



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 1111–1120



Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

Apports de la méthode sismique réflexion haute résolution à l'identification des structures profondes des formations tertiaires en Médoc (Gironde, France) : implications hydrogéologiques

François Larroque*, Alain Dupuy

Institut EGID, université Bordeaux-3, 1, allée Daguin, 33607 Pessac, France

Reçu le 15 décembre 2003 ; accepté après révision le 26 avril 2004

Présenté par Ghislain de Marsily

Résumé

Dans la région de Bordeaux (France), l'aquifère oligocène est une cible potentielle pour l'alimentation en eau potable. Une campagne de sismique réflexion haute résolution et la réalisation de plusieurs forages de reconnaissance ont permis de préciser la géométrie de cet aquifère et, plus généralement, des aquifères tertiaires médocains. Il ressort principalement de ces nouveaux résultats qu'une déformation tectonique souple a mis en place deux zones de dépôts distinctes, au sein desquelles l'aquifère oligocène présente des caractéristiques hydrogéologiques très différentes (épaisseur, nature, propriétés hydrauliques, etc.). La présence d'une zone de lacune sur une aire importante amène à repenser les schémas hydrogéologiques locaux en vue d'une exploitation intensive de cette ressource. **Pour citer cet article : F. Larroque, A. Dupuy, C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

High-resolution seismic reflection contribution to the identification of deep Tertiary formations in Medoc (Gironde, France): hydrogeological implications. Near Bordeaux (France), the Oligocene aquifer is a potential target for drinking water supply. A high-resolution seismic campaign and several exploration wells helped to clarify the geometry of this formation and, as a consequence, the Medoc Tertiary aquifers. The major information extracted from these new data is the existence of a soft deformation inducing two different deposit areas, showing different hydrogeological characteristics (thickness, type, hydraulic properties, etc.). The presence of an erosional gap area affecting the Oligocene formations lead us to propose a new image of groundwater flow in the area, in the context of a predicted intensive exploitation of this resource. **To cite this article: F. Larroque, A. Dupuy, C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : hydrogéologie ; aquifère ; Oligocène ; sismique réflexion ; Médoc ; France

Keywords: hydrogeology; aquifer; Oligocene; seismic reflection; Medoc; France

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : larroque@egid.u-bordeaux.fr (F. Larroque).

Abridged English version

Near Bordeaux (Gironde, France), groundwater is the main supply for drinking water. For this reason, the confined Eocene aquifer has been intensely exploited since the beginning of the century. However, in response to a new management policy, new potential resources have to be studied to protect the Eocene resource in terms of quantity and quality. The Oligocene aquifer, shallower than the Eocene one, appeared as an interesting target able to produce enough water for a good-quality supply. The Medoc area appeared as a potential exploitation area. However, former studies of the geological formations in this region were not sufficient to give an accurate image of the hydrogeological circulation. The estimation of the impact of large withdrawals by the potential new exploitation requires a good knowledge of the reservoir geometry and an estimation of the relations between the different aquifers of the complex multilayered Tertiary system. The relations between tectonics events and sedimentation phases had not been studied in this region. The aim of this study is therefore to better understand the subsurface deposits structure, in view of the geometrical structure. It is fundamental to prepare the future hydrogeological surveys that will be carried out in the region, by providing an accurate view of the sedimentary deposits shape. To reach this objective, six high-resolution seismic reflection lines were made, leading to a total distance of 21 km. Four deep wells were drilled and used for seismic and stratigraphic correlations (Fig. 1).

The Oligocene aquifer is a part of the Tertiary multilayered North-Aquitaine aquifer system. Resting on Mesozoic formations, this complex system is limited by two major folds, one of Armorican northeast direction and one southward, of Pyrenean east–west direction; it is made of the important Tertiary sedimentation [1].

The Tertiary aquifer succession in the area is composed, from the deepest to the shallowest part, by (1) the Eocene aquifer, formed by sandy limestone and nummulitic sands [13], overlaid by a marly aquiclude, (2) the Oligocene limestone aquifer, here called ‘Calcaire à Astéries’ formation [8], (3) the Miocene sandy limestone aquifer formations, and (4) Plio-Quaternary formations, made of gravels, sands and clays, coming from Pliocene fluvial sediments.

From the tectonic point of view, the layers present a small regional dip, in the order of 0.1° . However, the studied area is located in the NW–SE extension of the ‘Bordeaux Fault’. This well-known structure in the vicinity of the City of Bordeaux influenced the sedimentation during the Mesozoic. Pyrenean deformations induced reactivation of this fault from the Eocene to the end of the Oligocene [12]. On the seashore, this fault was also identified in the Jurassic formations, but the deformations during Tertiary times appear to be mainly soft [3]. Between Bordeaux and the seashore, on the study area, the influence of this structure is not well known, but the comprehension of its impact on Tertiary deposits is fundamental to understand the hydrogeological setting.

The study of the seismic lines made it possible to build the hydrogeological log of the area. We can identify: the Plio-Quaternary formation (R1), the Miocene aquifer (R2), the Miocene aquiclude (E2), the Oligocene aquifer (R3), the Oligocene aquiclude (E3), and finally the Eocene calcareous aquifer (R4a), sometimes separated from another sandy aquifer (R4b) by a thin marly formation.

