Outils et méthodes pour la construction d'un modèle géologique et géotechnique 3D à l'échelle d'une commune

Denys Breysse* — Sophie Dominique* — Bernard Bourgine — Stéphane Lanot-Grousset*,*** — Antoine Marache***

** Centre de Développement des Géosciences Appliquées, Av. des Facultés, Bâtiment B18, F-33405 Talence Cedex*
{s.dominique, d.breysse, a.marache}@cdga.u-bordeaux1.fr
*** BRGM, BP6009, F-45060 Orléans Cedex02*
b.bourgine@brgm.fr
**** Ville de Pessac, Service Aménagement Urbain, F-33600 Pessac*

RÉSUMÉ. *Dans le cadre du Projet RIVIERA, nous analysons les propriétés géotechniques des formations superficielles en milieu urbain et nous proposons une modélisation tridimensionnelle de ces propriétés à l'échelle d'une commune. Ce travail repose sur la collecte, le codage de milliers de sondages, et l'indentification des propriétés discriminantes. La modélisation géostatistique permet d'établir une image « probable » de la géométrie et des propriétés géotechniques sur la zone d'étude.*

ABSTRACT. *The work undertaken in the frame of RIVIERA Project aims at a geological and geotechnical modelling of superficial ground layer, at the scale of an urban community. This work is based on the gathering and coding of thousands borings and on the identification of more informative properties. Geostatistical modelling enables to build a "probable" picture of the geometry and geotechnical properties of the considered area.*

MOTS-CLÉS : *modélisation 3D, géotechnique, géologie, géostatistique, sous-sol urbain.*

KEYWORDS: *3D-modelling, geology, geostatistics, geotechnics, urban soils.*

1. Introduction

De nombreux problèmes concernant l'aménagement des zones urbanisées sont en prise directe ou indirecte avec les conditions géologiques, géotechniques ou hydrogéologique du sous-sol. Disposer d'une image, même approchée, des propriétés géométriques (épaisseur, étendue) et géotechniques des formations superficielles permet, en phase d'avant-projet de mieux concevoir les campagnes de reconnaissance et de réduire les mauvaises surprises. Le but du projet est de mettre en œuvre à l'échelle d'une agglomération l'ensemble de la démarche d'analyse et de modélisation pour disposer d'un modèle géologique 3D, intégrant différents

paramètres géotechniques et hydrogéologiques, qui puisse être utilisé pour l'aide à la décision en gestion urbaine.

2. Le projet RIVIERA

Ce travail s'inscrit dans le cadre du Projet RIVIERA (Risques en Ville, Equipements, Réseaux et Archéologie), soutenu par le Réseau Génie Civil et Urbain, qui a donné lieu à un premier rapport d'étape collectif (Thierry, Breysse et al., 2004). La démarche générale du projet est conduite à deux échelles :

- à l'échelle de l'agglomération. Le périmètre de la zone d'étude est celui de la Communauté Urbaine de Bordeaux, mais le travail se focalise sur la rive gauche de la Garonne, dont la géomorphologie diffère sensiblement de celle de la rive droite, plus escarpée. Cette étude plus globale passe par :
    - l'élaboration de référentiels généraux (géologique, géotechnique, hydrogéologique et archéologique),
    - la construction d'un modèle tridimensionnel à l'échelle de l'agglomération « macro-modèle », dans lequel s'inscriront les secteurs sur lesquels les applications spécifiques seront développées,
- à l'échelle de territoires restreints (en étendue, en nature et en épaisseur) avec les analyses de problématiques plus spécifiques. Trois secteurs ont été sélectionnés, chacun correspondant à une préoccupation opérationnelle : urbanisme opérationnel, gestion des réseaux d'assainissement, archéologie préventive.

Nous traiterons ici du cadre général et nous nous appuierons sur les données relatives au premier secteur test (centre ville de Pessac).

3. Le modèle géologique

3.1. Le contexte

La connaissance du contexte géologique régional et local est nécessaire pour établir un modèle géologique global. D'une façon générale, le territoire en rive gauche peut être décrit comme à topographie peu marquée (de l'ordre de 40 mètres de dénivelé sur 15 km d'ouest en est), avec une configuration marquée par deux directions principales : celle de la Garonne, et la direction perpendiculaire, sur laquelle s'organisent une série de terrasses quaternaires, dont la description est essentielle pour le projet (Dubreuilh, 1976). On peut adopter un schéma général d'organisation des formations en rive gauche, accompagné d'un lexique des formations, qui sert de base à l'élaboration du référentiel décrit ci-dessous. Ce territoire est en outre entaillé par des affluents de la Garonne, dont le parcours d'Ouest en Est modifie localement fortement les caractéristiques des formations superficielles et des écoulements.

