
Le projet RIVIERA « Risques en Ville : Equipements, Réseaux, Archéologie » : résultats, bilan et conclusions

Pierre Thierry

BRGM - ARN
3 avenue C. Guillemin
BP6009
F-45060 Orléans cedex2
p.thierry@brgm.fr

RÉSUMÉ. Le projet RIVIERA « Risques en Ville : Equipements, Réseaux, Archéologie » a permis de conjuguer, pendant 4 ans, les compétences de scientifiques et de praticiens de la gestion urbaine pour évaluer les possibilités d'une gestion intégrée du sous-sol à l'échelle d'une ville. Ce projet s'est traduit par la réalisation d'une base de connaissance (modèles 3D géologiques et géotechniques) du sous-sol à l'échelle de la ville, exploité au travers de trois applications opérationnelles (urbanisme, archéologie préventive, assainissement). Ce travail, appliqué à l'agglomération bordelaise, a permis de démontrer d'une part la faisabilité organisationnelle et technique, d'autre part l'intérêt pour les praticiens d'une approche intégrée de la géologie, de la géotechnique et de l'hydrogéologie à l'échelle d'une agglomération.

ABSTRACT. The RIVIERA project, standing for "Risks in Towns and Cities: Equipment, Networks and Archaeology" made it possible to combine, during 4 years, competences of scientists and experts of urban management to evaluate the possibilities of an integrated management of the basement on a city scale. This project resulted in the construction of a base of knowledge (geological and geotechnical 3D models) of the basement on the scale of the city. This model has been exploited through three operational applications (town planning, preventive archaeology, cleansing). This work, applied on the city of Bordeaux, made it possible to prove on the one hand organisational and technical feasibility, in addition interest for the experts of an integrated approach of geology, geotechnics and hydrogeology on an agglomeration scale.

MOTS-CLÉS : modèle 3D géologique, sous-sol urbain, Bordeaux

KEYWORDS: Geological 3D model, urban underground, Bordeaux.

1. Introduction

Pour permettre d'appréhender le risque géotechnique à l'échelle d'une agglomération, le projet **RIVIERA** (Risques en Ville : Equipements, Réseaux, Archéologie) s'est fixé pour objectif la mise au point d'un outil intégré d'aide à la gestion de l'aménagement urbain qui permette :

- une évaluation, précoce dans les processus de décision, des conditions géologiques, géotechniques, hydrogéologiques ou archéologiques, susceptibles d'être rencontrées lors de travaux,
- une capitalisation des expériences, associée à une gestion dynamique et évolutive du système et une meilleure compréhension des problèmes rencontrés, par retour d'expérience.

Ce projet s'est articulé autour d'une réalisation pilote, appliquée à quelques secteurs tests de l'agglomération de Bordeaux. Les travaux ont été conduits en 2 étapes principales :

- construction d'une base de connaissance du sous-sol (modèles 3D géologiques, géotechniques, hydrogéologiques) ;
- développement des prototypes (maquettes) de 3 « applications-métiers » : l'urbanisme opérationnel, la sauvegarde du patrimoine archéologique, la gestion des réseaux d'assainissement.

Porté initialement par 5 partenaires (BRGM, Université de Bordeaux 1, Mairie de Pessac, Service Régional de l'Archéologie (DRAC/SRA), Lyonnaise des eaux – Suez), le projet a connu une dynamique partenariale avec l'association de 3 partenaires supplémentaires : l'AGTS (cellule de transfert), le LRPC-Aquitaine, la SNCF. Ce projet, labellisé par le Réseau Génie Civil et Urbain (RGC&U) a bénéficié d'un soutien du Ministère en charge de la Recherche. Le projet RIVIERA s'est déroulé sur 4 ans. Il a permis de démontrer d'une part la faisabilité organisationnelle et technique, d'autre part l'intérêt pour les praticiens d'une approche intégrée de la géologie, de la géotechnique et de l'hydrogéologie à l'échelle d'une agglomération (Thierry et al. 2006).