Two main compartments can be distinguished. The seismic line PB located in the northern compartment shows a thin Oligocene aquifer (approximately 30 m thick). The facies observed during well drilling showed fracturing and karstification features. The Oligocene aquifer in this northern compartment is in direct hydraulic contact with the overlying Miocene aquifer. The second body, illustrated by seismic lines PD and PC, shows a well-developed Oligocene reservoir 80 m thick, separated by an important aquiclude E2 from the upper aquifer R2. The Oligocene facies are mainly formed by limestone, with marly intercalated beds. The contact between the two compartments, shown on seismic lines PMe and PCo, occurs with a strong dipping of the Tertiary formations. However, no brittle deformation can be observed. The expression of the extension of the ‘Bordeaux Fault’ in the Medoc area is a strong fold, delimiting two deposit surfaces and inducing differentiation phenomena.

In the northern compartment, an anticline structure, appearing on the seismic line PCo (Fig. 2) induced a reduction of the Oligocene limestone deposits to a pinching out of the reservoir and to a lateral lithological change (clay formations). The uplift of Tertiary beds is pointed out by the seismic line PA

(Fig. 3), showing the uplift of Eocene formations near the surface. This fact is confirmed by the study of some outcrops in the vicinity [6]. Moreover, the Eocene aquiclude is affected here by several secondary faults leading to a total offset of 70 m. If the existence of this anticline was known [7], the gap of the Oligocene aquifer is a new finding. The tectonic events affecting the Eocene formations agree with the vision of a faulted and tilted block [7,14], limited by a secondary fault, as suggested by the morphostructural analysis [15].

The combination of the seismic profiles and exploration wells display the structure of the Tertiary deposits in the central Medoc area. Previous work pointed out the influence of the western extension of the 'Bordeaux Fault' on the Oligocene and Miocene deposits [2,3]. However, it appears today that this influence only generates soft deformations in Oligocene deposits, without discontinuities in the formations. This structure probably corresponds to the damping of a deeper normal fault affecting Mesozoic deposits, as observed on the seashore. Miocene formations rest 'onlap' on the Oligocene palaeotopography induced by this deformation.

Fig. 4 summarises the main features of the geological formations and associated hydrogeological characteristics. The southern unit is formed of a thick Oligocene aquifer, more than 80 m thick. The lower aquiclude, mainly made of marly material, is well developed, around 30 m thick. The upper aquiclude is a good confining unit, close to 30 m thick. By contrast, the northern unit is characterized by a very thin Oligocene aquifer, thinner than 30 m, in hydraulic connection with the upper aquifers. Limestones are affected here by a high level of fracturing and perhaps by some karstic events. This karstification phenomenon is well known east of the Garonne River [7,9,12] and locally in the northeast of the study area [4]. The hydrogeological implications are important, because the hydraulic connection with the Miocene aquifer may allow a greater storage capacity in the Oligocene aquifer, needed in case of intensive draughts, but imply a vulnerability problem of the supply wells. The Castelnau–Medoc anticline structure limits the Oligocene transgression and reduces considerably the thickness of the Oligocene beds, probably removed by ante-Miocene erosion to a total gap.

The use of seismic-reflection profiles and of exploration wells is helpful for an accurate estimation of the geometry of geological bodies, as demonstrated by previous work [11,16]. The need for such a tool clearly appears when the tectonic events are of poor amplitude and not easily detectable by classical geological investigations. The results of this survey should be useful for building the image of the future groundwater flow in the area.

1. Introduction

Dans la région de Bordeaux (Aquitaine, France), les eaux souterraines constituent la part essentielle de la ressource en eau potable. À ce titre, l'aquifère captif éocène est particulièrement exploité depuis le début du XX^e siècle. Cette nappe a particulièrement été étudiée dans la région de Bordeaux, en partie grâce aux nombreux forages d'exploitation. Toutefois, les nouveaux instruments réglementaires relatifs à la protection et à la gestion des eaux souterraines ont conduit à une réorientation de la politique d'exploitation des nappes. Un programme de recherche de nouvelles ressources, alternatives à l'exploitation de l'aquifère éocène, a été initié. L'aquifère oligocène, déjà fortement sollicité, est apparu comme une cible potentielle susceptible de fournir des débits exploitables intéressants. La zone médocaine pourrait a priori constituer une aire d'exploitation envisageable. Les connaissances géologiques et hydrogéologiques sont cependant localement trop fragmentaires pour proposer un modèle hydrogéologique susceptible de retranscrire avec fidélité l'impact de nouveaux prélèvements sur les ouvrages d'exploitation existants et sur les relations entre les différents aquifères qui composent ce système multicouche complexe. Les relations entre les phénomènes tectoniques, les phénomènes sédimentaires et leur impact sur la géométrie des corps aquifères n'avaient jusqu'ici pas été étudiées dans la partie centrale du Médoc. Ce travail vise à préciser ces structures de dépôts dans cette région, comme base préalable à l'élaboration de schémas hydrogéologiques précis, dans une optique d'exploitation intense de cet aquifère. À cet effet, l'utilisation des méthodes géophysiques de sismique réflexion haute résolution, alliée à des forages de reconnaissance, est apparue comme une solution pertinente, étant donné la profondeur des aquifères et

la précision nécessaire pour l'élaboration d'un modèle géométrique correct.

