

Les modèles hydrogéologiques multicouches développés en Aquitaine

La Rédaction¹.

Après les premiers modèles régionaux développés dans les années 70 (Bassin parisien, Nord Bassin aquitain), il faudra attendre les années 90 pour que soient relancées les modélisations régionales à la demande des utilisateurs et grâce aux développements informatiques enregistrés au cours de ces 20 dernières années. Nous distinguerons le Modèle nord-aquitain (MONA), le modèle de l'Éocène de la Gironde et le Modèle Sud-Aquitain.

Modèle Nord-Aquitain (MONA)

Le modèle nord-aquitain (MONA version 1) a été initié au début des années 90 pour apporter des réponses à l'effondrement des niveaux de la nappe de l'Éocène en Gironde. Discrétisé en mailles carrées de 5 km de côté, il a fonctionné en régime transitoire sur la base des données 1972-1992 en simulant les écoulements au sein de 4 couches aquifères : Mio-Plio-Quaternaire (à potentiels imposés), Oligocène, Éocène et Campano-Maastrichtien².

En 1996, l'agence de l'eau Adour-Garonne, la communauté urbaine de Bordeaux et le conseil général de la Gironde ont décidé la mise en place d'un schéma directeur de gestion des ressources en eau de la Gironde, proposant des solutions alternatives permettant de limiter les prélèvements dans l'Éocène et il a été demandé au BRGM d'utiliser MONA V1 pour tester différentes solutions du schéma proposées par les cabinets d'étude. En 1998, une expertise du modèle a montré que celui-ci devait être amélioré pour être plus représentatif du milieu souterrain concerné. En 1998, on est ainsi passé à une version 2, en régime transitoire sur la période 1972-1996, toujours à la maille 5 x 5 km mais avec 5 couches (Quaternaire à Campanien-Maastrichtien)³. Cette version a été actualisée à deux reprises, en 1999⁴ avec les données 1997 et 1998, et en 2001⁵ avec les données 1999 et 2000.

Parallèlement, des simulations ponctuelles ont été réalisées pour fonder les autorisations d'implantation et de prélèvements d'une dizaine d'ouvrages devant solliciter des nappes visées par le SAGE « Nappes Profondes ».

À noter que la version MONA V2B fonctionne en régime permanent avec 7 couches (+ Cénomanien et Jurassique). Elle a été développée au cours de l'année 2 de la convention État-Région « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine, 1996-2001 ». En attendant les

développements prévus entre 2007 et 2009, cette version est actuellement la seule intégrant les couches profondes du Cénomanien et du Jurassique.

L'élaboration de la version 3 s'est faite à partir de 2002 dans le cadre de la convention régionale « Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine » pour la période 2002-2006. Au cours de l'année 1⁶, la maille est passée à 2 km de côté et on a adjoint l'Aquitainien-Burdigalien, l'Helvétien et le Plio-Quaternaire, en remplacement de l'ancienne couche Mio-Plio-Quaternaire à potentiels imposés. On a également subdivisé l'Éocène en 3 couches et réajusté la géométrie de l'Oligocène (MONA V3.1 2000). Au cours de l'année 2, on a finalisé la géométrie de l'Oligocène et le calage des trois couches de l'Éocène et de celle de l'Oligocène.

La version actuelle (MONA V3.1) intègre donc 9 couches : Plio-Quaternaire, Miocène (Helvétien et Burdigalien-Aquitainien individualisés), Oligocène, Éocène inférieur, moyen et supérieur individualisés, Campano-Maastrichtien et Turonien-Coniacien-Santonien, et est découpée en 35 000 mailles de 2 km de côté. Cette version a été actualisée en 2005⁷ avec les données de la période 2001-2003. Au cours de l'année 3, la couche Turonien-Coniacien-Santonien a été subdivisée en deux couches distinctes (Turonien et Coniacien-Santonien) et on actualisé la géométrie du Campanien-Maastrichtien, ce qui doit permettre d'amener le modèle en version MONA V3.2 au cours de l'année 4. Une version 3.3 est prévue fin 2008 ou en 2009, qui intégrera le Cénomanien et le Jurassique.

Tous ces développements se font dans le cadre des Contrats de plan État-Région (1996-2001, puis 2002-2007) avec le concours financier de l'agence de l'eau Adour-Garonne et de l'Europe (fonds FEDER).

