



Gestion des données géologiques en milieu urbain

Isabelle Bouroullec, Eric Bouteloup, Sabine Chardavoine, Jean-Marie Gandolfi, Philippe Roubichou

► To cite this version:

Isabelle Bouroullec, Eric Bouteloup, Sabine Chardavoine, Jean-Marie Gandolfi, Philippe Roubichou.
Gestion des données géologiques en milieu urbain. Géosciences, 2009, 10, pp.72-79. hal-00640736

HAL Id: hal-00640736

<https://brgm.hal.science/hal-00640736>

Submitted on 14 Nov 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La banque de données BISMUTH (Banque d'Informations du Sous-sol en Milieu Urbain de Toulouse en géologie et Hydrogéologie) permet l'accès direct des services techniques de la ville de Toulouse aux informations géologiques et hydrogéologiques disponibles pour gérer l'impact des travaux aériens ou souterrains. Ce programme constitue une première étape pour une politique environnementale cohérente et durable en milieu urbain.

Le centre-ville de Toulouse et la Garonne (vue aérienne).
Downtown Toulouse and the Garonne River (aerial view).
© Ville de Toulouse.



Gestion des données géologiques en milieu urbain

72

GÉOLOGIE URBAIN



Isabelle Bouroullec ⁽¹⁾
i.bouroullec@brgm.fr



Éric Bouteloup ⁽²⁾
eric.bouteloup@grandtoulouse.fr



Sabine Chardavoine ⁽²⁾
sabine.chardavoine@grandtoulouse.fr



Jean-Marie Gandolfi ⁽¹⁾
jm.gandolfi@brgm.fr



Philippe Roubichou ⁽¹⁾
ph.roubichou@brgm.fr

(1) BRGM, Service géologique régional Midi-Pyrénées.
(2) Direction environnement, service urbanisme et environnement, communauté urbaine Grand Toulouse.

Les contextes géologique, hydrogéologique et environnemental en milieu urbain sont généralement complexes, fortement influencés par de multiples facteurs anthropiques : politiques d'aménagement, décaissements sous nappe, zones imperméabilisées, modifications des écoulements, etc. Dans le cadre de sa politique d'aménagement de l'espace urbain, la ville de Toulouse a souhaité se doter d'un outil pour mieux anticiper et maîtriser ses programmes d'action et appréhender les éventuels impacts de ses décisions.

La ville avait fixé un double objectif au BRGM : disposer d'une base de données unique qui intègre tous les résultats des travaux de reconnaissance réalisés dans le sol et sous-sol mais aussi bénéficier d'une visualisation 3D du sous-sol. Cette base de données intitulée BISMUTH (Banque d'Informations du Sous-sol en Milieu Urbain de Toulouse en géologie et Hydrogéologie) constitue une première étape pour s'engager dans une politique de long terme dans un esprit de développement durable.

La démarche mise en œuvre comporte trois étapes principales : structuration de la base de données, collecte des données et travail de modélisation du sous-sol.

Géologie et hydrogéologie de Toulouse

Le proche sous-sol de Toulouse est constitué de molasses tertiaires, de formations alluviales quaternaires et de diverses formations quaternaires mais d'occurrence plus rare (*figure 1*).

- Les molasses, produits de démantèlement des Pyrénées, sont formées d'une alternance de grès, argile et calcaire déposées dans un environnement fluvio-lacustre.
- Les formations alluviales comprennent les alluvions de la Garonne et de l'Hers, les principaux cours d'eau qui traversent Toulouse. La séquence élémentaire de ces alluvions comprend à la base un niveau de 3 à 5 mètres d'épaisseur constitué de galets et graviers mélangés à des sables plus ou moins argileux et, au sommet, un niveau plus fin d'argile et de limon pouvant atteindre 3 mètres d'épaisseur. Pour les alluvions de la Garonne, l'origine des galets et graviers est principalement pyrénéenne, au contraire de ceux de l'Hers qui résultent de l'érosion locale de la molasse.
- Les autres formations quaternaires comprennent le sol historique de Toulouse, les dépôts fins d'origine éolienne, les limons argileux de surface des réseaux hydrologiques secondaires et les alluvions du seuil de Toulouse.

Au niveau hydrogéologique, la principale nappe profonde est celle de l'Éocène située à plusieurs centaines de mètres sous Toulouse. Peu connue, non exploitée, elle doit être considérée comme stratégique, avec de très bons débits d'exploitation. Les nappes « profondes » de l'intra-molassique, contenues dans les puissantes formations tertiaires, sont constituées par de petits aquifères discontinus et de faible extension, généralement peu productifs.