2. Cadre géologique

En Gironde, l'aquifère oligocène fait partie du système aquifère multicouche tertiaire nord-aquitain. Ce complexe, comprenant les aquifères éocène, oligocène et miocène, repose sur des assises mésozoïques, reconnues à la faveur des forages de reconnaissance pétroliers. Ces assises sont plissées par deux anticlinaux majeurs résultant des déformations pyrénéennes au Paléogène : l'anticlinal dit « de Jonzac » au nord-est, de direction armoricaine préexistante NW–SE, et l'anticlinal dit de « Villagrains Landiras » au sud, de direction pyrénéenne WNW–ESE. Ces deux structures majeures (Fig. 1) encadrent le synclinal girondin et son prolongement médocain, siège d'une importante sédimentation tertiaire [1].

Ces dépôts tertiaires présentent une extension géographique importante et correspondent à des cycles de variation du niveau de base d'amplitudes variables selon les périodes géologiques. Les dépôts marins transgressifs occupent toujours le domaine occidental, alors que les régions orientales sont le siège de dépôts continentaux et fluviaux. Les faciès rencontrés peuvent, de ce fait, être très variables.

Globalement, l'Éocène est marqué par une entité centrale aquifère, constituée, pour la zone d'étude, de sables et de calcaires gréseux du sommet de l'Éocène inférieur à la base de l'Éocène supérieur [13], alors que les assises, formant l'éponte de l'aquifère, sont constituées de séries marneuses de l'Éocène inférieur, incluant parfois des nummulites. La partie supérieure de l'aquifère correspond à un domaine plus continental, représenté localement par des calcaires lacustres de l'Éocène moyen à supérieur. Cette tendance régressive s'accroît par la suite, aboutissant à l'installation d'une sédimentation argileuse continentale. Cette unité argileuse forme une éponte vis-à-vis des formations aquifères sus-jacentes, connues sous le nom de « calcaires à Astéries », nom générique pour les dépôts calcaires rupéliens synchrones de ces formations identifiées à l'est de la Garonne [8]. Le sommet de cette série carbonatée est marqué par une sédimentation plus marneuse régressive, mal datée, mais représentant probablement l'Oligocène supérieur, voire la

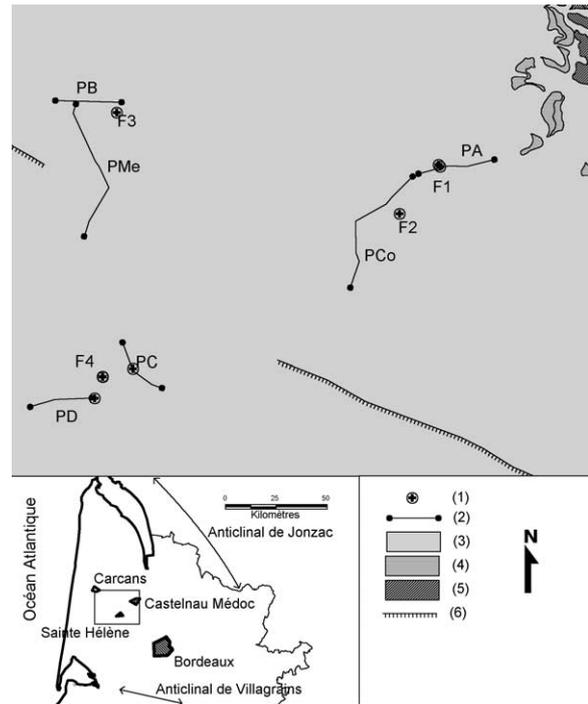


Fig. 1. Schéma géologique et localisation géographique des investigations réalisées dans le secteur médocain. 1. Sondage profond. 2. Profil de sismique réflexion haute résolution. 3. Recouvrement plio-quadernaire : sable et graviers argileux. 4. Affleurements oligocènes : argile et calcaire bioclastique. 5. Affleurements éocènes : marne et calcaire gréseux. 6. Prolongement occidental de la « faille de Bordeaux ».

Fig. 1. Geological sketch and geographical location of the investigations made in the Medoc area. 1. Deep Borehole. 2. High-resolution reflection seismic line. 3. Plio-Quaternary recovering terrains: argillaceous sands and gravels. 4. Oligocene outcrops: marl and bioclastic limestone. 5. Eocene outcrops: marl and sandy limestone. 6. Western extension of the 'Bordeaux Fault'.

base du Miocène inférieur. Au-dessus, deux épisodes transgressifs aquitainien et burdigalien–langhien vont contrôler l'installation d'une série carbonatée plus gréseuse, localement très fossilifère (faluns). Cette série marine est recoupée par une surface d'érosion, sur laquelle se développent les formations détritiques continentales du Plio-Quaternaire [5].

Du point de vue tectonique, les couches sont très peu déformées, présentant un pendage régional de l'ordre de $0,1^\circ$. La zone étudiée se situe dans le prolongement d'une des branches NW–SE de la faille dite « de Bordeaux ». Cette structure bien identifiée au sud-est, vers Bordeaux, joue un rôle important

dans la sédimentation, dès le Secondaire. Elle rejoue ensuite lors des mouvements pyrénéens contrôlant dès lors la sédimentation depuis l'Éocène moyen, jusqu'au Miocène. Un rejeu vertical post-Miocène de l'ordre de 40 m s'observe dans les séries du Miocène inférieur des environs de Bordeaux entre les deux rives de la Garonne [12]. Dans le prolongement nord-est de cet accident, au voisinage du littoral atlantique sur la commune de Carcans, deux forages pétroliers ont montré l'existence d'une faille affectant les séries jurassiques, appelée « faille de Carcans ». L'étude des formations tertiaires montre le jeu synsédimentaire de cette faille, qui induit des variations d'épaisseur importantes dans les séries anté-Miocène [3].

