

Le Métro M2 de Lausanne : site exemplaire d'une application de microgravimétrie urbaine

Pier Vittorio Radogna, Raymond Olivier et Philippe Logean

emails: piervittorio.radogna@ig.unil.ch, raymond.olivier@ig.unil.ch et philippe.logean@ig.unil.ch

Institut de Géophysique
Bât. Collège Propédeutique
1015 LAUSANNE

INTRODUCTION

Le nouveau métro "M2" doit être construit dès le printemps 2004 dans la ville de Lausanne en Suisse (fig. 1), de 6 km de long à partir d'Ouchy, au bord du lac (380 m) jusqu'à Epalinges au nord de Lausanne (698 m) avec 12 stations intermédiaires. Le projet de génie civil prévoit qu'il sera essentiellement situé dans la Molasse entre la place du Flon et Epalinges. La grande quantité de données géologiques récoltées pour l'enquête et les nombreux forages présents sur le site se sont révélés être une occasion unique d'entreprendre une étude de microgravimétrie urbaine exemplaire.

OBJECTIFS

Le but est ici d'évaluer l'épaisseur du remplissage morainique sur un fond rocheux molassique et d'en établir une coupe dans l'axe du futur tracé. Puis de montrer que l'application de cette méthode géophysique, non destructive, est à même de limiter le nombre de sondages mécaniques lors de l'avant-projet et du projet définitif. Ce qui conduirait à une réelle économie dans la réalisation de l'ouvrage de génie civil.

En effet, si lors de l'avant-projet, pour choisir le meilleur corridor possible pour le tracé d'un futur Métro, sur un choix de variantes répondant aux critères des transports urbains, le projet doit fixer la position du tunnel aussi bien en plan qu'en profondeur en accord avec le type d'ouvrage (dans les terrains meubles, dans la molasse ou encore mixte) et les contraintes de trafic (stations de métro). Lors de ces deux phases, un grand nombre de forages mécaniques sont implantés afin de connaître le mieux possible où se situe le toit de la molasse. Car si le tunnel est creusé à l'aide d'un tunnelier, il est impératif de bien le connaître car le tunnelier ne doit pas sortir de ce milieu au risque de se coincer ce qui entraînerait des coûts et des retards considérables, voire même la perte de l'engin.