Les nappes alluviales sont incluses dans les alluvions de la Garonne et de l'Hers et sont organisées en deux aquifères : la basse plaine et la basse terrasse. Ces nappes sont alimentées par les eaux météoriques et par le déversement des nappes anciennes vers les terrasses récentes par le biais d'écoulements diffus souvent masqués par les colluvions de pente. Elles se déversent dans le fleuve et ont un rôle de soutien d'étiage. Les inversions de flux du fleuve vers la nappe ne sont qu'exceptionnelles en période de crue. Ces nappes sont vulnérables aux pollutions, mais leurs ressources hydrogéologiques ne sont pas utilisées pour les besoins en eau potable puisque la Garonne assure l'alimentation de la ville. BISMUTH ne concerne que les nappes alluviales.

Figure 1 :
Les formations géologiques synthétiques régionales (Gandolfi et al., 2008) et vue perspective de la morphologie de la commune de Toulouse (Bouroullec et al., 2004).

Figure 1:
The synthetic regional geological formations (Gandolfi et al., 2008) and a view in perspective of the morphology in the Toulouse metropolitan area (Bouroullec et al., 2004).

© BRGM.



Structuration de la base de données

La base de données urbaines a été élaborée à partir de trois bases complémentaires : ACCESS pour la saisie des données issues des résultats des sondages, MAPINFO pour l'interface cartographique et GDM (logiciel BRGM) pour le traitement des données et leur modélisation. Les données qui ont permis de « nourrir » les bases de données ont été recueillies à partir de la Banque de données du sous-sol (BSS) gérée par le BRGM ou ont été fournies par la ville.

Ce sont au total près de 8 000 sondages de reconnaissance (figure 2) qui ont été exploités pour une surface urbaine d'environ 119 km², soit une densité moyenne d'un point d'observation pour 1,5 hectare. Le contenu et la qualité des données recueillies sont très variables. C'est pourquoi leur exploitation a dû intégrer les incertitudes liées à la nature des informations et à la difficulté de leur interprétation. En effet, la qualité des descriptions géologiques des ouvrages de reconnaissance du sous-sol dépend en grande partie des objectifs des travaux. L'information issue d'un sondage géotechnique est plus précise que celle issue d'un sondage qui recherche le niveau d'eau. De même, un sondage carotté permet une description plus précise qu'un sondage destructif.

Organisation des données

L'inventaire des documents disponibles a révélé une très forte hétérogénéité dans les descriptifs, ce qui a exigé une uniformisation des appellations utilisées pour décrire les caractéristiques géologiques d'une même formation. Cela a permis d'aboutir à une codification en limitant la perte d'information initiale.

Ce regroupement des caractères lithologiques au sein d'une même entité géologique a abouti à un référentiel géologique qui conserve les caractéristiques lithologiques pouvant servir à des applications d'aménagement et réduit le nombre de faciès décrits.

Ce travail de synthèse a permis d'individualiser et de caractériser 24 unités lithostratigraphiques homogènes au sein des deux formations alluviales « basse plaine » et « basse terrasse » et de la formation molassique. Pour chacune de ces unités, une description lithologique précise les principales caractéristiques de la roche rencontrée.

Ces données ainsi recueillies et validées ont été intégrées dans la base ACCESS. À partir de celle-ci et du logiciel MAPINFO, une sélection des sondages les plus représentatifs a été réalisée pour construire le modèle géologique du sous-sol. Cette sélection a conservé 3 000 sondages sur les 8 000 disponibles.

Constitution du modèle

L'outil retenu pour construire le modèle est GDM, logiciel du BRGM qui permet la modélisation géologique type « multicouches » et qui est bien adapté à l'organisation des principales formations sédimentaires, notamment les aquifères alluviaux (figure 1).

L'image numérique de terrain (MNT) qui visualise la surface topographique a été construite à partir d'un semi de points fourni par la ville comprenant 360 000 points photogrammétriques et 1,7 million de points de nivellement.

La maille calculée du MNT est de 20 x 20 mètres et la précision statistique altimétrique varie entre 0,5 et 0,8 mètre.

Ce nouveau MNT (figure 1) calculé est utilisé principalement pour trois applications :

- la visualisation en 3D de la zone d'étude ;
- l'attribution d'un niveau altimétrique cohérent avec le MNT pour chaque ouvrage ;
- la limitation des interpolations à la surface topographique du MNT.

Ce sont au total près de 8 000 sondages de reconnaissance qui ont été exploités.

Figure 2 : Sondages sélectionnés pour la modélisation (Gandolfi et al., 2008). Les axes de graduation sont en Lambert III en mètres.

Figure 2: Drillings selected for modelling purposes (Gandolfi et al., 2008). The axes of graduation are expressed in metres in the Lambert III system.

© BRGM.