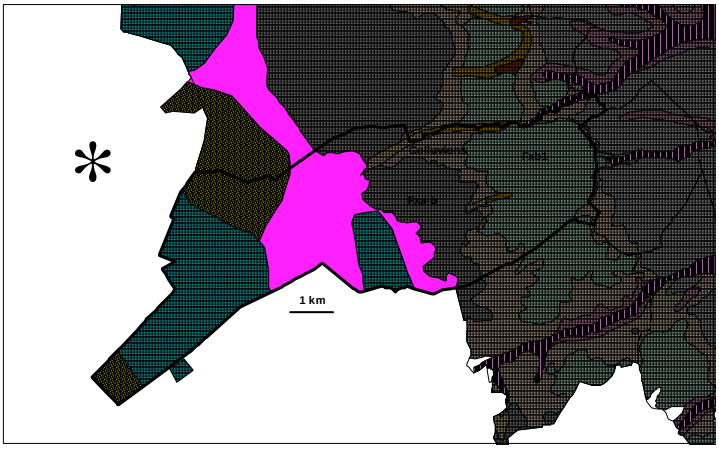

Figure 1. Limites de la commune de Pessac et des formations géologiques.

Etablir le modèle géologique de la zone signifie que l'on soit capable, au-delà du schéma de principe, de préciser et de quantifier des caractéristiques telles que : l'étendue et l'épaisseur des formations alluvionnaires (terrasses et colluvions), la profondeur du substratum, l'existence, la localisation, et les caractéristiques des interfaces karstifiées.

3.2. Données et référentiel

Le corpus de données est constitué d'une dizaine de milliers sondages sur l'agglomération. Un travail conséquent préalable a consisté à acquérir, saisir et vérifier l'ensemble de ces données de sources diverses.

L'établissement d'un référentiel répond au souci de concision (ne pas retranscrire l'ensemble des informations, la description lithologique pouvant être excessivement détaillée) et d'utilité pour les applications géologiques (être capable de distinguer les formations géologiques), hydrogéologiques (pouvoir affecter des propriétés hydrogéologiques comme la classe de perméabilité) et géotechniques (distinguer les appellations usuelles des sols et si besoin, les affiner). Le référentiel unique est constitué d'un ensemble de champs :

- *trois champs « stratigraphie »* (tableau I). Le terme « quaternaire » rassemble, sur le territoire de Pessac, deux terrasses (Fxa-b et Fxb1) à l'est et des formations sableuses des Landes à l'ouest, que l'on peut distinguer sans difficulté par leur position en {x, y} (voir figure 1) ;
- *trois champs « lithologie1 », « lithologie 2 », « lithologie 3 »*, qui permettent de coder la lithologie avec un degré de détail plus ou moins fin selon l'objectif souhaité,
- *trois champs « couleur »* (porteuse d'information sur le plan géologique), *« consistance » ou « altération »* (intéressante pour le géotechnicien) et

« perméabilité » (pour les applications hydrogéologiques et réseaux) complètent le codage.

Tableau I. Référentiel stratigraphique (extrait)

Strati1	Strati2	Strati3	Nom complet
Anthroposols	Anthroposols	HIS	
Quaternaire	Holocène	FLA	Flandrien
		COL	Colluvions
	Terrasses Fluviatiles	WUR – WUA – RIS - MIN	
		PIT	Pléistocène inf. term. (Fxb1)
		PIM	Pléistocène inf. moy. (Fxa-b)
		PIB	Pléistocène inf. bas.
	Système Landais	SDL – CAS – BRA - BEL	
Substratum	Miocène	SER – BDG - AQI	
	Oligocène	CHA - RUP	
Indifférencié	Indifférencié	KAR	Remplissage de karst

4. La modélisation géométrique

4.1. Principe et méthode de travail

La modélisation géométrique repose sur l'analyse d'un ensemble de triplets {x, y, z} où x et y représentent la position du point dans le plan et z son altitude. L'objectif est de reconstruire une surface z (x, y) qui constitue le « meilleur modèle possible » en fonction des données disponibles et d'estimer la qualité du modèle. Les surfaces considérées peuvent être soit la surface topographique, soit des interfaces entre formations géologiques (mur, toit). La démarche générale géostatistique peut être découpée en trois étapes.