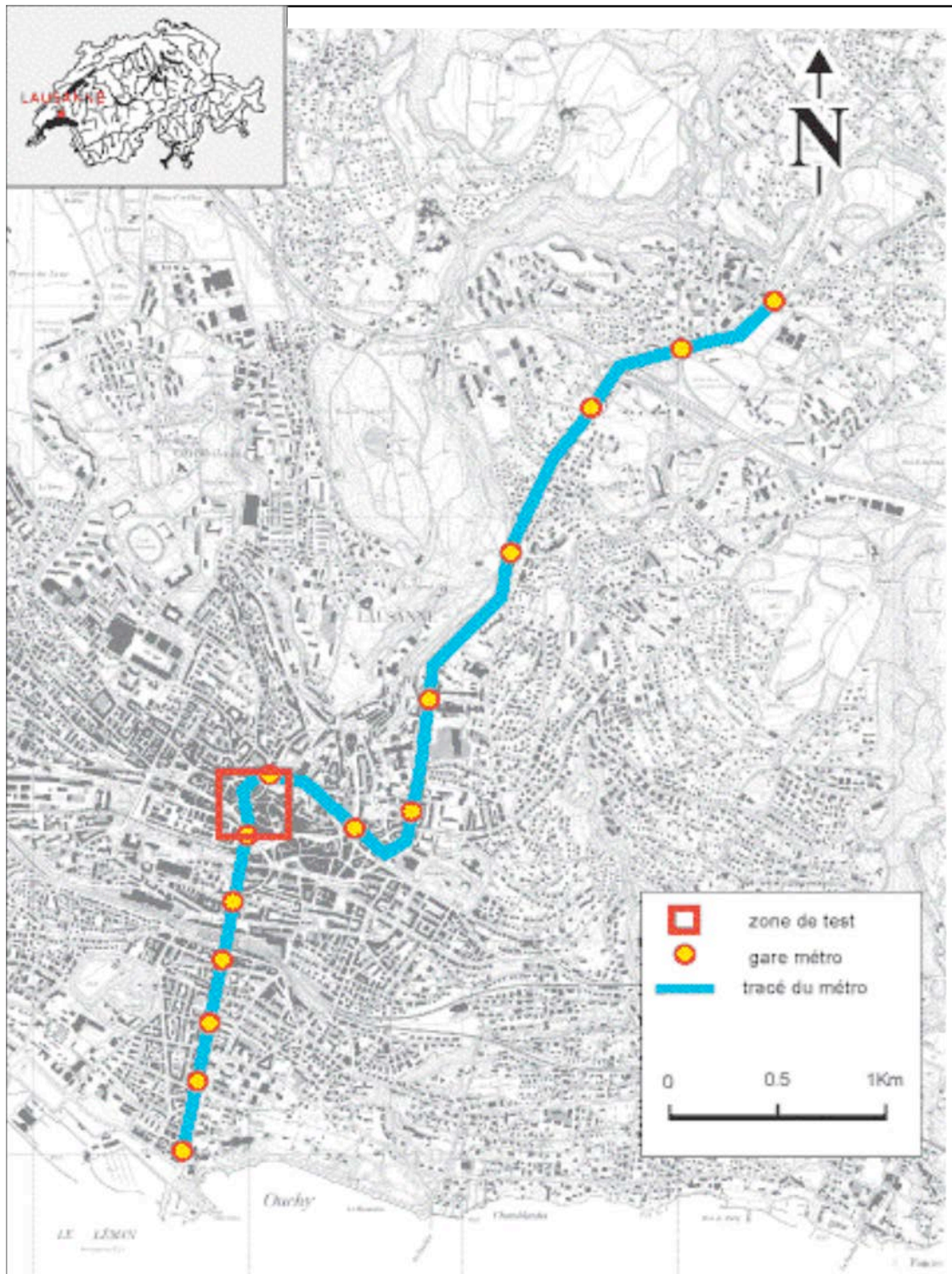


Figure 1

LE CHOIX DE LA METHODE GEOPHYSIQUE

La méthode gravimétrique est certainement la méthode géophysique la moins perturbée par les bruits électromagnétiques, électrique, magnétique ou encore par le trafic automobile si on la compare à d'autres méthodes géophysiques (Nozaki et Kanemori, 1996). C'est une méthode non destructive qui s'adapte particulièrement bien en milieu urbain. L'interprétation des mesures de pesanteur acquises à la surface du sol avec une grande résolution, permet de modéliser la structure du sous-

sol, c'est-à-dire de situer en profondeur de l'interface terrains meubles – molasse. Et de répondre ainsi aux besoins des ingénieurs civils en leur donnant la profondeur du socle tertiaire avec une précision de quelques mètres voire de 1 à 2 mètres.

Ainsi lorsqu'il s'agit de déterminer un modèle géologique avec la meilleure précision possible, nous appliquons la méthode de la microgravimétrie où les mesures sont établies avec une résolution de 5 millièmes de milligals (5mGal) ce qui représente la 500 millionième partie de g (accélération terrestre). Dans ce cas, l'instrument utilisé est un microgravimètre ; nous en avons utilisé deux types, Lacoste&Romberg et Scintrex.

La microgravimétrie en milieu urbain implique de corriger avec soin les perturbations gravifiques sur la mesure de la pesanteur dues aux effets de la topographie, des bâtiments, des caves et de l'infrastructure des réseaux de distribution (Yule et al., 1998) afin d'isoler l'effet gravifique dû exclusivement à l'épaisseur du remplissage des terrains meubles.

A part l'effet de la topographie, la méthode standard de la gravimétrie ne requiert pas ces nouvelles corrections, aussi la microgravimétrie ne s'applique-t-elle que sur des zones restreintes, telles que des travaux de génie civil ou minier, car la densité d'implantation des stations de mesure doit être très élevée pour assurer la meilleure continuité du phénomène mesuré, ce qui est obtenu avec une équidistance de quelques mètres à une vingtaine de mètres.

SITUATION GEOGRAPHIQUE

La zone de test est située au centre-ville de Lausanne dans le quartier de la place Saint Laurent. Cette zone est caractérisée par différents types de bâtiments, s anciens et modernes. Le fond rocheux se situe à une profondeur variable de quelques mètres à une trentaine de mètres. Dans cette zone, une dizaine de forages récents recoupent les terrains meubles jusqu'au substratum rocheux tertiaire. Cette zone rassemble bien toutes les difficultés du milieu urbain et se révèle par conséquent très intéressante pour élaborer une méthodologie globale de la microgravimétrie urbaine.