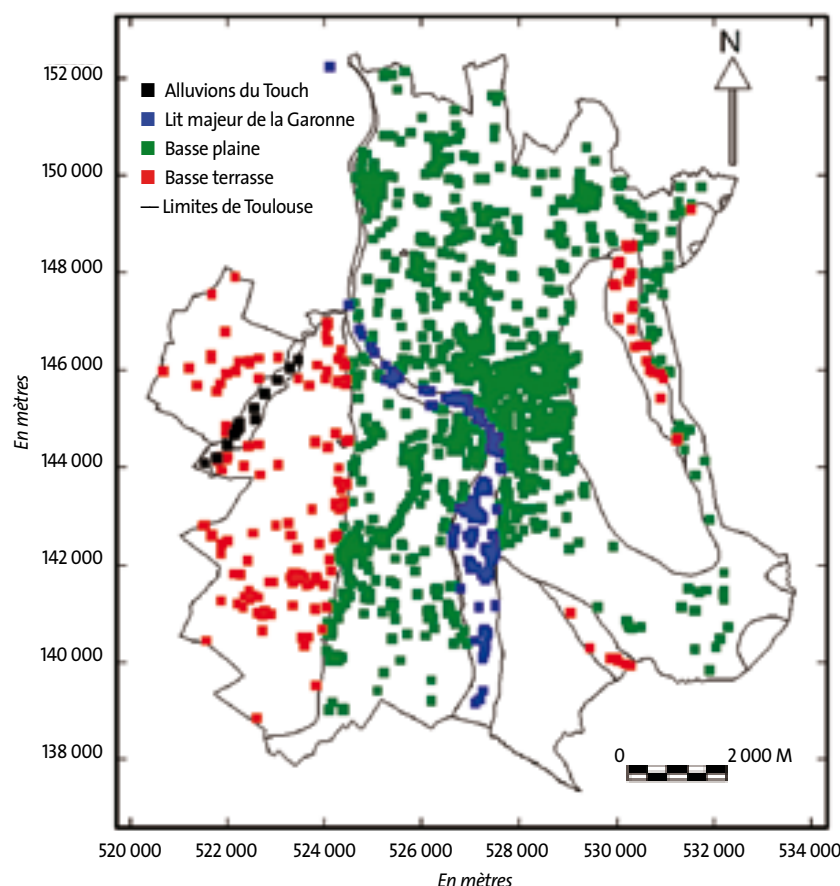


Figure 3 : Cartographie de l'épaisseur des formations sablo-graveleuses sur la commune de Toulouse. Les zones blanches ne sont pas modélisées (Gandolfi et al., 2008). Les axes de graduation sont en Lambert III en mètres.

Figure 3: Mapping of the thickness of sand-gravel formations in the Toulouse metropolitan area. White zones have not been modelled. (Gandolfi et al., 2008). The axes of graduation are expressed in metres in the Lambert III system.

© BRGM.

“Différentes coupes géologiques ont permis de tester le modèle, qui paraît satisfaisant.”

Différentes coupes géologiques ont permis de tester le modèle, qui paraît satisfaisant. Dans certains cas il apporte des précisions pour certaines formations et dans d'autres il précise les zones où, du fait de l'hétérogénéité des données de sondages, la connaissance est insuffisante, ce qui nécessite des informations complémentaires.

Pour les services techniques de la ville, le modèle géologique constitue un outil appréciable :

- il permet de cartographier et caractériser les corps lithologiques alluviaux continus à forte porosité (figure 3) ;
- il confirme le caractère discontinu de la lithologie des molasses et précise la répartition des différents faciès ;
- il permet d'obtenir des coupes indicatives du sous-sol (figure 4) qui peuvent être utilisées en amont de tout projet d'aménagement pour optimiser la nature et la quantité des travaux d'exploration préalables à réaliser, voire pour aider à sa localisation.

