
Apport d'un modèle 3D du sous sol aux campagnes de reconnaissances géotechniques.

Sophie Dominique * — **Julien Dubost **,***** — **Alain Denis *** — **Antoine Marache ***

* Université Bordeaux 1- Centre de Développement des Géosciences Appliquées (CDGA) — Avenue des Facultés - 33405 TALENCE cedex.
s.dominique@cdga.u-bordeaux1.fr ; j.dubost@cdga.u-bordeaux1.fr.

** SNCF – Direction Régionale Poitou-Charentes Aquitaine – DRI – Pôle Ingénierie – Groupe Etudes Générales (PI.EG) – 54 bis rue Amédée St Germain, 33077 BORDEAUX cedex.

RÉSUMÉ. L'objectif du travail présenté ici est de montrer comment l'utilisation conjointe de bases de données géotechniques d'échelle « urbaine » et d'échelle « projet » aurait pu orienter et améliorer les campagnes de reconnaissances géotechniques d'un projet de plateforme ferroviaire. Ce travail met en avant l'intérêt d'employer des méthodes géostatistiques pour le développement d'un outil d'aide à la gestion de l'aménagement aux échelles (temporelles et spatiales) d'un projet. Il apporte un éclairage complémentaires des problèmes géotechniques que l'on pourrait rencontrer, et permet une capitalisation de l'information avec une gestion dynamique et évolutive du système.

ABSTRACT. The goal of the work presented here is to show how the jointly use of a database at the urban scale and at the project scale can improve geotechnical prospecting of a railway-platform project. This work emphasizes the interest to use geostatistical methods to develop a numerical tool facilitating urban planning. This tool improves geotechnical analysis and allows the accumulation of information with dynamic and progressive management of database.

MOTS-CLÉS. Reconnaissance géotechnique, géostatistique, géologie urbaine.

KEYWORDS. Geotechnical prospecting, geostatistic, urban geology.

1. Introduction

La gestion du sol et du sous-sol urbain est un thème qui a émergé au cours de la dernière décennie. Cet état de fait est dû principalement à l'expansion rapide des agglomérations. La politique d'aménagement du territoire doit donc prendre en compte cette nouvelle situation et intégrer les contraintes liées au sous-sol dans les décisions d'urbanisme.

Cette intégration ne pourra se faire que suivant deux axes primordiaux :

- la mise en place de systèmes d'informations capables de rendre disponible instantanément les données sur le sous-sol (géotechniques, hydrogéologiques, etc.) ;
- la création d'outils méthodologiques et informatiques qui permettent d'avoir une approche immédiate des conditions susceptibles d'être rencontrées avec une indication du degré d'incertitude de l'information produite.

Bordeaux compte parmi les premières villes françaises à avoir pris de telles initiatives. Le projet RIVIERA (Risques en Ville, Equipements, Réseaux, Archéologie) a permis de créer dans un premier temps une base de données géotechnique à l'échelle d'une communauté urbaine (Thierry et Breysse, 2006), puis de développer des outils méthodologiques d'aide à la décision dans différents domaines d'applications.

L'objectif du travail présenté ici est de montrer comment l'utilisation conjointe de bases de données à l'échelle d'une ville et à l'échelle d'un projet aurait pu orienter et améliorer l'élaboration et l'analyse des campagnes de reconnaissances géotechniques (Chilès et Blanchin, 1995) d'un projet de plate-forme ferroviaire.

2. Site d'étude

2.1. Contexte géologique local

Le site étudié se situe sur la bordure Nord-Ouest du Bassin d'Aquitaine. De ce fait, au droit de cette zone, les apports ont été régis par les processus de mise en place des dépôts dans un bassin sédimentaire.

Lorsque des conditions périglaciaires s'installent à la fin du Pléistocène inférieur, les réseaux hydrographiques se structurent et s'encaissent en creusant le substratum. La région subit alors des phases d'érosions et de dépôts fluviaux concourant à la formation de terrasses étagées. Ces terrasses sont principalement constituées de sables et de graviers avec des matrices plus ou moins argileuses suivant le degré d'altération et l'âge respectif des dépôts. Enfin, depuis l'Holocène, s'est mis en place le dépôt d'alluvions récentes (Flandrien) qui est caractérisé par des argiles tourbeuses plus ou moins sableuses. Ces dépôts recouvrent actuellement les zones

situées dans les plaines alluviales, en bord de Garonne. C'est dans cette plaine en rive gauche de la Garonne que se positionne le site d'étude.