Toutefois, lors de notre étape préliminaire, nous avons dû faire des choix de simplification en fonction :

- des données déjà à disposition et de leur format (données cadastrales)
- des mesures à réaliser et leur accessibilité (pesanteur et topographie)
- de la précision requise et envisageable (emploi de deux types de micro gravimètres).

Dans une deuxième étape toutes les données seront complétées afin d'obtenir un ensemble homogène répondant au mieux à la précision de nos mesures de microgravimétrie.

L'ACQUISITION MICRO GRAVIMETRIQUE



Figure 3

Lors des deux campagnes de mesure nous avons implanté plus de 200 stations de mesure (fig. 2) avec un théodolite de précision LEICA et mesuré gravimétriquement avec deux gravimètres ; un Lacoste& Romberg D89 (ETHZ) en été 2002 et un Scintrex CG-5 (IG-UNIL) (fig. 3) en été 2003. Le microgravimètre Scintrex CG-5 est le dernier né des gravimètres digitaux et offre une répétitivité exemplaire. Les acquisitions se sont déroulées la nuit afin de limiter les perturbations dues à la circulation. Lors de la campagne 2003, chaque mesure est le résultat d'au minimum 3 lectures et 42 stations ont été remesurées au moins 3 fois avec le Scintrex CG-5, la dispersion de l'écart type est inférieure à 3 μ Gal (fig. 4).