Entre le littoral et Bordeaux, l'expression de cette structure est mal connue, notamment dans la partie centrale du Médoc. Cette déformation, si elle existe localement, ne peut être négligée dans l'étude des formations tertiaires. La détermination de son rôle sur les modalités de dépôt, tout comme l'estimation de son influence sur les formations aquifères associées, constitue l'un des objectifs de cette étude.

3. Méthodologie

Lors de la phase d'acquisition de données, six profils de géophysique sismique « haute résolution » ont été réalisés par le bureau d'études Geolithe, à la demande du Syndicat mixte d'études et de gestion des eaux de la Gironde (Smegreg). Le linéaire total prospecté est de 21 km, se répartissant comme suit : deux profils de 2500 m, deux profils de 3000 m et deux profils de 5000 m (Fig. 1). La sismique « haute résolution » a été réalisée à l'aide d'un vibreur Mertz 22, couplé à un dispositif Geometrics de type Smartseis R48 pour l'acquisition. Les fréquences de vibrations, variant linéairement, étaient comprises entre 30 et 150 Hz.

Parallèlement à l'acquisition sismique, quatre forages (F1 à F4) de différentes profondeurs (150 à 350 m) ont été implantés pour caler la succession lithologique de chaque profil. Une diagraphie de vitesse sonique a été réalisée sur chaque ouvrage. La migration temps-profondeur a été réalisée à partir de ces données et la résolution finale des profils migrés est comprise entre 5 et 10 m. Une analyse de stratigraphie sis-

mique séquentielle est en cours de réalisation, mais n'a pas été incluse dans cette étude.

4. Résultats et interprétations

4.1. Profils de géophysique sismique et forages de reconnaissance

L'interprétation des différents profils géophysiques a permis de retrouver les principales unités hydrogéologiques du système multicouche tertiaire nord-aquitain. Les coupures stratigraphiques ont été réalisées à partir de l'analyse pétrographique et micro-paléontologique des déblais de forage. La succession générale des ensembles hydrogéologiques sur la zone d'étude a ainsi pu être établie comme suit : formations aquifères plio-quadernaires (R1), formations aquifères miocènes (R2), éponte miocène (E2), formations aquifères oligocènes (R3), éponte oligocène (E3) et, enfin, les formations aquifères éocènes, où l'on peut parfois distinguer la partie calcaire de l'Éocène supérieur (R4a) de la partie plus sableuse de l'Éocène moyen (R4b).

L'étude des différents profils obtenus par méthode sismique met en évidence la variabilité spatiale des formations aquifères tertiaires. Deux grands compartiments peuvent cependant être distingués. Dans le compartiment nord, le profil PB suggère un aquifère oligocène R3 de faible épaisseur (25–30 m), s'épaississant vers l'ouest. L'observation des déblais de forage de l'ouvrage F3 montre, pour ce réservoir, des calcaires micro-bréchiques cristallins. La présence de pertes totales lors de la foration renforce l'idée d'un degré d'ouverture des fissures notable, avec des phénomènes de dissolution. L'aquifère oligocène est, dans cette zone, en contact direct avec les formations aquifères calcaires miocènes sus-jacentes. Dans le compartiment sud, les formations oligocènes R3 sont bien individualisées, avec une épaisseur de l'ordre de 80 m sur les profils PC et PD. Les formations oligocènes R3 sont bien individualisées, d'une épaisseur de l'ordre de 80 m. Les faciès rencontrés dans le forage de reconnaissance F4 sont essentiellement calcaires, avec toutefois des intercalations plus marneuses. Cet aquifère est isolé de l'aquifère supérieur miocène R2 par une éponte marneuse E2 de 20 m, et de l'aquifère in-