Mise en forme : Puces et numéros

2. Résultats

2.1 Construction d'une base de connaissance du sous-sol

Destiné aux experts-ingénieurs, ce modèle 3D, basé sur la collecte, l'analyse et l'interprétation des données existantes, disponibles en archives, vise :

1. la connaissance du sous-sol : localisation, géométrie et propriétés des différentes formations géologiques ou anthropiques présentes en chaque point, couplage géologie/géotechnique, évaluation du patrimoine archéologique ;

2. l'évaluation spatialisée de l'incertitude sur les différents paramètres représentés : épaisseurs, caractéristiques mécaniques, variabilité des formations, etc.

Pour atteindre ce résultat, un travail important de collecte des données a permis de rassembler environ 10 000 descriptions d'ouvrages de reconnaissances (sondages, piézomètres et essais géotechniques) auprès des différents partenaires et de la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB). Des développements méthodologiques et logiciels importants ont permis de réaliser la mise en cohérence d'une telle multiplicité d'informations hétérogènes. A partir de là, deux types de modélisations géostatistiques ont été mises en œuvre : une modélisation multicouche (2,5D) permettant la représentation de la géométrie des différentes formations géologiques, une modélisation tridimensionnelle (3D) pour appréhender la variation des caractéristiques mécaniques (module pressiométrique, pression limite, ...) ou hydrogéologiques (perméabilité) au sein de ces formations. Dans le premier cas, les développements ont porté sur la mise en œuvre d'interpolations par krigeage sous contraintes d'inégalités. Dans le deuxième cas des techniques de simulations plurigaussiennes ont été développées.

2.2 Développement des prototypes (maquettes) de 3 « applications-métiers »

Destinées aux ingénieurs et techniciens, ces applications concernent 3 « métiers » de la gestion urbaine.

2.2.1 Urbanisme opérationnel

L'objet de l'étude est d'apporter une plus value aux données géotechniques et lithologiques existant sur la commune de Pessac. L'idée est de construire un modèle 3D géotechnique, dérivé ensuite en un outil d'aide pour l'interprétation des reconnaissances pour un grand aménagement. On a donc établi une caractérisation géotechnique des formations litho-stratigraphiques rencontrées sur la commune de Pessac. Pour cela les distributions statistiques des valeurs de certaines propriétés mécaniques mesurées par les essais de reconnaissance géotechnique sont étudiées. Les essais réalisés et les propriétés mécaniques associés sont :

- des essais pressiométriques : module pressiométrique EM ; pression limite pl,
- des essais de pénétromètres statiques : résistance de pointe qc ; frottement latéral fs,
- des essais de pénétromètres dynamiques : résistance de pointe Qd.

L'analyse des données a été faite au travers du formalisme bayésien qui repose sur le principe que la probabilité d'occurrence d'une lithologie donnée sachant le résultat d'un essai mécanique est égale au produit de la probabilité d'occurrence du résultat de l'essai mécanique connaissant la lithologie par la probabilité d'occurrence de la lithologie, le tout étant divisé par la probabilité d'occurrence du résultat de l'essai mécanique.

Suite à cette étude particulière des propriétés mécaniques des formations des terrasses et des colluvions, un modèle 3D de module pressiométrique a été réalisé au moyen de la méthode du krigeage d'indicatrices et de la méthode des simulations conditionnelles séquentielles d'indicatrices. Les résultats nous donnent des grilles 3D de probabilité que le module pressiométrique local soit inférieur à une valeur donnée. Ces méthodes se heurtent à la difficulté de la modélisation des variogrammes expérimentaux horizontaux, compte tenu de la variabilité latérale de la propriété mécanique.