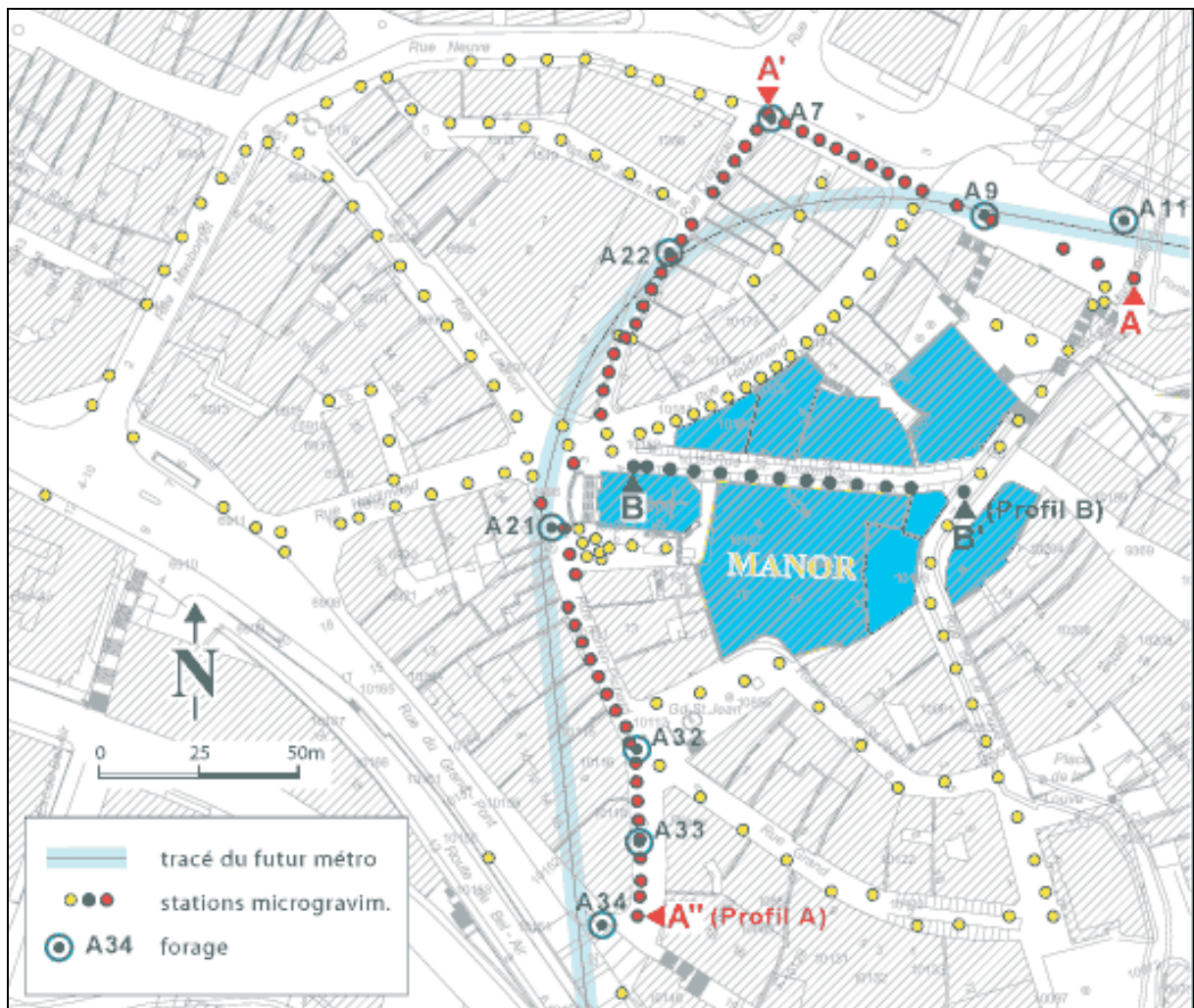


Figure 2

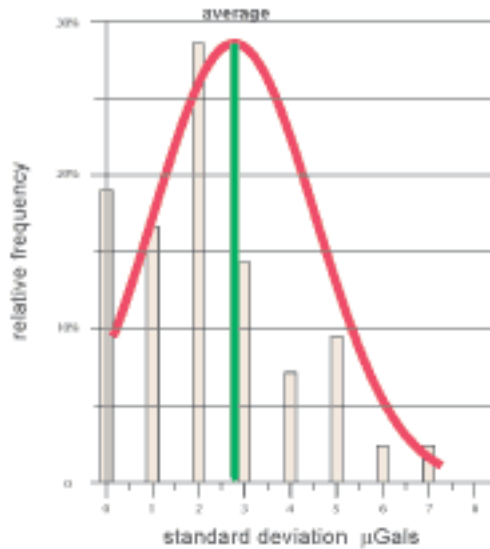


Figure 4

PRESENTATION DES RESULTATS PRELIMINAIRES

Afin d'arriver à un résultat de modélisation cohérent et proche de la réalité, nous avons d'abord dû résoudre le problème du calcul de l'effet gravifique des bâtiments et en particulier l'effet de sous-sol complexe (§I). Ainsi avons-nous choisi le profil B-B' implanté le long de la rue Saint-Laurent (fig. 2) à proximité du centre commercial "Manor" (fig.5).

Puis nous avons réalisé la modélisation du sous-sol géologique en calant nos mesures sur les forages mécaniques (§II).

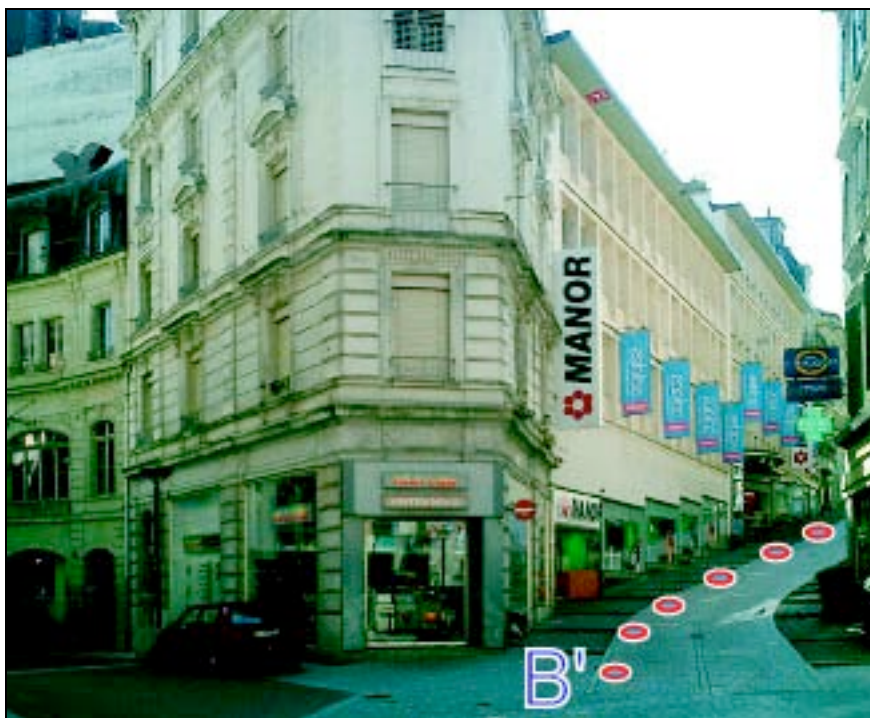


Figure 5

I) Modélisation et calcul de l'effet gravifique d'un bâtiment et des sous-sols. Amélioration du modèle numérique d'altitude