La *première étape* quantifie la structure de corrélation spatiale correspondant à la surface considérée, c'est-à-dire la manière dont les corrélations entre les valeurs d'une propriété (ici l'altitude) prise en deux points décroît avec la distance h entre ces deux points, et éventuellement en fonction de l'orientation θ dans le plan, dans le cas d'une structure de corrélation anisotrope. Ayant établi le variogramme expérimental, on identifie des modèles sous la forme de fonctions qui sont « au mieux » compatibles avec le résultat expérimental dans la plage d'utilisation visée (par exemple pour des distances inférieures ou égales à un seuil précis).

La *deuxième étape* est la validation du modèle retenu. Elle repose sur le principe de la validation croisée : des données sont censurées dans la base initiale et reconstruites à partir des informations voisines et du modèle de variogramme identifié. On compare alors la valeur « vraie » z à la valeur « estimée » z*. Le modèle sera d'autant meilleur que les deux valeurs seront voisines. Cette phase permet, entre autres, de repérer (et d'analyser les causes) d'éventuelles données « non robustes », c'est-à-dire pour lesquelles la valeur reconstruite s'écarte significativement de la valeur vraie.

La *troisième étape* est la reconstruction de la surface par krigeage et l'estimation de la qualité de cette reconstruction, via l'indicateur de variance de krigeage. Cette valeur, cartographiée sur l'ensemble du domaine, permet d'apprécier l'incertitude que l'on a sur le positionnement (profondeur, épaisseur) des formations. Elle peut donc être utile, soit pour une analyse directe d'incertitude, soit pour guider des reconnaissances futures, en privilégiant si besoin les zones de forte incertitude.

Cette méthode a été appliquée à la reconstruction de la surface à la base des terrasses sur le secteur test de la commune de Pessac, puis à l'épaisseur de ces terrasses.

4.2. Modélisation du toit du substratum et de l'épaisseur du Quaternaire

Les données utilisées sont celles localisées dans le périmètre de la commune de Pessac. Les données disponibles dans les communes voisines peuvent être utilisées pour mieux conditionner le modèle sur ses frontières. La carte de la figure 2 illustre que les données sont essentiellement réparties dans la partie nord-est de la commune. La qualité du modèle ne sera donc pas uniforme sur tout le domaine. Sur cette carte sont représentés en violet les sondages qui ont rencontré le toit du substratum et en noir les sondages qui se sont arrêtés dans le Quaternaire.

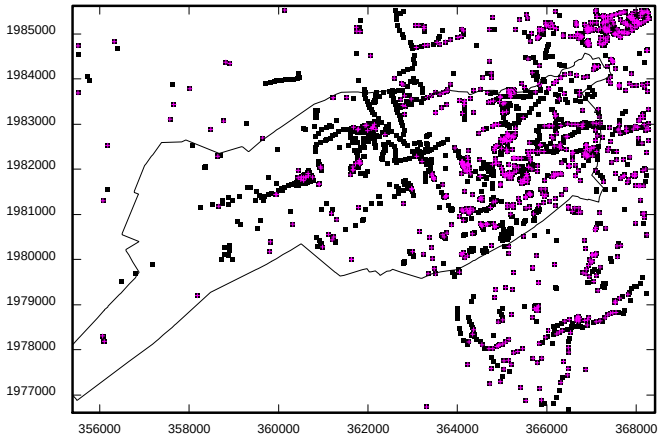

Figure 2. Localisation des sondages fournissant les informations

La carte variographique construite au pas de 100 mètres révèle l'anisotropie de la surface, avec des directions principales d'anisotropie (N 70 et N 160) qui correspondent approximativement aux directions principales de la surface topographique. On peut alors reconstruire une carte de l'altitude estimée du toit du quaternaire en forçant la surface modélisée à passer en dessous des sondages qui se sont arrêtés dans le Quaternaire (krigeage sous contraintes d'inégalités, logiciel Isatis® de Géovariances). On peut de la même manière établir un modèle géométrique de l'épaisseur des formations quaternaires en utilisant les données issues d'un MNT topographique comme référence pour la surface supérieure. La

figure 3 illustre les résultats de la reconstruction pour l'estimation de l'épaisseur. Elle révèle de fortes différences entre l'est de la commune (terrasse Fxb1, cf. figure 1) où les valeurs sont souvent inférieures à 5 mètres, et la partie centrale (terrasse Fxa-b, cf. figure 1), où l'épaisseur approche souvent 10 mètres). On peut, en superposant le contour des formations géologiques de la carte géologique, analyser plus précisément la distribution des épaisseurs en distinguant les différentes terrasses.