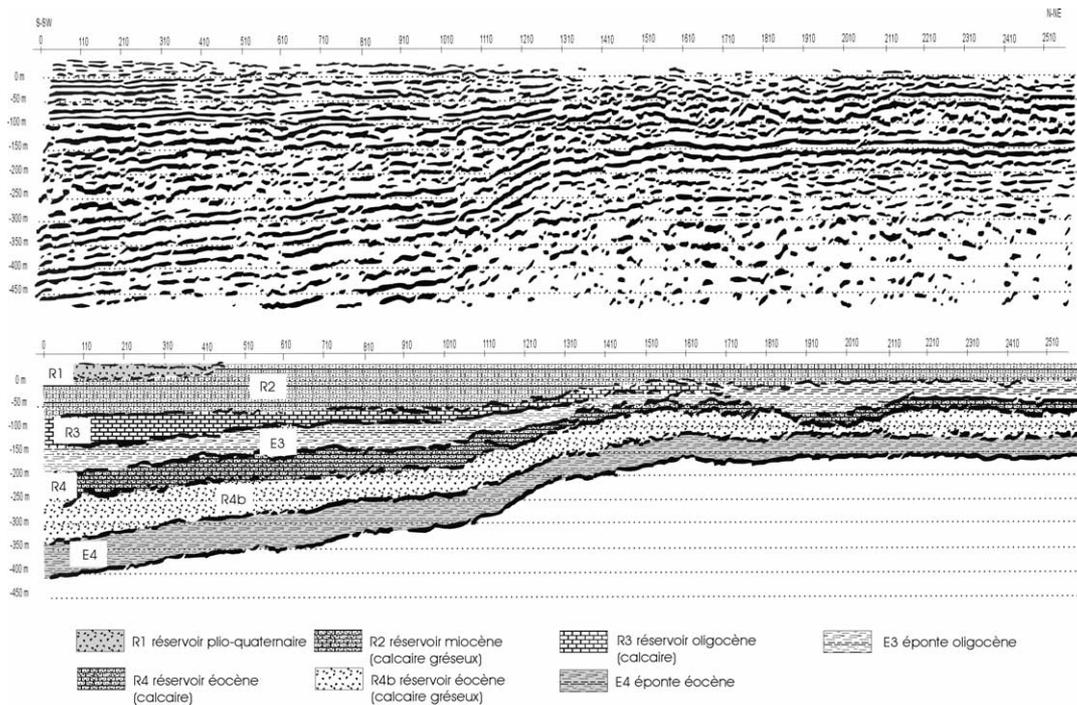


Fig. 2. Interprétation du profil sismique PCo. **R1** = aquifère plio-quaternaire sableux, **R2** = aquifère miocène calcaire, **R3** = aquifère oligocène calcaire, **E3** = éponte oligocène, **R4** = aquifère calcaire éocène, **R4b** = aquifère sableux éocène, **E4** = éponte éocène.

Fig. 2. Seismic line PCo interpretation. **R1** = Plio-Quaternary sandy aquifer, **R2** = Miocene calcareous aquifer, **R3** = Oligocene calcareous aquifer, **E3** = Oligocene clay boundary layer, **R4** = Eocene calcareous aquifer, **R4b** = Eocene sandy aquifer, **E4** = Eocene marly boundary layer.

férieur éocène R4 par une éponte E3, constituée par un complexe marneux de 30 m d'épaisseur.

La liaison entre ces deux compartiments est mise en évidence le long des profils PCo et PMe. Ils montrent un approfondissement et une augmentation d'épaisseur des formations tertiaires vers le sud-ouest. Les couches sédimentaires y présentent localement un pendage anormalement élevé (proche de 5°). Toutefois, aucune structure cassante n'est visible. Le passage du compartiment nord au compartiment sud correspond donc à une flexure.

Dans la partie méridionale du compartiment nord, le profil PCo (Fig. 2) montre que le réservoir oligocène R3 est en contact direct avec le réservoir miocène R2. Dans le forage de reconnaissance F2, le réservoir oligocène est constitué par une faible épaisseur (15 m) de calcaires fissurés. Ici encore, la présence de pertes de fluide de forage renforce l'idée d'un taux d'ouverture important des fissures. Dans la partie centrale du profil PCo apparaît une structure anticlinale, qui s'accom-

pagne d'une réduction de l'épaisseur des dépôts calcaires oligocènes. Le réservoir oligocène R3 disparaît sur le sommet de cette structure anticlinale, où les calcaires passent latéralement à une mince série argileuse imperméable. Cette remontée des terrains tertiaires se poursuit vers le nord-est le long du profil PA (Fig. 3), où l'on note la remontée des formations éocènes vers la surface, fait confirmé par l'étude des affleurements locaux au droit du dôme de Castelnaud-Médoc [6]. De plus, le réflecteur puissant correspondant au passage des calcaires gréseux éocènes aux marnes éocènes (E4) est ici affecté par une série de six failles, dont le rejet cumulé est de l'ordre de 70 m. Si l'existence de la structure antiforme de Castelnaud-Médoc était un fait déjà connu [7], la disparition des terrains aquifères oligocènes sur son flanc sud-ouest est un élément nouveau. La présence d'une tectonique importante affectant localement les formations éocènes confirme par ailleurs les hypothèses émises par certains auteurs [7, 14], qui décrivent cette structure comme un comparti-