L'application de ces corrections sur l'Anomalie de Bouguer a été réalisée de la façon suivante : Le profil B-B' (fig. 2) a été choisi à proximité d'un grand centre commercial "Manor" dont les plans étaient disponibles afin d'évaluer l'effet des sous-sols et des bâtiments en centre ville.

A l'aide de prismes verticaux, nous avons construit un modèle de bâtiment avec murs, dalles et caves avec des densités de matériaux propres aux types de construction. Afin d'intégrer les caves des bâtiments aux calculs, nous avons choisi de les insérer directement au maillage du MNT (modèle numérique de terrain). Ce dernier est fondé sur la digitalisation du MNT à 25 mètres, de données cadastrales et de nos propres mesures altimétriques de nos stations de mesures gravimétriques en les insérant dans la planimétrie des rues. Finalement la surface du sol ainsi établie a été modifiée par la présence du niveau inférieur des caves des bâtiments. Une maille finale du MNT a été calculée avec une dimension de 50 cm de côté. Les 9 sous-sols proches du profil B-B' ont été intégrés dans le MNT pour tenir compte de la complexité morphologique (fig. 6). Nous avons calculé l'influence gravifique de l'immeuble en 3 D en utilisant notre logiciel BUILDING, imaginé et créé dans le cadre de ce projet. La figure 7 montre l'interface utilisateur du logiciel et la simulation gravifique du bâtiment figuré par le cadre blanc, constitué de dalles et de parois. Les zones de couleur représentent les valeurs de correction gravifique dues au bâtiment. Le logiciel est basé sur la composition des effets des prismes verticaux (Háaz, 1953; Nagy, 1966) élémentaires fournis par l'utilisateur. Nous remarquons que l'effet des bâtiments et sous-sol est de l'ordre de 30-150 μ Gal.