2.2. Description de l'infrastructure

Dans les années 1990, compte tenu de l'augmentation du trafic fret de la SNCF, Etat / Région / SNCF et professionnels de la route ont décidé de donner un nouvel élan au transport combiné par la création d'un nouveau site sur la façade Atlantique. Le projet proposait la création d'une plate-forme de transport combiné, sur une superficie totale d'environ 11 ha. Le site retenu se situe à proximité de la Garonne, sur des sols réputés de très mauvaise qualité.

Une telle infrastructure est sensible aux tassements de faible amplitude. Une importante campagne de reconnaissances géotechniques (en trois phases) a conduit au choix d'un renforcement des sols par des plots ballastés pilonnés, mis en place par substitution dynamique. Trois ans après sa mise en service, des affaissements ont été signalés. Une analyse paramétrique des calculs de tassements a mis en avant la sensibilité de la technique de renforcement des sols vis à vis de certains paramètres géotechniques et a émis des réserves quant aux conclusions des études géotechniques initiales (Dubost *et al.*, 2007).

3. Données disponibles

3.1. Base de données RIVIERA : base de données d'échelle « urbaine »

A l'origine du projet RIVIERA, les données dont on disposait - issues de nombreuses sources (brgm, Lyonnaise des eaux, services de l'archéologie, bureaux d'étude) - se caractérisaient par une grande diversité de formats et d'interprétations. En effet, un même sondage n'est pas lu de la même façon par un géologue ou un géotechnicien car la manière de décrire les terrains traversés dépend de l'utilisation que l'on fait du sondage. C'est pourquoi il avait été établi un référentiel commun aux différentes disciplines concernées par le projet RIVIERA (Thierry et Breyse, 2006). Cette « grille de lecture » a permis de regrouper toutes les données sous un même format afin de pouvoir les exploiter.

Ces données ont servi à construire, en rive gauche de la Garonne, un macro-modèle reprenant les surfaces enveloppes des différentes formations géologiques (Bourguin *et al.*, 2006). L'utilisation des méthodes géostatistiques pour cette construction permet d'y rattacher une précision/incertitude aux estimations de cotes.

3.2. Reconnaissance géotechnique du site : base de donnée d'échelle « projet »

Les investigations géologiques et géotechniques menées pour la conception du site s'organisent en trois étapes successives : la phase APS (Avant Projet Sommaire), la phase APD (Avant Projet Détaillé), et une phase PRO-REA (Projet-Réalisation).

Au total, environ 250 sondages ont été réalisés pour reconnaître ces sols très hétérogènes. Les reconnaissances menées ont conclu à un modèle simplifié en trois couches : des remblais anthropiques, des sols compressibles (remplissage alluvionnaire = formation flandrienne) et des terrasses alluviales sablo graveleuses (supposées incompressibles) surmontant un substratum calcaire (Figure 1). Compte tenu de la sensibilité de l'infrastructure projetée aux tassements, une attention particulière a été portée à la caractérisation des sols compressibles.

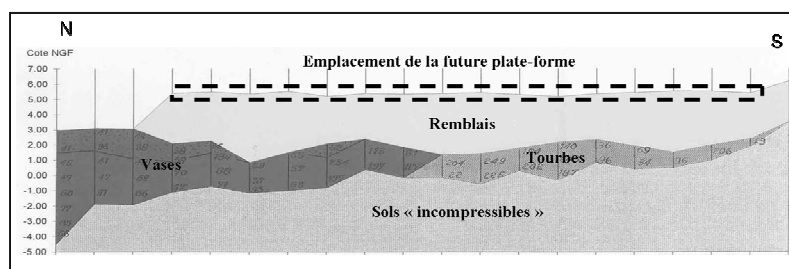


Figure 1. Coupe schématique nord / sud au niveau du site.