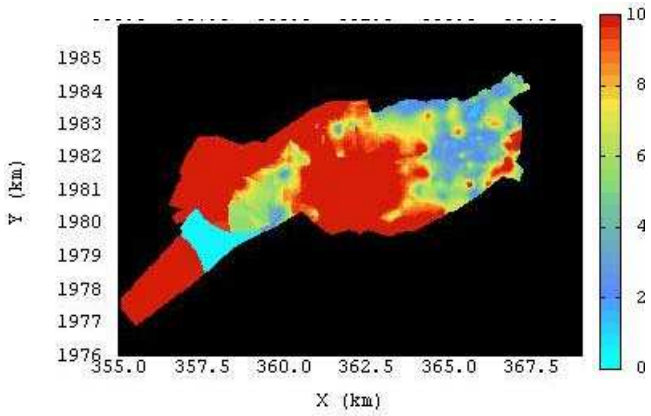

Figure 3. Reconstruction de l'épaisseur des formations quaternaires

5. La modélisation géotechnique

Les données géotechniques sont, elles aussi, concentrées sur les terrasses alluviales de la Garonne. Elles se présentent sous la forme de logs pénétrométriques ou pressiométriques. La majorité des données provient de campagnes de reconnaissances relatives à la construction de la rocade, du tramway et des aménagements du centre ville et sont concentrées dans la partie nord-est de la commune, la plus urbanisée.

Les essais pressiométriques sont réalisés dans des forages de reconnaissance lithologique préalablement creusés. On possède donc une description fine des faciès lithologiques dans lesquels sont effectuées les mesures. L'analyse statistique de ces informations fournit une voie complémentaire de modélisation, en s'appuyant sur la connaissance lithologique. On a par exemple établi la distribution statistique des différentes lithologies (définies selon le référentiel décrit plus haut), dans des domaines considérés comme homogènes, définis par leurs contours (ensemble de la commune, terrasses individualisées, colluvions…) et/ou leur profondeur. On établit ainsi ce que l'on peut qualifier de « lithologie statistique » des formations superficielles (figure 4). Ces « lithologies statistiques » quantifient la probabilité que l'on a de rencontrer une formation de la lithologie indiquée dans la zone concernée.

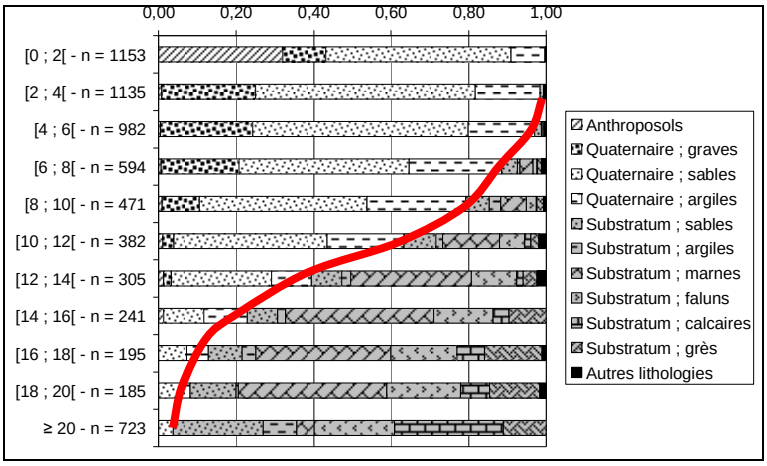

Figure 4. Lithologie statistique de la Terrasse Fxa-b par classe de profondeur.

Elles fournissent aussi, indirectement, la distribution statistique des épaisseurs des formations superficielles : la courbe rouge sépare, par construction, les formations quaternaires du substratum. Elle donne accès à la loi de répartition des épaisseurs du quaternaire. On peut en déduire que la profondeur à laquelle on rencontre le substratum est très variable (comprise dans plus de 80 % des cas entre 6 et 18 mètres). Il conviendra cependant de corriger cette distribution pour tenir compte des effets de « censure » des données : il est fréquent qu'un forage soit interrompu quand le substratum a été atteint, ce qui biaise les distributions en surévaluant l'épaisseur moyenne des terrasses.