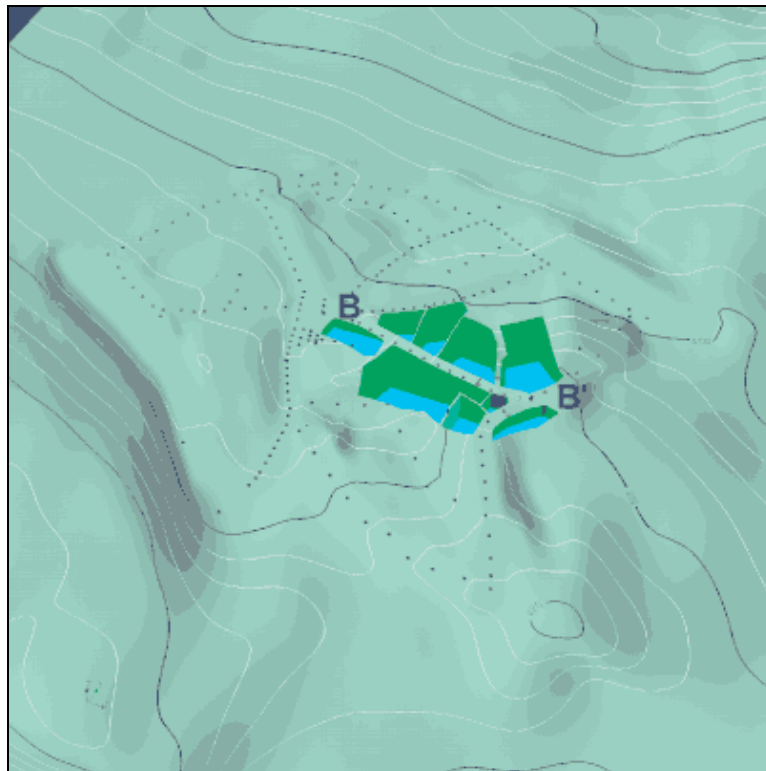


Figure 6

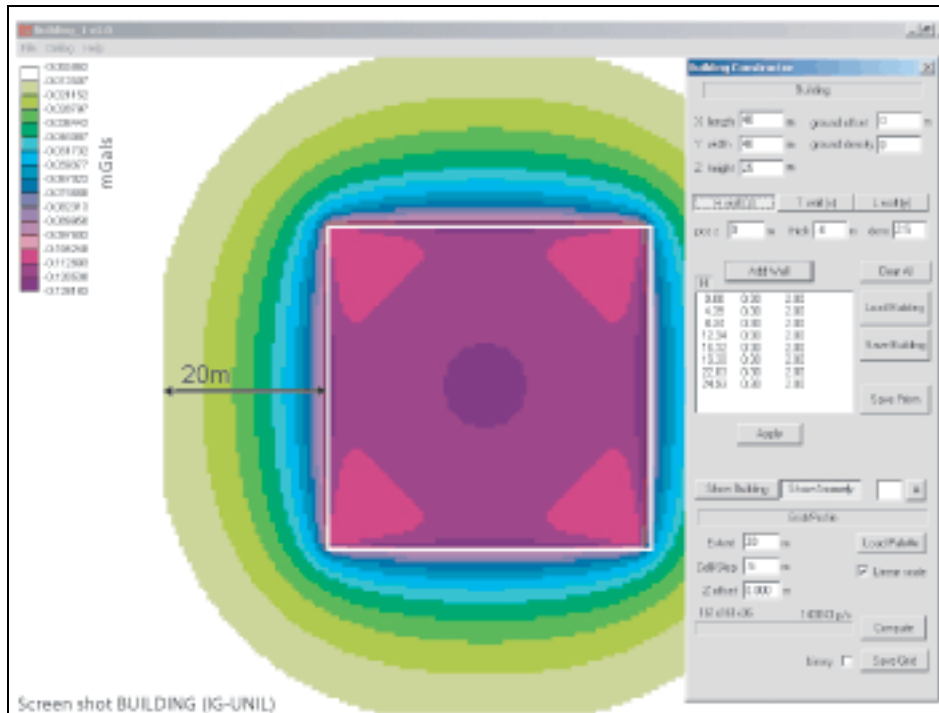


Figure 7

II) Modèle géologique obtenu à l'aide de la microgravimétrie et comparaison avec les forages.

Le profil microgravimétrique A-A'-A'' suit approximativement le trajet du futur tunnel du M2 (fig. 2) dont on connaît la coupe géologique (fig. 8) réalisée à l'aide des forages A34, A33, A32, A21, A22, A7, A9 et A11. L'Anomalie de Bouguer (fig. 10) a été calculée avec une densité de réduction de 2.40 g/cm^3 , c'est-à-dire une valeur moyenne des molasses du Plateau suisse et les corrections topographiques (Hammer, 1939 ; Olivier 1974 ; Logean & Olivier, 1995) jusqu'à 167 km à partir du MNT décrit plus haut.