Le Modèle nord-aquitain couvre la totalité de la Gironde, le sud de la Charente et de la Charente Maritime, les trois-quarts sud-ouest de la Dordogne, le nord et l'ouest du Lot-et-Garonne et une grande partie des Landes. Il a notamment été utilisé :

- dans le cadre du Schéma directeur de gestion de la ressource en eau de la Gironde ;
- pour le SAGE « Nappes profondes » de Gironde, afin de définir des volumes maximaux prélevables objectifs (VMPO), chiffrer les économies d'eau à réaliser et proposer des réductions de prélèvements ou des ressources de substitution ;

1. Remerciements à Nicolas Pédrón, Jean-Pierre Platel et Pierre Marchet pour leur aide dans l'élaboration de ce texte.

2. Rapports BRGM R 37322 BOR AQI 93, R 37361 AQI SP 93 et R 38006 SGN SP 94.

3. Rapport BRGM R-40224, 1999.

4. Rapport BRGM R-40760.

5. Rapport BRGM/RP-51758-FR.

6. Rapport BRGM/RP-52602-FR.

7. Rapport BRGM/RP-54220-FR.

- ponctuellement, pour simuler de nouveaux champs captants.

Son utilisation s'étend aujourd'hui à de nouvelles problématiques comme l'exploitation de l'aquifère jurassique en Lot-et-Garonne ou de celui de l'Éocène et du Crétacé supérieur en Dordogne.

Le modèle est plus spécialement adapté à des problématiques de nappes profondes à renouvellement lent et il constitue un auxiliaire de diagnostic (état de la ressource, surexploitation éventuelle ?), d'évaluation (offre potentielle, ressource exploitable, ressources de substitution) et de gestion (anticipation des crises, « piézométries d'objectif ») pour l'exploitation de ces nappes.

Étude et surveillance de l'Éocène dans la zone de l'estuaire de Gironde

Cette étude s'intègre dans le vaste programme de gestion des nappes d'eaux souterraines de la région Aquitaine qui se poursuit depuis 1996 et constitue l'un des modules de l'actuelle convention régionale, passée entre l'État, la région Aquitaine et le BRGM, avec le concours de l'agence de l'eau Adour-Garonne et, pour ce module, de celui du conseil général de la Gironde.

Depuis plusieurs décennies, la nappe captive de l'Éocène moyen est fortement sollicitée dans le département de la Gironde. Il en résulte une forte dépression piézométrique au droit de l'agglomération bordelaise et une dégradation de la qualité de la nappe dans tout le nord du Médoc, en raison d'une invasion saline importante provenant principalement des eaux fossiles des nappes des alluvions ante-flandriennes comme l'ont montré les études du programme 1996-2001.

L'objectif majeur de la phase 2005 du programme 2002-2007 était de mieux connaître les raisons de la persistance de la crête hydraulique, qui assure une protection de la nappe éocène vis à vis d'une éventuelle propagation de la salure vers le sud. Trois principaux axes d'études et de travaux avaient été définis dès 2002 et complétés en 2005 :

- bilan des connaissances géologiques et hydrogéologiques ;
- poursuite de l'extension du réseau PZEM vers le sud du Médoc et dans le Blayais par la réalisation de piézomètres (profonds et/ou courts) près de l'estuaire ;
- poursuite de la surveillance des pressions et de la qualité des eaux des différents aquifères de l'Éocène moyen.

Ces travaux devaient déboucher en 2005 sur une modélisation hydrodynamique des aquifères éocènes du

secteur pour essayer de définir des piézométries de crise à ne pas dépasser.

Les deux premières phases du programme ont permis de préciser que l'aquifère multicouche, puissant de 250 m en moyenne, se subdivise en deux à trois réservoirs grésos-sableux (aquifère inférieur), surmontés par deux réservoirs calcaires à niveaux grésos-calcaires intercalés (aquifère supérieur).

Pour mieux appréhender les différences entre ces deux types de réservoirs, des piézomètres, en doublets ou isolés, ont d'abord été implantés sur cinq sites sélectionnés couvrant la zone de la crête, régulièrement répartis en rive gauche (Cussac, Saint-Julien-Beychevelle et Soussans) et en rive droite (Plassac et Saint-Genès-de-Blaye) de la Gironde. En fin de cette troisième phase, le réseau de surveillance PZEM a été complété par les sondages d'Arcins et de Beychevelle, captant l'Éocène moyen calcaire. Les 14 piézomètres des 10 sites sont maintenant tous équipés d'enregistreurs numériques et des prélèvements d'eau pour analyse chimique y ont été effectués deux fois par an à la crue et à l'étiage des nappes. Les données correspondantes alimentent les réseaux Quantité « RPESTUEOCE » et Qualité « RQESTUEOCE » de la base ADES.