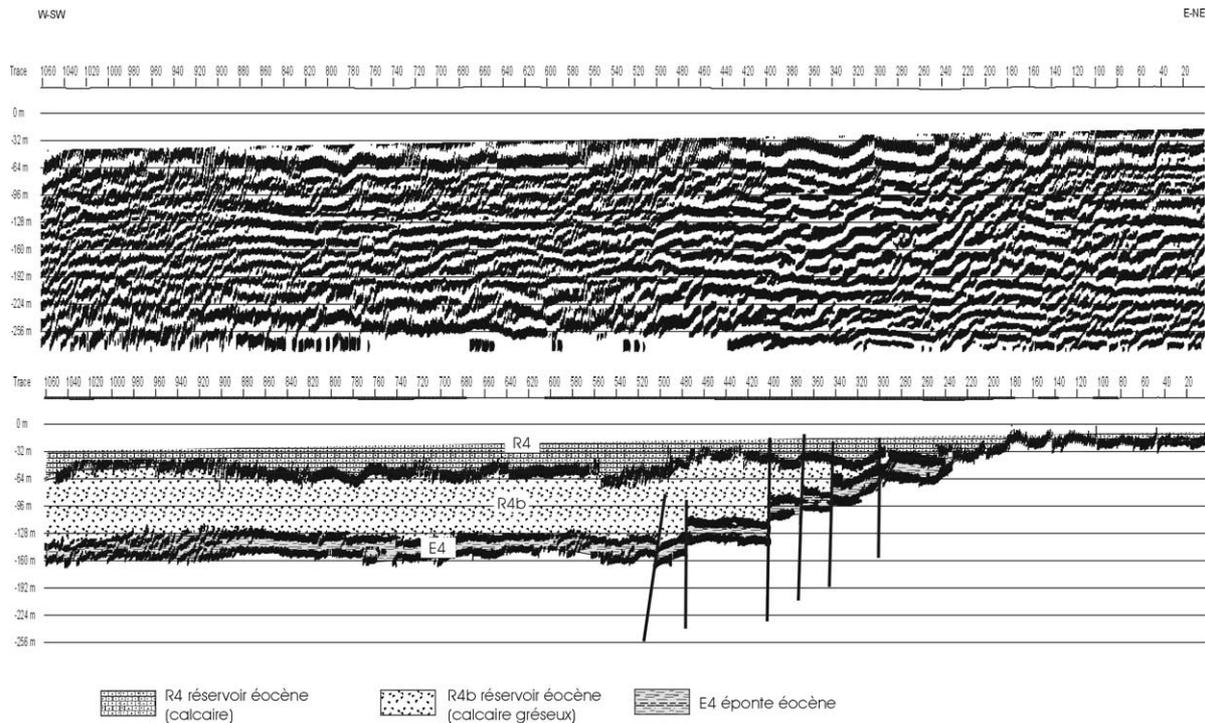


Fig. 3. Interprétation du profil sismique PA. **R4** = aquifère éocène calcaire, **R4b** = aquifère éocène sableux, **E4** = éponte éocène.

Fig. 3. Seismic-line PA interpretation. **R4** = Eocene calcareous aquifer, **R4b** = Eocene sandy aquifer, **E4** = Eocene marly boundary layer.

ment faillé et basculé, limité au nord par une deuxième faille, suggérée par l'analyse morphostructurale [15].

4.2. Structure de l'aquifère oligocène

L'étude combinée des profils sismiques et des sondages de reconnaissance a permis d'affiner la géométrie de l'aquifère oligocène et de ses épontes associées. Les études précédentes [10] ne laissaient pas présager d'influence tectonique notable sur la géométrie de ces formations. Certains travaux avaient pourtant mis en évidence l'existence, sur le littoral, de variations d'épaisseur et de faciès dans les séries miocènes, interprétées alors comme liées au jeu de failles normales [2,3]. Toutefois, le prolongement de ces accidents dans la zone d'étude n'avait pas pu être précisé.

Notre étude des sections sismiques n'a pas révélé d'accident cassant majeur affectant l'Oligocène. Toutefois, les géométries observées dans les séries oligo-miocènes attestent la présence d'une flexure tectonique non négligeable. En conclusion, le jeu cassant

qui affecte les séries oligocènes et même miocènes le long de la faille de Bordeaux, au voisinage de l'agglomération, se transforme vers le nord-ouest en une simple flexuration synsédimentaire oligo-miocène, qui ne provoque pas de véritables discontinuités dans les séries tertiaires. Cette structure correspond probablement à un amortissement du jeu de la faille normale en profondeur mise en évidence dans les formations mésozoïques sur le littoral. L'analyse des séquences de dépôts miocènes dans les forages montre qu'elles reposent en *onlap* sur la paléotopographie oligocène résultant de cette déformation.

La Fig. 4, composite, schématise ces relations. L'aquifère oligocène est bien développé (80 m) dans le compartiment sud. L'éponte inférieure oligo-éocène présente une épaisseur de plus de 30 m et l'éponte supérieure oligo-miocène, plus homogène, présente une structuration moindre, du fait de l'amortissement progressif de la déformation. Sa puissance moyenne avoisine 20 m. A contrario, le compartiment nord est caractérisé par une formation oligocène peu épaisse (20–30 m), vraisemblablement en liaison hydraulique di-