De manière à améliorer l'analyse des données disponibles, ces dernières ont été codées selon une structure proche de celle mise en œuvre pour la base de données RIVIERA. Les différences reposent essentiellement sur la spécificité des informations codées, plus précise à l'échelle d'un site que d'une agglomération.

4. Valorisation de la base de données d'échelle « urbaine »

4.1. Estimation de la cote du Flandrien par krigeage sous contraintes d'inégalités.

L'interpolation d'une surface par krigeage ordinaire (Mathéron, 1962) est une combinaison linéaire des valeurs mesurées pondérées par leur corrélation spatiale. Le krigeage sous contraintes d'inégalités est une technique qui permet d'utiliser une variable qui n'est pas définie par une valeur exacte en un point, mais par un intervalle. Cet intervalle est borné par les données d'inégalité.

Le krigeage sous contraintes d'inégalités se réalise en deux étapes consécutives :

- la première étape consiste à simuler, au droit du point où l'on possède une donnée d'inégalité, une valeur qui appartienne à l'intervalle défini par les données d'inégalité, en accord avec le modèle de variogramme défini (qui quantifie la perte de corrélation spatiale entre deux observations) et les données exactes environnantes;
- la seconde étape consiste à réaliser un krigeage qui utilise les données exactes et les données simulées à l'étape précédente.

L'altitude de la base de la formation flandrienne a donc été estimée selon cette procédure. A l'emplacement de chaque sondage APS, on estime l'altitude de l'interface et l'écart type de krigeage associé. La moyenne de ces écarts types est de l'ordre de 3,9 mètres. On ne peut donc estimer l'épaisseur de sols compressibles de manière fiable. Par contre, le modèle montre une structure géologique qui, à l'échelle du site, présente un approfondissement local significatif pour le projet. Cet approfondissement s'explique par le creusement du substratum par le réseau hydrographique. Cette paléotopographie s'observe au niveau des embouchures des affluents de la Garonne aux environs de Bordeaux.

4.2. Validation de l'information

La base de données RIVIERA permet donc de modéliser l'altitude de la base des sols compressibles sur l'ensemble de la superficie choisie pour l'étude. Cette estimation est accompagnée de son incertitude (écart-type de krigeage) qui qualifie la qualité de l'estimation. Afin d'évaluer la fiabilité de ce macro-modèle, on a choisi d'utiliser les sondages du site (base de données « projet »), qui n'ont pas été intégrés au calcul des surfaces, pour les comparer à la prédiction du modèle. Dans ce but, on compare directement l'altitude estimée de la base des sols compressibles avec l'altitude relevée dans les sondages APS du projet (figure 2).

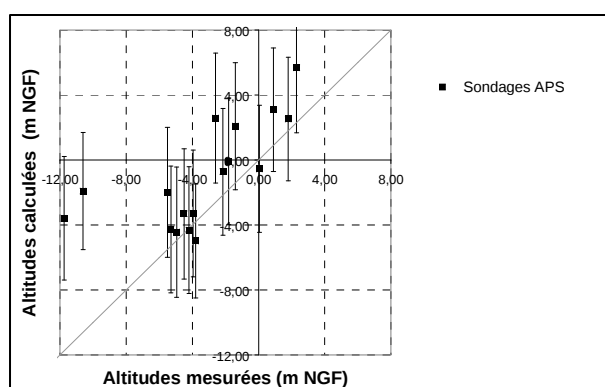


Figure 2. Comparaison entre estimations du modèle et valeur de terrain (1^{ère} campagne). Les barres d'erreur représentent l'écart-type de krigeage associé.

Le coefficient de corrélation entre valeurs prédites et valeurs observées est de 0,69. Pour un échantillon de 17 individus, ce coefficient de corrélation est significatif au risque 1%.

La profondeur de l'interface sols compressibles / sols incompressible est globalement sous estimée, ce qui implique une prévision de l'épaisseur compressible inférieure à la réalité. Cependant, les écarts les plus importants apparaissent pour un

groupe de sondages carottés issus d'une même étude. En écartant ces sondages, la correspondance modèle / terrain serait bien meilleure. Ceci doit inciter à vérifier les données de ces sondages, afin de déterminer si les différences constatées ne sont pas liées à une erreur d'observation, de codage ou d'interprétation (Favre, 2000). Cette approche permet de contrôler la qualité des données.