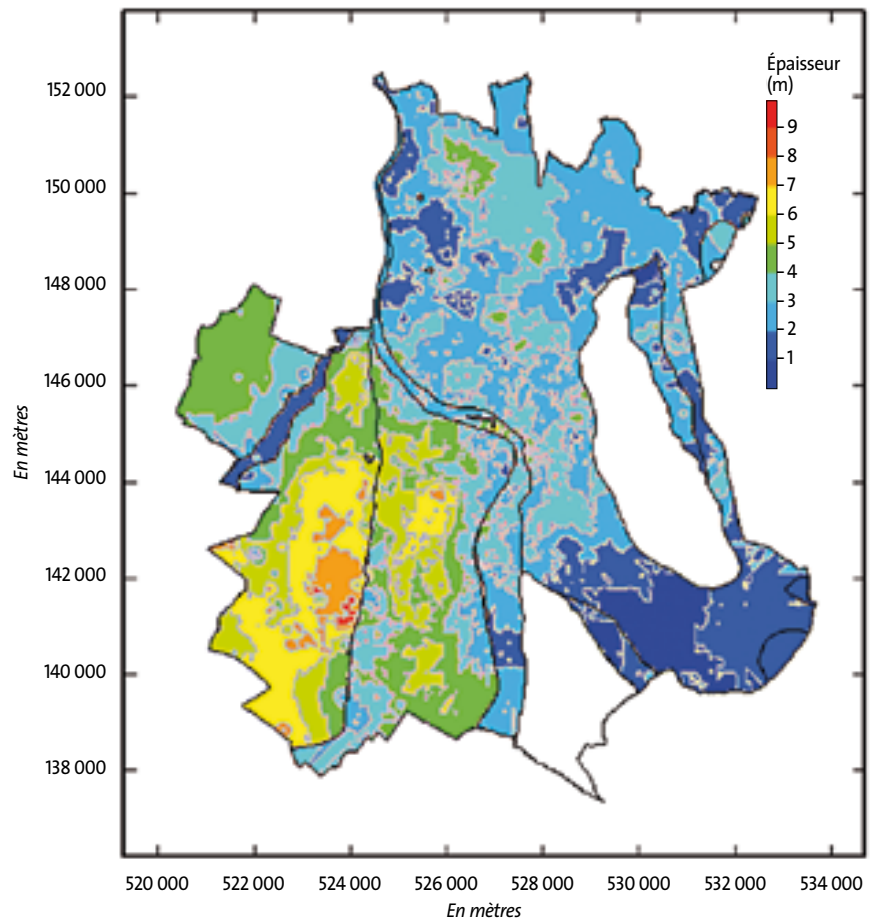
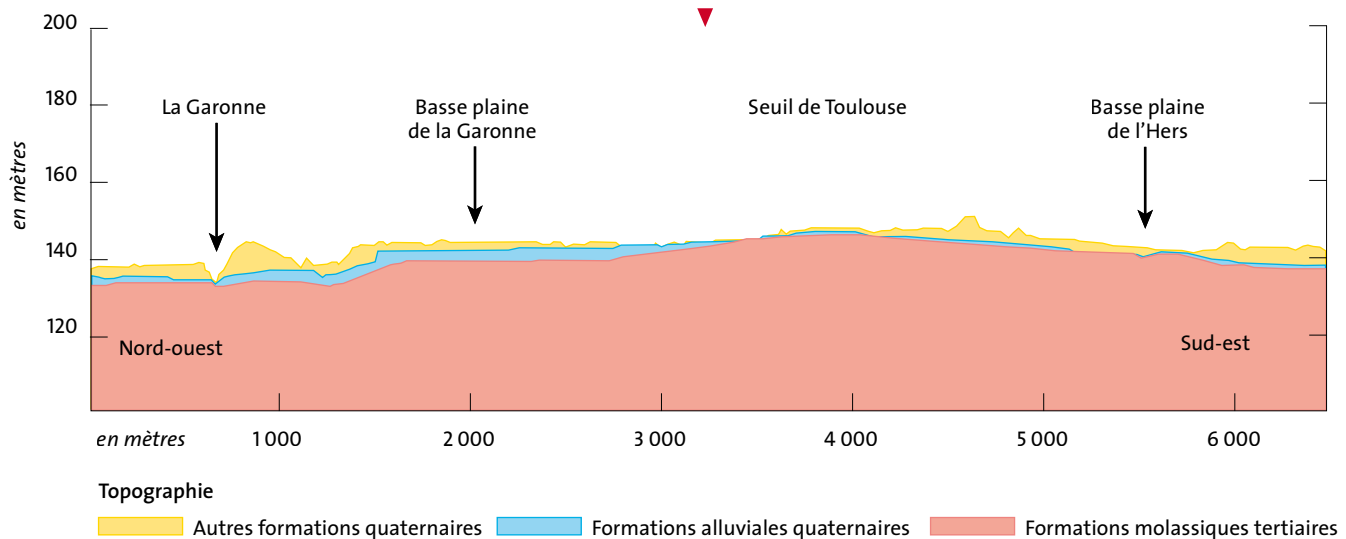


Figure 4 : Coupe nord-ouest/sud-est au niveau du seuil de Toulouse. Les formations sablo-graveleuses sont en bleu (Gandolfi et al., 2008).

Figure 4: A north-west/south-east cross-section on the level of the Toulouse sill. The sand-gravel formations are indicated in blue (Gandolfi et al., 2008).

© BRGM.



Formations géologiques

-  Sol historique de la ville de Toulouse
-  Dépôts à faciès de lœss
-  Lit majeur de la Garonne
-  Basse plaine de la Garonne
-  Basse plaine de l'Hers
-  Alluvions modernes du Touch
-  Alluvions modernes des cours d'eau secondaires
-  Alluvions du seuil de Toulouse
-  Basse terrasse de la Garonne
-  Basse terrasse de l'Hers
-  Éboulis et solifluxions des alluvions
-  Formations molassiques



▲ **Figure 5 : Carte des réseaux quantité (101 points) et qualité (27 points) établis à juin 2008 (Gandolfi et al., 2008).**

Figure 5: Map of quantity and quality networks (101 and 27 points respectively) installed as of June 2008 (Gandolfi et al., 2008).