2.2.2 Sauvegarde du patrimoine archéologique

En site urbain, à la base des niveaux anthropisés, le paléorelief correspond globalement à la surface géologique la plus récente. La connaissance de cette surface est capitale pour comprendre les raisons et les modalités des implantations humaines. L'objectif de cette application-métier est donc de retravailler les données disponibles sur le cœur historique de Bordeaux, en fonction du référentiel choisi, pour les intégrer dans un modèle 2,5D, ceci afin de déterminer des épaisseurs d'Anthroposol¹ ou d'orienter les interventions en archéologie préventive. Dans le cas du centre-ville de Bordeaux, l'un des éléments majeurs de cette problématique est la localisation et l'évolution des cours des deux principales rivières que sont le Peugue et la Devèze. La réalisation d'un modèle sur ce secteur-test de la CUB, par krigeage sous contraintes d'inégalités en utilisant principalement des données lithologiques des forages géotechniques, a permis de voir sous un jour nouveau l'évolution du centre ville historique et de montrer que l'image usuelle qu'avaient les archéologues sur l'hydrographie de ce secteur était incomplète.

2.2.3 Gestion des réseaux d'assainissement

Cette « application métier » vise à évaluer l'intérêt d'une approche géologique intégrée, au travers d'une cartographie de la susceptibilité des réseaux d'assainissement à l'infiltration des eaux claires parasites, pour l'optimisation des contrôles et de la maintenance afférents. Le principe de construction de la carte des susceptibilités à l'infiltration repose sur l'intersection du réseau d'assainissement avec un modèle 3D lithologique des terrains et les « surfaces enveloppes » de la nappe. Selon la position du collecteur par rapport au niveau de la nappe, et selon la perméabilité des terrains traversés, on définit un degré de susceptibilité à l'infiltration plus ou moins fort. Sur le secteur de Cantinolle (au nord-ouest de la CUB), l'analyse des données piézométriques disponibles a permis de calculer les surfaces enveloppes des hautes eaux et des basses eaux. Un modèle 3D de la perméabilité des formations superficielles a été calculé par la méthode de simulation plurigaussienne. Après un très important travail de collecte et de mesure des altimétries du réseau par l'exploitant, la susceptibilité du réseau aux infiltrations a pu être évaluée sur le secteur d'étude. A l'issue de cette étude, une première analyse

¹ Anthroposol (sol historique) : sol naturel profondément remanié par l'homme ou sol artificiel (remblais)

coûts/bénéfices en termes économiques et de délais a été réalisée pour vérifier l'intérêt d'une telle approche, par rapport aux autres méthodes possibles (Inspections TéléVisées ITV, diagnostic nocturnes des débits d'infiltration...).

2.3 Diffusion des résultats obtenus

En interne au sein de l'agglomération, les résultats ont été présentés lors d'un séminaire d'une journée, organisé par la Mairie de Pessac, en présence notamment de M le Maire de Pessac, du Président de la CUB – Président de la Région Aquitaine et de représentants du Réseau Génie Civil et Urbain (RGC&U) ainsi que du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable. En externe auprès de la communauté scientifique, les résultats du projet RIVIERA ont fait l'objet de dix publications.

Mise en forme : Puces et numéros

3. Bilans

3.1 Gestion des données

Un premier point, extrêmement important, mérite d'être souligné. En effet, le Projet RIVIERA a expérimenté et surmonté les difficultés liées à la mise en place d'une logique collective de partage et d'exploitation des données techniques à l'échelle de l'agglomération. Les questions à résoudre sont principalement liées à :

- la propriété de ces données : il a été nécessaire d'élaborer des conventions de mise à disposition mais également des modes de fonctionnement pour permettre et faciliter les échanges entre partenaires via INTERNET, en protégeant les droits des propriétaires,
- la multiplicité des données (environ 10 000 sondages sur Bordeaux) ainsi que la diversité des services susceptibles de posséder des données complémentaires utiles. De plus, les modes de stockage de l'information, le plus souvent dossiers « papier » serrés dans des boîtes d'archives, rend toute collecte extrêmement coûteuse en temps,
- l'absence d'une logique concertée de valorisation de ces données a conduit au développement de plusieurs Bases de Données dans les différents services et organismes concernés, dont la fusion a nécessité un examen attentif (doublons, erreurs de codage, référentiels incompatibles...).