Le modèle géologique de la base RIVIERA ne fournit pas une information quantitative suffisamment fiable pour être utilisée directement au niveau du projet. L'écart entre l'altitude de l'interface donnée par le modèle et celle observée dans les sondages à posteriori est en moyenne de 2,3 mètres, ce qui est trop important pour permettre d'utiliser les valeurs du modèle, pour des calculs de tassement par exemple. Par contre, l'altitude estimée, augmentée de son écart type, donne une idée appréciable des profondeurs minimales à atteindre par forage. De plus, les estimations confirment la structure géologique locale observée sur la carte géologique.

5. Couplage des bases des données

Le même travail a été reproduit en intégrant les sondages APS à la base de données RIVIERA. L'interface sols compressibles / terrasse alluviale est ensuite recalculée. La nouvelle estimation est d'abord comparée avec l'estimation initiale, puis avec les données des sondages de la phase APD.

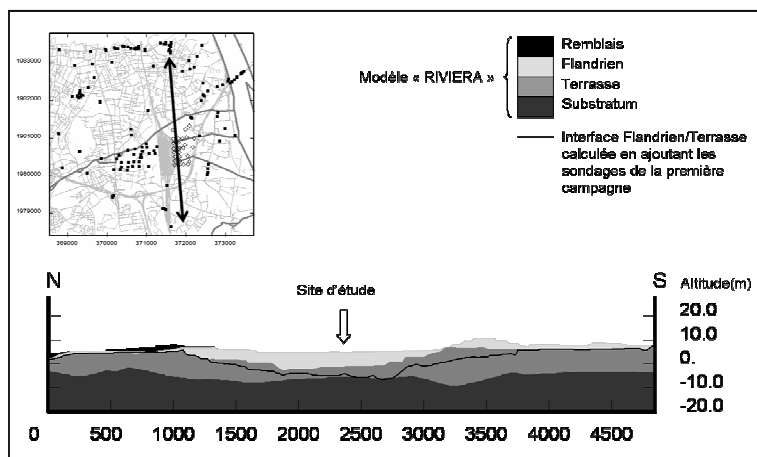


Figure 3. Coupe N-S dans le modèle.

La figure 3 présente une coupe nord/sud à travers le modèle au niveau du site, à laquelle on superpose la nouvelle interface Flandrien / Terrasse calculée après intégration des sondages APS. On distingue très nettement l'approfondissement en

forme de cuvette au droit du site d'étude, attribuable au creusement des formations terrasses par des affluents de la Garonne. On constate également que l'intégration des sondages APS modifie la position de l'interface calculée, en la plaçant en dessous de celle estimée dans un premier temps.

Le modèle géologique est logiquement amélioré par l'intégration des nouveaux points : l'écart type de krigeage moyen, sur l'emprise du site, est réduit de 3,9 à 2,4 mètres. La différence moyenne entre l'estimation du modèle et la valeur de l'altitude mesurée dans les sondages de la campagne suivante (APD) est aussi réduite, mais reste significative pour certains points. Le coefficient de corrélation reste égal à 0,69, mais le nombre d'individus plus élevé le rend plus significatif (risque 0,1%). Enfin, on constate que les altitudes calculées sont globalement inférieures à celles mesurées, ce qui signifie que le modèle prédit des épaisseurs qui sont cette fois supérieures à celles observées (figure 4).

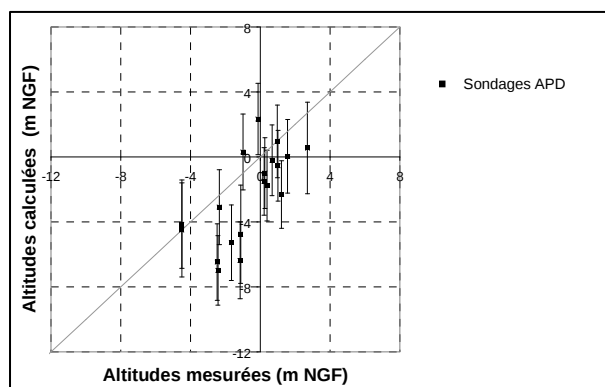


Figure 4. Comparaison entre estimations du modèle et valeurs de terrain (2^{ème} campagne). Les barres d'erreur représentent l'écart-type de krigeage associé.