© BRGM.

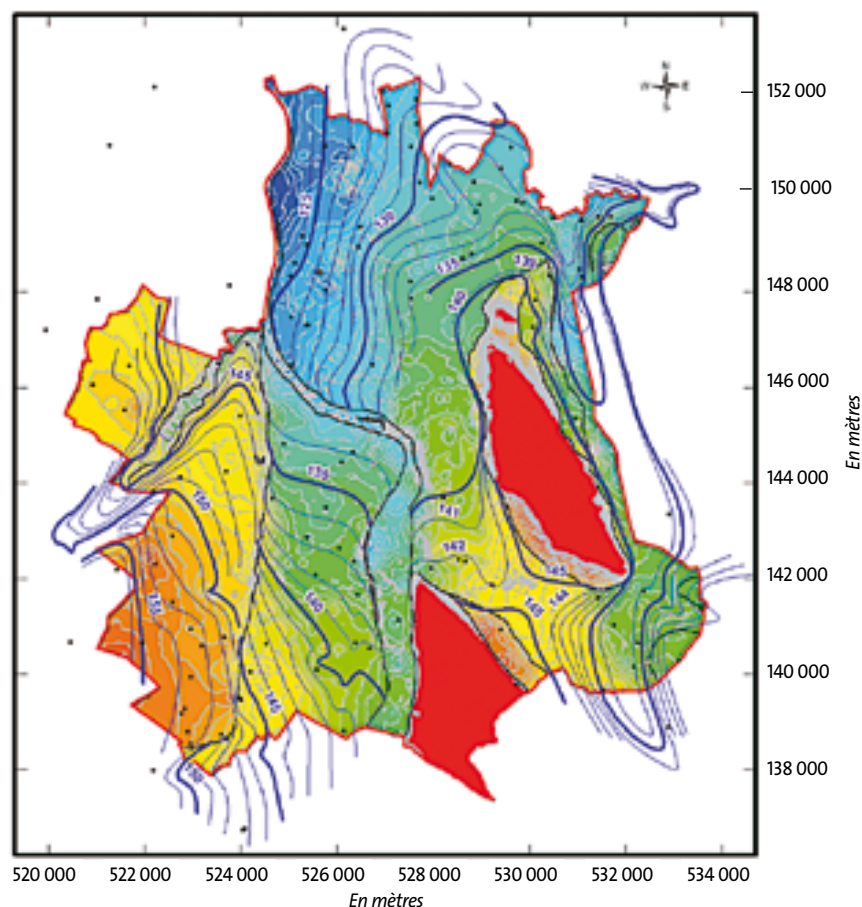
Réseau de suivi hydrogéologique

Parmi les résultats de la construction du modèle géologique du sous-sol de Toulouse figure la carte de répartition géographique des deux principaux niveaux lithologiques, susceptibles de contenir des aquifères. Cette information, utilisée pour l'implantation optimisée des piézomètres d'observation, a servi de base pour définir les réseaux quantitatif et qualitatif de suivi des eaux souterraines (figure 5, Bouroullec et al., 2005).

Le réseau quantitatif

À partir de cette cartographie et d'une représentation la plus homogène possible, une centaine de puits ont été identifiés et ont fait l'objet d'un nivellement avec rattachement à la côte NGF (nivellement général de la France).

Les cinq campagnes piézométriques menées en 2007 et 2008 ont abouti à une représentation fiable des fluctuations piézométriques et à une optimisation du réseau afin de suivre au mieux la représentativité des écoulements sur le territoire toulousain (figure 6). Ce réseau optimisé comporte actuellement 55 points. Son suivi régulier devrait permettre à terme la surveillance piézométrique de Toulouse à partir d'une quinzaine de points d'observation en continu.