Le travail a aussi porté sur la comparaison des propriétés géotechniques (par exemple pressiométriques) des sols des formations superficielles : quelles sont les valeurs attendues ? comment dépendent-elles de la profondeur ? de la lithologie ? de l'appartenance à une terrasse ?

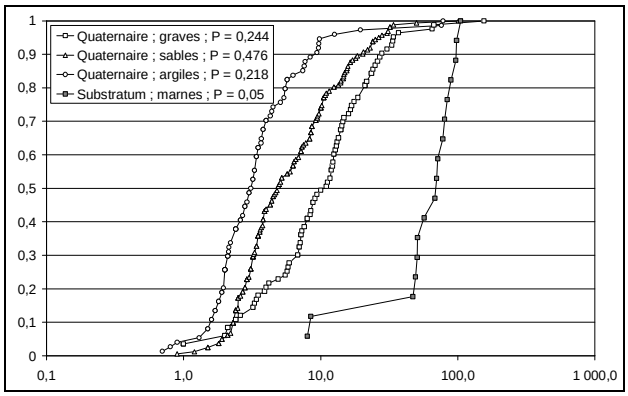

Figure 5. Loi de répartition des modules pressiométriques (MPa), pour les lithologies les plus fréquentes de la Terrasse Fxa-b entre 2 et 10 m de profondeur.

On a par exemple montré qu'à lithologie identique et profondeur similaire, le module pressiométrique dépend de la terrasse (plus élevé dans la terrasse Fxb1 que dans la terrasse Fxa-b) et que, dans chaque terrasse, il dépend de la lithologie (figure 5). Plus finement encore, en exploitant le « champ2 » du codage lithologique, on a montré que les sables graveleux ont de plus fortes caractéristiques que les sables argileux.

6. Perspectives

De premiers résultats probants ont été obtenus lors de ce travail. Ils justifient le bien-fondé de l'approche et la possibilité d'améliorer la connaissance des formations superficielles en analysant l'ensemble des informations géologiques et géotechniques disponibles à l'échelle d'une commune. Il ne s'agit cependant là que d'une première étape, et les pistes ne manquent pas pour poursuivre le travail.

Les développements prioritaires porteront sur :

- l'utilisation de l'analyse variographique pour construire une image tridimensionnelle des propriétés géomécaniques (module pressiométrique, pression limite…) des terrains,
- l'analyse plus précise de l'interface entre le substratum et les formations superficielles : l'existence de zones karstiques est avérée et une meilleure connaissance de leur étendue et de leur distribution spatiale est souhaitée,
- enfin, l'étude de la répartition spatiale des sols à composante argileuse, à fort potentiel de retrait-gonflement fournirait des informations utiles dans une logique de prévention des risques dans une agglomération où les sinistres consécutifs à la sécheresse sont récurrents. La commune de Pessac est à ce titre d'ores et déjà impliquée dans le Projet ARGIC, dans lequel on pourra valoriser les résultats de ces études.

Remerciements

Ce travail est conduit dans le cadre du Projet RIVIERA (Risques en Ville, Equipements, Réseaux et Archéologie), soutenu par le Réseau Génie Civil et Urbain.

Références bibliographiques

Breysse D., Lanot-Grousset S., Dominique S., Piette C., Devallez C. (2005) Valorisation des données géotechniques à l'échelle d'une commune urbaine. *GeoCityNet 2005, 10-11 Octobre 2005, Lille*

Dubreuilh J. (1976) Contribution à l'étude sédimentologique du système fluviatile Dordogne-Garonne dans la région bordelaise ; les ressources en matériaux alluvionnaires du département de la Gironde, *Thèse, Université Bordeaux 1*.

Géovariances (2005) Isatis software manual.

Thierry P., Breysse D., avec la collaboration de Bourgine B., Dominique S., Fabre R., Lastennet R., Marache A., Ochs M., Piette C., Ribeyrols N. et Rodière B. (2004) Le projet RIVIERA : Risques en ville : Equipements, Réseaux, Archéologie. Rapport intermédiaire. *BRGM/RP-53131-FR*, 63 pages.