Au-delà des questions relatives à l'organisation administrative, la constitution de la Base de Données est confrontée à une question clé, celle de la consolidation des données admises dans la Base. Il s'agit d'une part (a) de vérifier la pertinence et le caractère exact des données recensées, et d'autre part (b) de les intégrer dans la base en respectant un référentiel qui en permet l'exploitation efficace.

3.2 Intégration et traitement des données

Le premier niveau d'intégration correspond à la modélisation des surfaces enveloppes des différentes formations géologiques constitutives du sous-sol de l'agglomération. Les techniciens disposent par là d'une base de connaissance solide pour l'interprétation des données nouvelles. La réalisation du modèle sur le cœur historique de Bordeaux a montré un apport certain pour la compréhension par les archéologues de l'hydrographie de ce secteur. Il est donc important de souligner que des données, dont l'échelle de lecture semblait grossière comparée à celle utilisée par les archéologues, se révèlent capitales pour la construction d'une image d'ensemble.

Le deuxième niveau d'intégration vise à la caractérisation, lithologique et en termes de propriétés mécaniques, des différentes formations géologiques. Il s'agit d'établir des lithologies statistiques de référence qui permettent d'apprécier la probabilité, dans une formation donnée et à une profondeur donnée, de rencontrer telle ou telle lithologie. Elles permettent aussi d'identifier les distributions d'épaisseur dans les terrasses et les colluvions. De telles informations sont susceptibles de se révéler très utiles pour aider à l'orientation dans la définition initiale des opérations d'aménagement.

Un troisième niveau correspond à l'intégration dans le modèle litho-stratigraphique des éléments d'hydrogéologie superficielle. L'enveloppe des surfaces de la nappe phréatique superficielle, hautes eaux maximales (HE) et basses eaux minimales (BE) est obtenue par interpolations à partir de chroniques piézométriques, de données limnimétriques ainsi que par la localisation des principales sources. La disponibilité de telles enveloppes, si elle ne permet pas de déterminer précisément la profondeur de la nappe phréatique à un moment donné sur un secteur donné, constitue néanmoins une information précieuse sur les possibilités d'enneigement d'un secteur.

Un dernier niveau d'intégration correspond au développement de modèles 3D de répartition des caractéristiques mécaniques ou hydrauliques au sein des formations géologiques. Les résultats obtenus actuellement ne sont pas pleinement satisfaisants, même s'ils ont permis d'affiner la cartographie de la susceptibilité aux infiltrations des réseaux d'assainissement. La raison principale tient à la variabilité latérale et verticale des propriétés au sein d'un même horizon. Par rapport à une telle variabilité, la maille d'information (répartition des sondages), si elle se révèle adaptée aux premiers niveaux d'intégration, ne répond plus aux contraintes des nouveaux objets géologiques que l'on cherche à modéliser (chenaux, cuvettes, etc.).

On touche ici un point « crucial » qui apparaît dans l'étude. Une compréhension fine des processus d'érosion / sédimentation (identification des formes alluviales, des logiques de dépôts, des différents phénomènes d'altérations et de remises en mouvement...) se révèle indispensable pour envisager une représentation cohérente des variations des paramètres mécaniques. L'analyse de cette logique géologique doit donc être poussée aussi loin que possible pour constituer la meilleure base pour la poursuite de l'étude.

4. Conclusions et perspectives

Des 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 ré-analysant l'ensemble des informations géotechniques disponibles à l'échelle d'une agglomération. Il est maintenant nécessaire de développer et d'étendre la méthode, et les pistes ne manquent pas pour poursuivre le travail.

4.1 Du point de vue scientifique

Du point de vue scientifique, cette étude a permis de montrer qu'il est possible d'apporter une plus value déterminante à des données géotechniques, lithostratigraphiques et piézométriques isolées, moyennant les traitements statistiques et les méthodes d'analyse appropriés.