L'enrichissement de la base de données avec les nouveaux sondages va donc dans le sens de la sécurité. Les sondages APS positionnent la base des sols compressibles plus profondément que ce que prédit le modèle, ils influent donc sur le modèle après leur intégration ; les profondeurs estimées des sondages APD sont alors surestimées. Ce constat conduit à s'interroger sur l'information issue de la campagne APS : les surprofondeurs relevées sont-elles attribuables à une réalité géologique non mise en évidence par les sondages suivants ou bien correspondent-elles à une erreur des sondages eux même ou de leur interprétation ? Le constat le plus surprenant est que seulement 20% des sondages APD recoupent l'interface Flandrien / terrasse. L'exploitation d'une base de donnée, à l'aide de méthodes géostatistiques, permet de formuler des objectifs précis de longueur de forages. Ici, les sondages APD ne sont pas assez profonds, la reconnaissance de l'interface sol compressible / sol non compressible semble être insuffisante.

6. Conclusion

Les travaux présentés montrent l'intérêt d'avoir une vision complète de l'ensemble des campagnes de reconnaissances géotechniques.

La base de données RIVIERA fournit une vue d'ensemble du contexte géologique et géotechnique d'un site. Elle permet de formuler des objectifs de reconnaissances en fonction de la nature et des épaisseurs probables des sols susceptibles d'être rencontrés. Le modèle géologique créé ne remplace pas pour autant l'obligation de reconnaissance d'un site, il apporte un premier éclairage dans les phases d'avant-projet, mais présente un niveau d'incertitude élevé. Cette incertitude est diminuée grâce à l'intégration de nouveaux sondages au fur et à mesure de l'avancement du projet. On obtient ainsi un outil dynamique qui permet d'orienter les choix des phases futures du projet en fonction des phases précédentes (positionnement et longueur des sondages par exemple). De plus, un autocontrôle des phases en cours est rendu possible, en mettant par exemple en lumière des contradictions ou des anomalies entre les données des sondages et le modèle établi.

La construction de bases de données géotechniques, et leur exploitation par des méthodes statistiques et géostatistiques, offre un outil complémentaire pour l'analyse du site et l'élaboration d'un modèle géologique, et constitue un outil d'aide à la décision et au suivi de projet pour les aménageurs.

7. Bibliographie

- Bourgine B., Dominique S., Marache A., Thierry P. « *Tools and methods for constructing 3D geological models in the urban environment: The case of Bordeaux* ». In Proceeding of the 10th IAEG Congress, 6-10 September 2006, Nottingham, Paper No 72.
- Chilès J.P., Blanchin R. « *Contribution of geostatistics to the control of the geological risk in civil-engineering projects: The example of the Channel Tunnel* ». In Application of Statistics and Probability, Lemaire, Favre & Mébarki (eds), Blakeme, Rotterdam, 1995.
- Dubost J., Denis A., Chanson M., La Borderie C. « *Analyse de désordres affectant un remblai sur sols renforcés* ». Revue Européenne de Génie Civil, 2007. (à paraître)
- Favre J.L. « *Les différents types d'erreurs et leur prise en compte dans les calculs géotechniques* ». Revue Française de Géotechnique, N°93, 4^{ème} trimestre 2000.
- Matheron G. « *Traité de géostatistique appliquée* » Mém. BRGM,14,t.I & II 1962.
- Thierry P. et Breyse D., avec la collaboration de E. Vanoudheusden, A. Marache, S. Dominique, B. Rodière, B. Bourguine, P. Régaldou-Saint Blancard, Ch. Piette, F. Rivet, R. Fabre. « *Projet RIVIERA : Risques en Ville : Equipements, Réseaux, Archéologie* ». Rapport final BRGM/RP-55085-FR novembre 2006