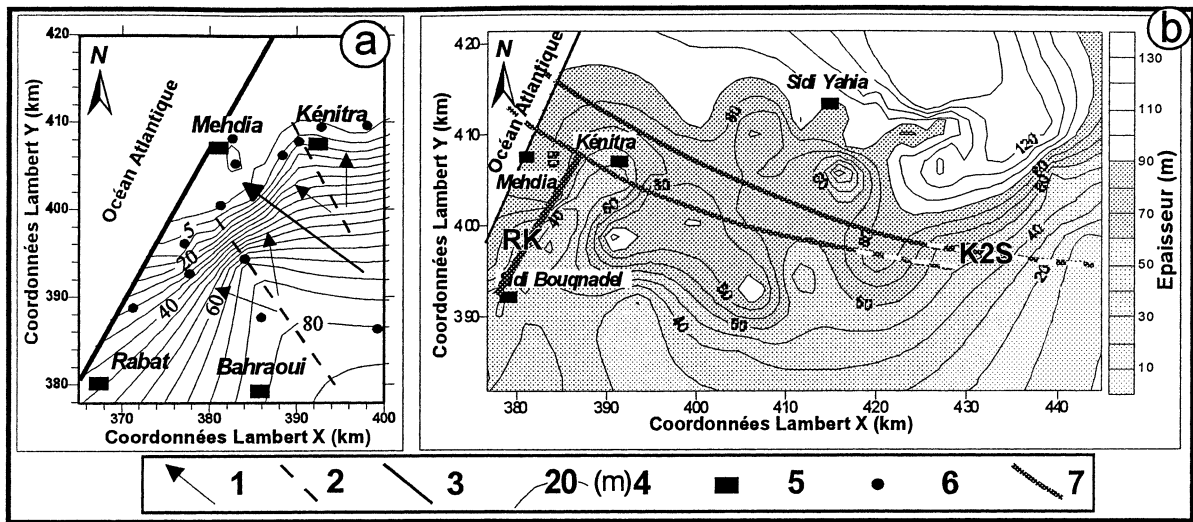


Fig. 5. (a) Carte piézométrique de la nappe réalisée en 1995 (partie méridionale du bassin du Rharb). (b) Distribution spatiale des épaisseurs des formations aquifères : 1, sens d'écoulement ; 2, ligne de partage des eaux ; 3, axe de drainage ; 4, isopiëzes (en mètres) ; 5, villes ; 6, piézomètres ; 7, failles ; RK, Rabat–Kénitra ; K2S, Kénitra–Sidi Slimane.

Fig. 5. (a) Piezometric map realized in 1995 (southern part of the Rharb basin). (b) Spatial distribution of the aquifer thickness: 1, groundwater flow; 2, groundwater dividing; 3, drainage axis; 4, isopiëzes (in metres); 5, cities; 6, piezometers; 7, faults; RK: Rabat–Kenitra; K2S: Kenitra–Sidi Slimane.

tion N°120E devenant N°90E à l'est; (2) la faille RK (Rabat–Kénitra). Ces structures, qui ont été rattachées respectivement aux deux grands accidents régionaux de Rabat–Tiflète [6] et de Rabat–Agadir [5], pourraient représenter des structures engendrées par le jeu surtout normal de la zone cisailée lors de l'ouverture de l'Atlantique central. L'individualisation des grabens et des horsts s'est faite lors du *rifting* triasique par lequel a débuté cette ouverture. Dans la partie méridionale du Rharb, le développement des bassins plio-quaternaires se caractérise par un épaississement des formations aquifères du sud vers le nord. À partir des résultats d'une campagne piézométrique et des épaisseurs des formations perméables appartenant à la partie méridionale, la Fig. 5 traduit un écoulement de la nappe souterraine et un épaississement de l'aquifère vers le nord et vers l'océan Atlantique. Ces deux paramètres (écoulement et épaisseur) sont contrôlés par le rejeu des accidents hercyniens (visibles sur le profil de la Fig. 4) en failles normales, qui compartimentent le dispositif plio-quaternaire (Fig. 2). En revanche, dans la partie septentrionale du Rharb, le développement des bassins plio-quaternaires est provoqué par le mouvement gravitationnel de la nappe pré-rifaine,

qui vient buter contre la faille K2S. Le dispositif de la partie méridionale résulte donc d'une réactivation des structures hercyniennes, voire calédoniennes (rejeu normaux). L'aquifère plio-quaternaire (PQ) est donc compartimenté en blocs soulevés et affaïsés.