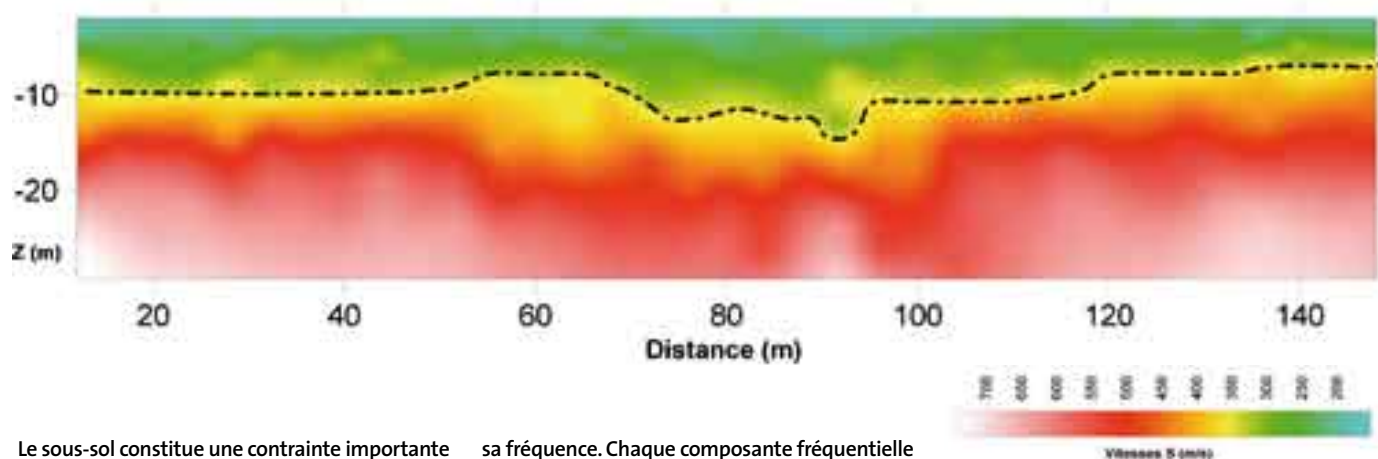
▲ **Figure 6 : Carte piézométrique de février 2007 (courbes isopièzes en m NGF) de la nappe alluviale. Le fond représente le toit apparent de la molasse modélisé sous GDM (Gandolfi et al., 2008).**

Figure 6: A comparison between the piezometric map prepared in February 2007 and the map of the roof of the molasse modelled under GDM (Gandolfi et al., 2008).

© BRGM.

► CARACTÉRISATION DU PROCHE SOUS-SOL LE LONG DE TRACÉS LINÉAIRES PAR PROFILAGE SISMIQUE EN ONDES DE SURFACE

Adnand Bitri – Service Risques naturels et sécurité du stockage du CO₂ – BRGM – a.bitri@brgm.fr



Le sous-sol constitue une contrainte importante pour les politiques urbaines : prise en compte des caractéristiques géotechniques pour les grands aménagements, maintenance des réseaux, assainissement, enfouissement des déchets, prévention des risques naturels et des pollutions. L'auscultation du sous-sol le long de tracés linéaires permettant d'établir des profils d'aléas naturels nécessite des techniques géophysiques non invasives fiables et à haut rendement. L'analyse spectrale des ondes de surface (SASW) répond à cette problématique puisqu'elle permet d'estimer les variations de la vitesse de la propagation des ondes de cisaillement V_s en fonction de la profondeur.

Dans les milieux stratifiés, l'onde de surface est dispersive : sa vitesse de propagation varie avec

sa fréquence. Chaque composante fréquentielle de l'onde se propage dans une épaisseur de terrain différente, les plus hautes fréquences se retrouvent dans les parties les plus superficielles du sol.

La détermination des vitesses de propagation des ondes de cisaillement par cette méthode représente une alternative intéressante aux mesures géotechniques. La SASW est non destructive et s'utilise sans contrainte en milieu urbain avec une profondeur d'investigation d'une vingtaine de mètres. La figure 1 illustre cette technique utilisée à Orléans pour la recherche de vestiges souterrains sous la rue Jeanne-d'Arc pendant les travaux d'implantation du tramway (figure 2). ■

▲ **Figure 1 : Profil de vitesse des ondes de cisaillement le long de la rue Jeanne-d'Arc, centre-ville Orléans (Loiret, France). L'anomalie de vitesse au centre du profil peut être due à un vestige de l'époque Gallo-romaine (fossé du système défensif de la ville).**

Figure 1: Profile of shear-wave velocities along the street of Jeanne-d'Arc in the Orléans city centre (Loiret Department, France).

The velocity anomaly in the middle of the profile could be associated with remains dating to the Gallo-Roman period (a trench belonging to the town's fortifications).



▲ **Figure 2 : À gauche : photo aérienne représentant le tracé du futur tramway avec la localisation de la rue Jeanne-d'Arc.**

À droite : zoom sur la rue Jeanne-d'Arc avec le tracé du profil sismique en rouge.

Figure 2: Left: an aerial photo showing the route of the future tramway line and the position of the street of Jeanne-d'Arc.

Right: zoom in on the street of Jeanne-d'Arc with the course of the seismic profile marked in red.