La **surveillance de qualité** conduite entre 1999 et 2005, a confirmé, pour le secteur nord du Médoc :

- une tendance à la salinisation progressive de tous les réservoirs de l'Éocène dans le secteur nord-oriental du Médoc (+ 3 g/l sur 6 ans dans le secteur de Jau-Dignac-Loirac) ;
- pas d'évolution de la salinité à Saint-Christoly ;
- les plus fortes variations (0,2 à 7,5 g/l) dans le secteur de Saint-Yzans.

Dans le secteur de la crête piézométrique (Cussac, Beychevelle, Soussans, Plassac, Saint-Genès-de-Blaye), les eaux du réservoir profond sablo-gréseux sont partout très douces (20 à 52 mg/l de NaCl), alors que celles des réservoirs supérieurs calcaires sont légèrement plus salées (28 à 80 mg/l) avec des teneurs exceptionnelles à Cussac-Fort-Médoc (275 mg/l).

La **surveillance des pressions** se poursuit depuis 1998 dans le nord du Médoc et, depuis 1999, dans la zone de crête, où elle a été intensifiée à partir de 2003. Dans les secteurs nord (Jau-Saint-Christoly et Saint-Yzans-Laména) et centre (Saint-Estèphe), le niveau à marée haute de la nappe de l'Éocène se situe en général sous le plan moyen des hautes mers de l'estuaire, tandis que dans le secteur de la crête piézométrique (Cussac, Beychevelle, Plassac), le niveau de la nappe profonde est toujours nettement en charge par rapport au plan moyen de l'estuaire à marée haute.

En rive occidentale (Fort-Médoc et Beychevelle), le niveau de la nappe des formations calcaires évolue toujours en-dessous du plan moyen des hautes mers de l'estuaire alors qu'en rive orientale (Plassac au SE de l'anticlinal et Segonzac au nord), il est tout à fait comparable à celui de la nappe des grès de la rive opposée. Dans le secteur au sud de la crête piézométrique (Arcins, Soussans et Ludon), l'aquifère devient partout captif sous les calcaires argileux et les marnes de l'Éocène supérieur.

Globalement, malgré une tendance générale à une baisse légère des pressions depuis plusieurs années, aucune tendance à la remontée de la nappe profonde de l'Éocène moyen n'est mise en évidence jusqu'à présent. Les plus fortes pressions des crêtes piézométriques, qui sont liées à la zone de recharge correspondant aux affleurements éocènes de l'anticlinal de Blaye-Listrac, présentent un axe oblique par rapport à cet anticlinal, tant pour l'aquifère inférieur que pour l'aquifère supérieur. Cette position est conditionnée par l'importance des prélèvements d'eau dans la zone bordelaise, ce qui déporte les crêtes piézométriques au nord de l'anticlinal.

Une première approche de **modélisation** a permis de retrouver une image très proche des cartes piézométriques pour les aquifères éocènes, le calage des niveaux en régime permanent ayant été obtenu dans la majorité des secteurs. Les premiers résultats du bilan hydrologique réalisé sur la zone d'étude ainsi que de l'analyse de sensibilité simplifiée tendent à montrer la persistance de la « crête » en faisant varier les différents paramètres testés. La structure de l'anticlinal de Blaye, les affleurements de rive droite et les superpositions multicouches sont des facteurs essentiels dans cette configuration piézométrique.

Pour la phase 4 de l'étude, la surveillance de l'évolution des pressions et de la qualité des eaux sera poursuivie dans les différents sondages du réseau PZEM, qui comprend maintenant 14 ouvrages. Par ailleurs, il conviendra d'affiner les résultats de la modélisation, notamment par la réalisation d'un calage en régime transitoire et par une prise en compte plus fine des conditions aux limites du modèle local (à partir du modèle régional Nord-Aquitain), de façon, en fin de projet, à être en mesure de proposer des valeurs de piézométries de crise pour les deux nappes de l'Éocène moyen.

Modèle Sud-Adour-Garonne (MSAG)

Sur financements du BRGM et de l'agence de l'eau Adour-Garonne, la construction d'un modèle de gestion des nappes profondes du sud du bassin Adour-Garonne a été décidée en 1996, sur la base de concepts géologiques cohérents avec ceux des modèles de stockage de gaz

naturel de TOTAL-SGF à Izaute (32) et Lussagnet (40) ou du stockage envisagé par GDF aux Landes de Siougos (40) (Seguin, 2003). La 1^{ère} phase⁸ a permis de définir 8 systèmes aquifères (Miocène, Oligocène, Éocène moyen, Sables infra-molassiques, Éocène inférieur, Paléocène, Sénonien supérieur, Sénonien inférieur-Cénomaniens-Turonien), dont le toit et le mur ont été cartographiés par traitement géostatistique, en s'appuyant sur le modèle structural de la base du Tertiaire. La 2^{ème} phase⁹ a permis d'élaborer une synthèse hydrogéologique, une base de données géo-référencées et des cartes thématiques (piézométrie, température, paramètres hydrodynamiques).