4.1.1 La consolidation des données et des hypothèses

Au-delà de la nécessaire poursuite de la collecte des informations géotechniques et de leur codage, il convient de s'interroger sur la qualité de la reconstruction de la lithologie, car nous avons dans ce travail adopté des règles simples de reconstruction, sur l'hypothèse d'une stratification horizontale des sols. Cette hypothèse est globalement juste pour les surfaces enveloppes des formations géologiques bordelaises. Elle ne se vérifie plus pour les variations lithologiques au sein de ces formations. Une meilleure définition des objets géologiques pertinents (géométries, dimensions, mécanismes de formation et d'évolution) constitue un préalable indispensable pour progresser dans leur modélisation. A partir de là, il sera nécessaire d'envisager l'emploi de méthodes géostatistiques susceptibles de proposer une représentation « plausible » des objets géologiques considérés.

4.1.2 L'analyse statistique multivariable

En ce qui concerne le modèle géostatistique 3D, de nombreuses perspectives sont envisageables à la suite de cette étude. Le même travail peut être mené avec d'autres paramètres géotechniques (autres paramètres pressiométriques, paramètres pénétrométriques, mesures en laboratoire). Cependant, avec une approche monovariante telle que menée jusqu'ici, se posera toujours le problème de la densité d'échantillonnage avec la présence de zones sous-échantillonnées et où, par conséquent, les résultats seront imprécis. Pour diminuer ce problème, une approche multivariable peut-être envisagée en couplant des paramètres géotechniques (de nouveaux problèmes seront alors à résoudre tels que le support d'échantillonnage). Enfin il peut également être envisageable de coupler l'information géotechnique à la lithologie. Ceci demandera dans un premier temps de construire un modèle lithologique sur l'ensemble de la commune et de se servir ensuite du paramètre lithologie comme variable auxiliaire. Les différents modèles pourront alors être

comparés et validés afin de déterminer l'approche optimale pour le développement d'un outil d'aide à la décision en aménagement urbain.

4.1.3 La recherche de sources d'informations complémentaires

Nous avons vu que les archives (sondages) ne permettront que difficilement d'appréhender la variabilité des propriétés mécaniques. Il devient donc nécessaire de réfléchir à la possibilité d'acquérir, à très faible couts, des informations complémentaires par des méthodes extensives et non-invasives (géophysique, interférométrie, ..).

4.2 Du point de vue de la gestion urbaine

Deux pistes principales se présentent.

4.2.1 L'application des résultats obtenus à de nouvelles problématiques

L'analyse de l'interface terrasses/substratum, et de la géométrie de cette interface est une question importante, puisqu'elle fournit l'épaisseur des terrasses. Elle est aussi liée à la question des karsts. L'existence de cavités karstiques remplies de formations alluviales peut conduire à une interprétation erronée de la position de l'interface vraie. Les graphiques de lithologie statistique devraient être ré-analysés dans cette perspective.

La localisation des argiles sensibles au retrait-gonflement est nécessaire pour mieux appréhender les risques induits. L'analyse de leurs propriétés mécaniques permettrait de valoriser les données pénétrométriques pour compléter la connaissance de cette localisation.

4.2.2 L'extension de l'analyse coûts/bénéfices

Une analyse coûts/bénéfices a été initiée par la Lyonnaise des Eaux dans cette étude, à l'échelle de l'agglomération. Elle demande encore à être développée, en tenant compte de manière plus fine des données réellement disponibles pour l'application de chacune des méthodes.

5. Bibliographie

P. Thierry, D. Breysse, E. Vanoudheusden, A. Marache, S. Dominique, B. Rodière, B. Bourguine, P. Régaldou-Saint Blancard, Ch. Piette, F. Rivet, R. Fabre (2006) Le projet RIVIERA : Risques en ville : Equipements, Réseaux, Archéologie Rapport final. BRGM/RP-55085-FR 247 p. 144 fig., 30 tableaux, 3 annexes