4. Conclusion

Dans le bassin du Rharb (Maroc), la réactivation hercynienne s'est enregistrée dans les séries perméables plio-quaternaires de sa partie méridionale, appelée la Mamora. L'influence des structures anciennes est bien visible sur les sections sismiques et géologiques, qui révèlent également un aquifère compartimenté en horsts et grabens. Dans la partie septentrionale du bassin, les mouvements gravitationnels de la nappe pré-rifaine contribuent à la structuration de l'aquifère plio-quaternaire, en finissant par créer un fossé qui possède les mêmes caractéristiques que celui de la zone méridionale : deux mécanismes complètement différents, mais une géométrie presque identique. Le dispositif en blocs contrôle la répartition des formations perméables et l'écoulement souterrain (Fig. 3). Les valeurs de perméabilité, qui montrent une

répartition très hétérogène, devront faire l'objet d'un examen détaillé et être reliées précisément aux structures géologiques de la région. La campagne piézométrique [10] a montré un écoulement vers le nord-est et vers l'océan Atlantique. Les structures géologiques, qui fragmentent l'aquifère de la région, ont une double influence directe sur l'écoulement souterrain et sur l'épaississement des séries perméables.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier J. Angelier (université Paris-6) et un rapporteur anonyme pour leurs critiques constructives. Nos remerciements vont également à la direction de l'Onarep (Maroc) et de la DGH (Rabat) pour leur appui renouvelé.

Références

- [1] M. Combes, Le bassin du Rharb–Mamora et les petits bassins septentrionaux des oueds Dradère et Soueire, Ressources en eau du Maroc, tome 2, Plaines et bassins du Maroc atlantique, Serv. Géol. Maroc, 1975, pp. 93–128.
- [2] DGH, Forages et coupes hydrogéologiques de la Mamora, Planche n° 1, documents inédits, Rabat, Maroc, 1995.
- [3] J. Flinch, P.R. Vail, Plio-Pleistocene sequences stratigraphy and tectonics of the Gibraltar arc, in : Mesozoic and Cenozoic sequence stratigraphy of European Basins, SEPM Spec. Publ., Vol. 60, 1998.
- [4] C. De Stadelhofen Meyer, Applications de la géophysique aux recherches d'eau, Tech. & Doc. Lavoisier, Paris, 1991, 183 p.
- [5] A. Piqué, D. Jeannette, A. Michard, The Western Meseta Shear Zone, a major and permanent feature of the Hercynian belt in Morocco, *J. Struct. Geol.* 1–2 (1980) 55–61.
- [6] A. Piqué, La zone de Rabat–Tiflet (Meseta marocaine septentrionale). Sa place dans l'ensemble des noyaux paléozoïques de la Méditerranée occidentale, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 295 (1982) 263–266.
- [7] J.-P. Thauvin, Monographie hydrogéologique de la Mamora, Notes Mém. Serv. Géol. Maroc, 1964, 195 p.
- [8] L. Zouhri, C. Lamouroux, C. Buret, La Mamora, charnière entre la Meseta et le Rif. Son importance dans l'évolution géodynamique post-paléozoïque du Maroc, *Geodin. Acta* 14 (6) (2001) 361–372.
- [9] L. Zouhri, C. Lamouroux, D. Vachard, A. Piqué, Les corps perméables plio-quadernaires de la Mamora (Maroc). Géométrie et influence structurale, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 332 (2001) 1–4.
- [10] L. Zouhri, Structure et modélisation hydrodynamique de l'aquifère de la Mamora (Maroc), thèse de 3^e cycle, université Lille-1, 2000, 218 p.