► SUIVI DES NAPPES EN GIRONDE, AU DROIT DE L'AGGLOMÉRATION BORDELAISE

Pauline Corbier – BRGM Aquitaine – p.corbier@brgm.fr

Le département de la Gironde se caractérise par la présence d'importantes réserves en eaux souterraines. Il fait aussi partie des départements où les nappes sont les plus exploitées (142,7 millions de m³ prélevés dans les nappes, à l'exception de celles du Plio-Quaternaire, en 2008).

Le suivi piézométrique des nappes, confié au BRGM par le Conseil général de la Gironde, a débuté en 1958 sur la nappe de l'Éocène inférieur à moyen et a progressivement été étendu aux six grands systèmes aquifères du département. L'évolution du creux piézométrique sous l'agglomération bordelaise a ainsi pu être

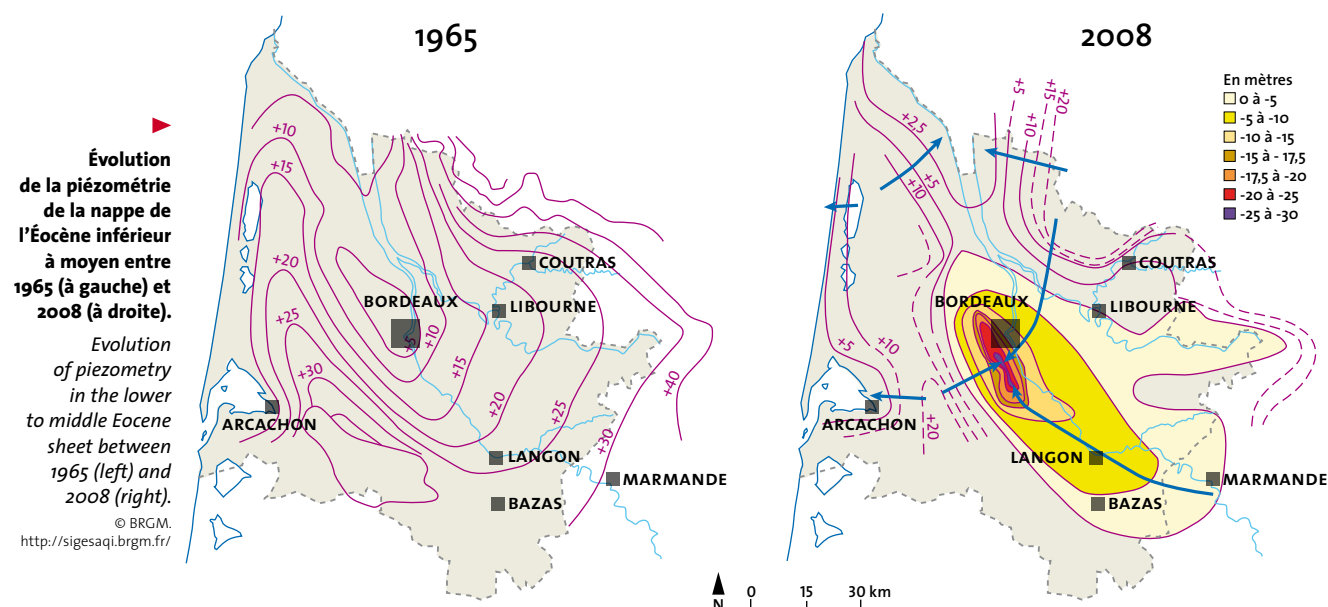
suivie (*illustration*) et des solutions de rééquilibrage des prélèvements ont été proposées (solicitation plus importante de la nappe oligocène en particulier).

D'un point de vue réglementaire, le SAGE⁽¹⁾ « Nappes Profondes de Gironde », approuvé par l'arrêté préfectoral du 25 novembre 2003, légitime ces missions de suivi. Ces dernières s'inscrivent aussi dans le cadre plus large de la Directive-cadre européenne sur l'eau (DCE) du 23 octobre 2000 qui fixe aux états membres de l'Union européenne des objectifs de reconquête de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques d'ici 2015 et préconise,

pour ce faire, des procédures de surveillance des masses d'eau.

Aujourd'hui, la poursuite de l'acquisition des données vise à fournir les éléments de connaissance nécessaires au tableau de bord du SAGE, à la gestion des prélèvements (en permettant, entre autres, une actualisation des Volumes maximums prélevables objectif – VMPO – définis dans le SAGE), à l'évaluation des ressources potentielles et au diagnostic de l'état des nappes, afin de répondre aux exigences de la DCE. ■

(1) Schéma d'aménagement et de gestion des eaux.



Le réseau qualitatif

Une trentaine de points d'eau ont été nécessaires pour obtenir une photographie représentative de la qualité des eaux souterraines.