La phase 3 a vu la construction du modèle numérique des nappes profondes sur la base des modèles conceptuels géologique et hydrogéologique élaborés lors des deux premières phases et son calage en régime permanent¹⁰ et la phase 4, le calage en régime transitoire, après introduction des volumes de gaz injectés et soutirés à Lussagnet et Izaute dans l'aquifère des Sables infra-molassiques. Comme la quasi totalité des chroniques piézométriques disponibles concernent l'aquifère des Sables infra-molassiques et quelques unes, l'aquifère du Paléocène, l'essentiel du travail a porté sur ces deux aquifères en se limitant à leur partie occidentale, à l'ouest d'Auch.

En phase 3, on a finalement retenu 6 couches dans le modèle (Oligocène, Sables inframolassiques, auxquels une partie de l'Éocène moyen a été rattachée, Éocène inférieur, Paléocène, Sénonien supérieur et l'ensemble Sénonien inférieur - Cénomano-Turonien) et les limites suivantes :

- au sud, le front nord pyrénéen et les affleurements des différentes couches ;
- à l'ouest, des limites de couches (façade atlantique) ou de faciès ;
- à l'est, une limite située à une dizaine de km à l'est de Toulouse pour 5 des couches, plus réduite pour le Sénonien inférieur ;
- au nord, dans sa partie centrale, les rides anticlinales de Roquefort, Créon, Barbotan et Castera Verduzan.

La superficie couverte va de 11 700 km² pour les Sables infra-molassiques à près de 17 000 km² pour le Sénonien supérieur. Le modèle est subdivisé en mailles de 2 x 2 km et s'appuie sur le logiciel Marthe développé au BRGM. Le calage du modèle transitoire a été réalisé sur la période 1977-2000, avec des pas de temps de 15 j à 3 mois définis en fonction des cycles de stockage-déstockage de gaz : le stockage d'Izaute a débuté en 1981 et celui de Lussagnet en 1957.

8. Rapport BRGM R 39538, 1997.

9. Rapport BRGM R 40633, 1999.

10. Rapport BRGM/RP-50241-FR, 2000.

La difficulté du calage du modèle souligne la complexité des phénomènes hydrodynamiques en jeu, mais la baisse des niveaux de la nappe des Sables infra-molasiques est généralisée, en raison de l'augmentation régulière des prélèvements depuis 20 ans. Ce résultat est confirmé par la simulation réalisée jusqu'en 2005 en maintenant constants les prélèvements de l'année 2000. Pour les autres couches, sur une grande partie du domaine modélisé, des incertitudes demeurent sur les paramètres restitués par le modèle (perméabilités, emmagasinement, recharge). Il convient donc de poursuivre l'acquisition de données sur les points du réseau actuel tout en complétant ces points, de collecter systématiquement les données sur les prélèvements effectués dans les nappes, et de développer des modèles locaux à maillages plus fins pour mieux représenter les singularités locales (émergences de Dax, structures anticlinales d'Audignon et de Barbotan).

En attendant, un protocole d'utilisation de ce modèle (MSAG V1) a été établi par l'agence de l'eau Adour-Garonne et constitue la référence des conditions d'utilisation du modèle.

Bibliographie

Modèle nord-aquitain

- Pédron N., Platel J.-P., Bourguine B., 2006 : Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine. Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - Module 4 - Année 3. Rapport final. Rapport BRGM/RP 55242 FR, 56 p., 24 fig., 3 annexes.

Crête piézométrique de l'Éocène de l'estuaire

- Platel J.-P., Pédron N., Gomez E. et Winkel A., avec la collaboration de S. Benhammouda et F. Capéran., 2006 : Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine. Caractérisation de la crête piézométrique de l'Éocène au sud de l'estuaire de la Gironde - Module 2 - Année 3. Rapport final BRGM/RP-55240-FR, 166 p., 37 fig., 15 tab., 6 annexes.

Modèle Sud Adour-Garonne

- Seguin J.-J., 2003 : Calage du modèle en régime hydrodynamique transitoire. Rapport BRGM/RP 52041 FR, 61 p., 15 fig., 18 tabl.