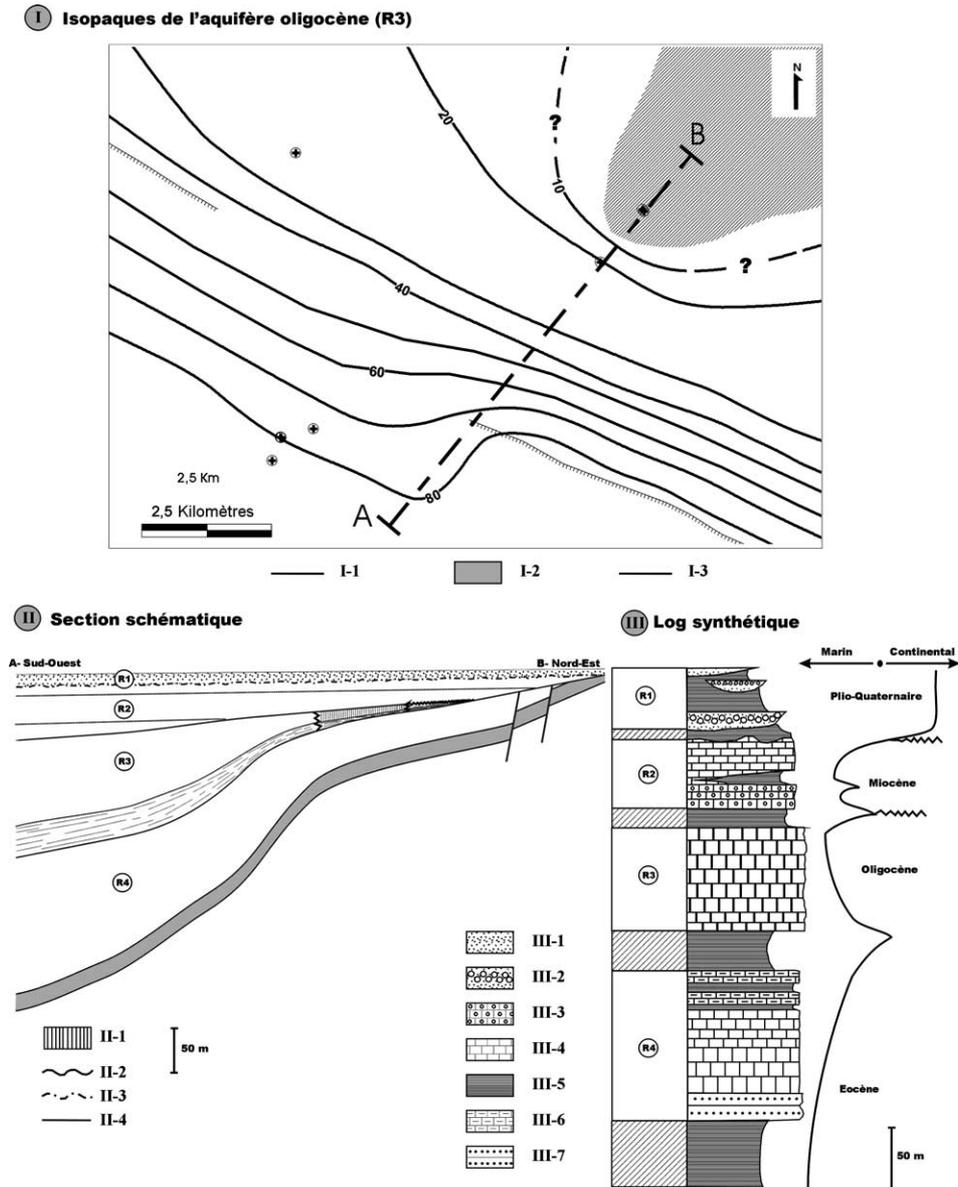


Fig. 4. **I.** Isopaques de l'aquifère oligocène R3. II-1 : Courbe isopaque. I-2 : Lacune de dépôt aquifère oligocène. I-3 : Faille identifiée en profondeur. **II.** Coupe synthétique à travers les formations tertiaires. II-1 : Zone de karstification de l'aquifère oligocène. II-2 : Surface d'érosion oligocène. II-3 : Surface d'érosion anté-pliocène. II-4 : Faille. **III.** Log géologique synthétique et milieux de dépôts associés. III-1 : Sable. III-2 : Sables et graviers. III-3 : Calcaire gréseux. III-4 : Calcaire. III-5 : Argile-marle. III-6 : Calcaire lacustre. III-7 : Alternance sable-calcaire gréseux.

Fig. 4. **I.** Spatial distribution of the Oligocene aquifer R3 thickness. II-1: Isothickness level. I-2: Oligocene deposits gap. I-3: Deep fault. **II.** Synthetic cross-section through the Tertiary formations. II-1: Oligocene karstified formations. II-2: Oligocene erosional surface. II-3: Ante-Pliocene erosional surface. II-4: Fault. **III.** Geological log and associated deposit conditions. III-1: Sand. III-2: Gravelous sand. III-3: Sandy limestone. III-4: Limestone. III-5: Clay-marl. III-6: Freshwater limestone. III-7: Succession of sand-sandy limestone.

recte avec les formations aquifères miocènes et interconnectée avec les formations plio-quadernaires sus-jacentes via l'aquifère relais du Miocène. Les calcaires oligocènes présentent dans cette zone une fissuration ouverte importante, voire un début de karstification. Ces phénomènes de dissolution des calcaires sont connus par ailleurs, notamment à l'est de la Garonne [7,9,12] et, plus localement, au nord de la zone d'étude [4]. Ces observations mettent en évidence la capacité de ces terrains à une dissolution préférentielle, selon les variations locales de lithologie et peut-être des accidents. Les implications hydrogéologiques sont importantes, puisque la continuité hydraulique, même locale, avec l'aquifère miocène garantit un soutien important dans le cas de prélèvements intenses dans l'aquifère oligocène, mais reste problématique en termes de protection de la ressource vis-à-vis des pollutions de surface.

La présence de la structure anticlinale de Castelnau-Médoc, au nord-est de la zone d'étude, a limité l'ampleur de la transgression oligocène et a induit une réduction notable de l'épaisseur des dépôts aquifères oligocènes. Ces dépôts ont par la suite été érodés sur les parties hautes de la structure par une érosion anté-Miocène et vraisemblablement karstifiés sur la périphérie du dôme. La présence d'argiles de décalcification oligocènes au forage de reconnaissance F1 accrédite cette hypothèse. Cette lacune amène à repenser les schémas de circulation locaux, notamment la liaison entre la partie nord-est et la partie sud-est de l'aquifère oligocène. L'influence de cette limite devra également être précisée, dans l'optique d'une exploitation importante de l'aquifère oligocène dans sa partie plus occidentale.