Les résultats confirment le faciès bicarbonaté calcique des eaux souterraines de Toulouse. Les eaux de la basse plaine en rive droite de la Garonne sont légèrement plus sodiques et sulfatées qu'en rive gauche. Les eaux drainées par les alluvions de l'Hers sont plus sodiques et potassiques que celles de la nappe de la Garonne. D'autres résultats ont porté sur la dureté et les paramètres physico-chimiques. La température moyenne varie entre 13,5 °C en hiver et 15,5 °C en été, le pH oscille autour de la neutralité et les conductivités sont faibles à moyennes.

Ce réseau qualitatif élaboré à partir du modèle géologique permet de mettre à disposition de Toulouse un référentiel « qualité » qui a un double objectif :

- suivre l'évolution de la qualité des eaux souterraines des aquifères alluviaux afin de maîtriser les actions liées à la préservation des milieux en contexte urbain ;
- apprécier et anticiper l'impact des pressions anthropiques.

La gestion des points de ces deux réseaux se fait à partir d'une base de données disponible dans BISMUTH et qui comprend les principales caractéristiques des points et les différents champs permettant de renseigner sur les résultats des prélèvements et des mesures. Tous les résultats sont également basculés dans la base ADES (<http://www.ades.eaufrance.fr/>).



▲ **Toulouse. Le Pont Neuf franchit la Garonne et repose sur les alluvions du lit mineur du fleuve.**

In Toulouse, the Pont Neuf spans the Garonne River and rests on the alluvia of the river's streamway.

© Fotolia

Analyse théorique des potentialités géothermiques de Toulouse (pompes à chaleur avec captage sur nappe)

Toulouse a souhaité une analyse des potentialités géothermiques très basse énergie (GTBE) qui concerne la production de chaleur et/ou de froid à partir des aquifères peu profonds pour une température exploitée inférieure à 30°C.

La caractérisation du potentiel GTBE dans les nappes alluviales nécessite la connaissance de trois paramètres : le débit potentiel, la température et la qualité physico-chimique de l'eau. Les différentes campagnes de mesures indiquent les résultats suivants :

- la température moyenne est supérieure à 12 °C, ce qui constitue un bon indicateur du potentiel géothermique ;
- certains secteurs montrent des caractères corrosifs et entartrants qui nécessiteront des études ponctuelles pour bien préciser ce caractère ;
- les données disponibles sur les débits permettent la distinction et la caractérisation globale de secteurs dont l'hétérogénéité doit cependant être soulignée notamment pour les aquifères alluviaux.

D'une façon globale, six secteurs ont été définis, allant des alluvions récentes de la Garonne présentant un potentiel théorique GTBE sur aquifère intéressant, aux alluvions de l'Hers à potentiel GTBE faible à nul pour tout type de bâtiment. Dans tous les cas, il est fortement recommandé d'envisager une étude détaillée des caractéristiques de l'aquifère et des caractéristiques de l'urbanisation actuelle et future afin de s'assurer de la pérennité de la ressource.

Une première étape

Le projet BISMUTH comprend une base de données qui gère les points d'observations du sous-sol, un modèle géologique, la définition d'un réseau hydrogéologique et une analyse globale des potentialités géothermiques très basse énergie.

Les services techniques disposent à présent d'un outil pour anticiper ou intégrer la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-sol toulousain dans les projets d'aménagement, pour la préservation de l'environnement et la gestion de crise en cas de pollution. L'outil a été livré pour faciliter la mise à jour des nouvelles données issues des travaux souterrains sous maîtrise d'ouvrage de la commune. BISMUTH pourra aussi être complétée par de nouvelles couches d'informations géoréférencées issues de divers travaux ou études : inventaire historique urbain, caractéristiques géotechniques, chimie des sols... Le programme BISMUTH constitue ainsi une première étape indispensable pour qu'une politique environnementale cohérente et durable soit menée. ■

BISMUTH pourra aussi être complétée par de nouvelles couches d'informations géoréférencées.



Managing geological data in an urban context

To manage the impact of aboveground or underground construction on its ground surface or subsurface, the City of Toulouse recognized the need to benefit from geological information in a form that was immediately accessible and directly usable by its concerned technical services. In 2008, BRGM delivered a unique and regularly updatable database containing all the geological and hydrogeological information currently available: this tool was named BISMUTH, standing for "Banque d'Informations du Sous-sol en Milieu Urbain de Toulouse en géologie et Hydrogéologie" (Bank of geology and hydrogeology data on the urban basement of the city of Toulouse). This capitalization on knowledge likewise made it possible to build a geological model, notably in order to map alluvial formations and prepare representative cross-sections of the subsurface at any desired location in Toulouse, to define a hydrogeological monitoring network ensuring a qualitative and quantitative follow-up of the alluvial sheets and, lastly, to analyze the very-low-energy geothermal potential of these sheets. This project is part of the Agenda 21 initiative (a program of concrete measures in support of sustainable development for the 21st century), in which the City of Toulouse committed to take part as of March 2004.