5. Conclusions et perspectives

L'utilisation des méthodes de sismique réflexion haute résolution, associées aux données issues des forages de reconnaissance, a permis de préciser la géométrie de l'aquifère oligocène et des formations encaissantes, dans une zone jusqu'alors peu connue. Les premiers résultats mettent en évidence une influence tectonique non négligeable sur la structure des dépôts post-écènes. Une différenciation importante de la sédimentation s'est opérée à la faveur d'une flexuration, expression probable d'un faisceau de failles

actives plus en profondeur. À un compartiment sud où l'aquifère oligocène présente une épaisseur voisine de 80 m, limité verticalement par ses épontes mio-oligocènes et oligo-écènes, s'oppose un compartiment nord surélevé, où l'aquifère oligocène est caractérisé par une épaisseur réduite et des propriétés hydrodynamiques particulières : fissuration importante et liaison hydraulique probable avec les aquifères sus-jacents. Latéralement, l'aquifère se trouve limité par la structure anticline de Castelnau-Médoc, dont la mise en place a conduit à la disparition des faciès réservoirs oligocènes par une érosion vraisemblablement anté-Miocène. C'est la mise en place de cette structure qui est probablement à l'origine de la karstification des terrains oligocènes à sa périphérie. Dès lors, les schémas de circulation doivent être précisés dans cette zone et l'influence de cette lacune prise en compte pour l'élaboration des futures simulations hydrogéologiques.

Cette étude montre l'intérêt des données de sismique réflexion haute résolution pour la compréhension de l'extension et de la géométrie des systèmes hydrogéologiques complexes, lorsque les données de sondage restent trop limitées pour qu'on puisse procéder à une caractérisation précise. Ce type de prospection, déjà utilisé avec profit pour des formations profondes [11,16], s'est révélé ici particulièrement approprié au vu de la faible profondeur des terrains étudiés, mais également de l'importance des structures tectoniques de faible amplitude, difficilement décelables par la simple corrélation des données de forage. La généralisation de cette méthode à l'ensemble du bassin médocain ne pourrait qu'améliorer la compréhension globale de ce système complexe.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Syndicat mixte d'études et de gestion de la ressource en eau de la Gironde, pour son appui financier et la mise à disposition des données de sismique utilisées dans cette étude. Les auteurs tiennent également à remercier Pierre Pouchan et Philippe Razin pour leurs conseils. Enfin, les auteurs adressent leurs remerciements à Christian Ravenne, pour son aide et pour ses remarques constructives lors de la relecture de ce manuscrit.

Références

- [1] J.-P. Alvinerie, J. Gayet, L. Pratviel, M. Vigneaux, Esquisse structurale et faciologique du Crétacé supérieur nord-aquitain, *Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine* 12 (1972) 79–100.
- [2] H. Astie, Étude hydrogéologique de la nappe du Miocène dans le Sud-Ouest du bassin d'Aquitaine, thèse, université de Bordeaux, 1964.
- [3] M. Caralp, M. Vigneaux, Aspect structural du Médoc atlantique, *C. R. somm. Soc. géol. France* 6 (1960) 796–800.
- [4] M. Courrèges, Le crypto-karst de la péninsule du Médoc, crypto-altération, dissolution, karst sous-marin et évolution quaternaire, *Quaternaire* 8 (1997) 289–304.
- [5] J. Dubreuilh, Synthèse paléogéographique et structurale des dépôts fluviatiles tertiaires du Nord du bassin d'Aquitaine—passage aux formations palustres, lacustres et marines, thèse, université de Bordeaux, 1987.
- [6] J. Dupuy, Esquisse structurale et modalités du contact Stampien–Sannoisien dans le Nord du bassin d'Aquitaine, thèse, université de Bordeaux, 1966.
- [7] A. Fabre, Description géologique des terrains tertiaires du Médoc et essai sur la structure tectonique du département de la Gironde, Bordeaux, Éditions Drouillard, 1939, 534 p.
- [8] J. Gayet, L'ensemble des environnements oligocènes nord-aquitains : un modèle de plate-forme marine stable à sédimentation carbonatée, thèse d'État, université Bordeaux-1, 1985.
- [9] J. Gayet, Évolution karstique sur une plate-forme stable. Contrôles tectoniques, faciologiques et eustatique (exemple de l'Oligocène de l'Entre-Deux-Mers, Gironde, France), *Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine* 53 (1993) 169–177.
- [10] L. Hosteins, Étude hydrogéologique du réservoir oligocène en Aquitaine occidentale – Gestion et conservation de la ressource de cette nappe dans la région de Bordeaux, thèse, université Bordeaux-1, 1982.
- [11] M. Jaffal, A. Kchikach, J.-P. Lefort, L. Hanich, Contribution à l'étude d'une partie du bassin d'Essaouira (Maroc) par sismique réflexion, *C. R. Geoscience* 334 (2002) 229–234.
- [12] A. Klingebiel, J. Gayet, R. Maire, Facteurs faciologiques et tectoniques contrôlant la karstification sur la marge nord aquitaine (France) : exemple de l'Oligocène nord-aquitain, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 317 (1993) 523–529.
- [13] B. Moussie, Le système aquifère de l'Éocène moyen et supérieur du bassin nord-aquitain. Influence du cadre géologique sur les modalités de circulation, thèse, université Bordeaux-1, 1972.
- [14] L. Pratviel, Essai de cartographie structurale et faciologique du bassin sédimentaire ouest-aquitain pendant l'Oligocène, thèse d'État, université Bordeaux-1, 1972.
- [15] R. Prud'homme, Analyse morphostructurale appliquée à l'Aquitaine occidentale et au golfe de Gascogne. Définition d'une méthodologie cartographique interprétative, thèse d'État, université Bordeaux-1, 1972.
- [16] L. Zouhri, C. Gorini, C. Lamouroux, D. Vachard, M. Dakki, Interprétation hydrogéologique de l'aquifère des bassins sud-rifains (Maroc) : apport de la sismique réflexion, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 319–326.