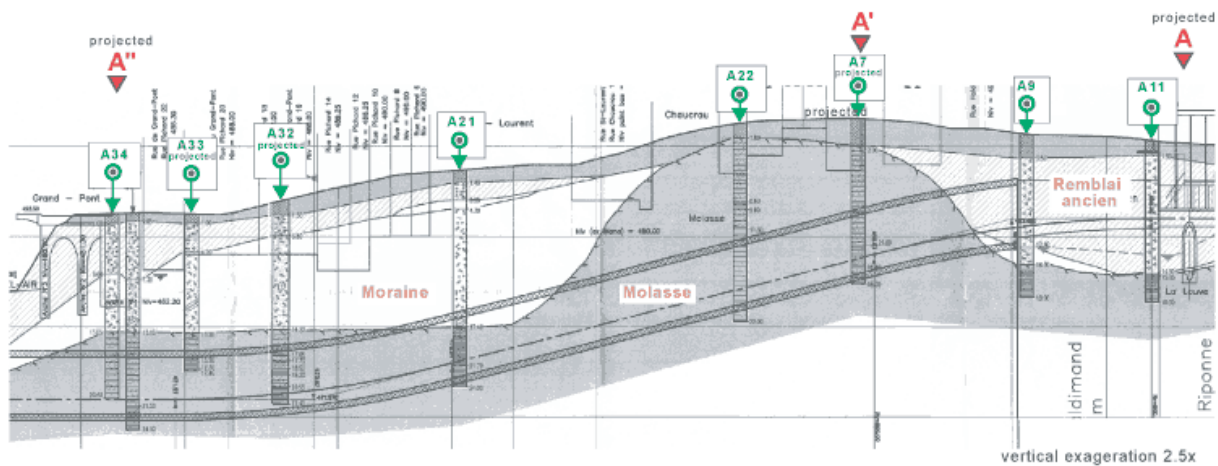
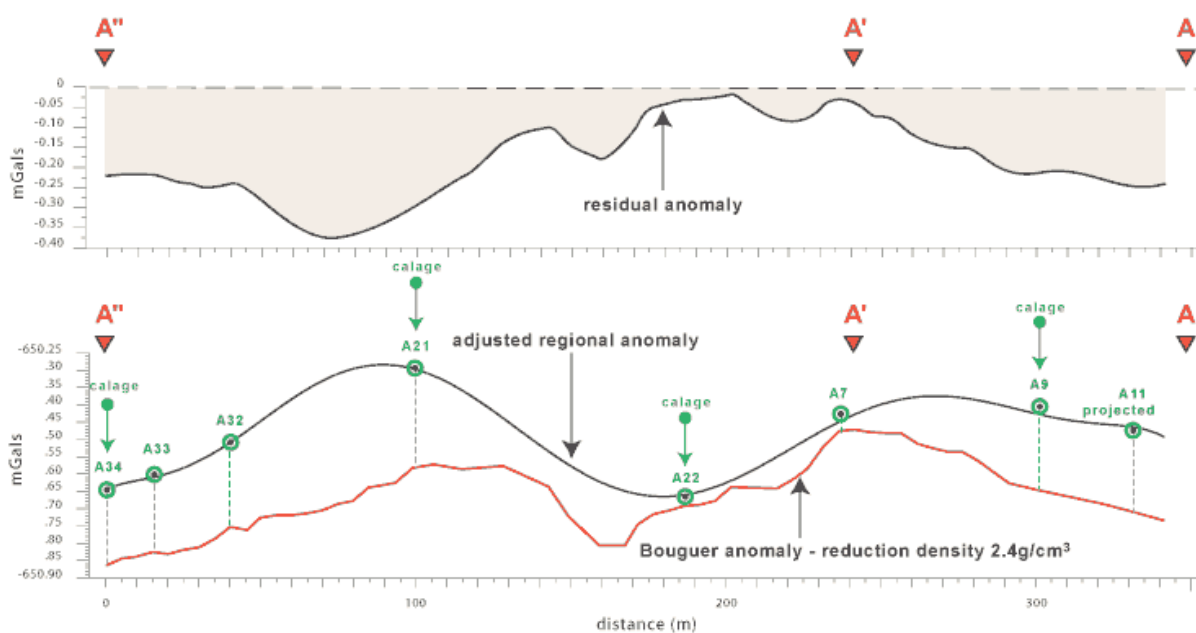


Figure 8

A ce stade préliminaire de nos travaux nous n'avons pas encore tenu compte des bâtiments ni des sous-sols. Nous avons calculé une anomalie régionale locale avec un calage 2D sur des forages A34, A21, A22 et A9 (fig. 10). Nous avons finalement obtenu l'anomalie résiduelle de la figure 9. Puis, avec le logiciel GM-SYS (Geosoft) nous avons modélisé la coupe géologique (fig. 12) et comparé la réponse du modèle avec l'anomalie résiduelle (fig. 11). Nous remarquons que les écarts les plus importants sont liés principalement aux effets des sous-sols des bâtiments et en partie aux effets 3D. En effet, ces écarts sont du même ordre de grandeur que les corrections du profil B-B' dus aux bâtiments et sous-sols (fig. 11), de l'ordre de 100 \square Gal.



Figures 9 et 10

Ces résultats sont très encourageants et en introduisant toutes les corrections des bâtiments avec une interprétation 3D couvrant toute la zone, nous estimons possible d'éliminer toutes les variations gravifiques qui ne sont pas dues au fond rocheux molassique.

DEVELOPPEMENTS EN COURS

Nous avons commencé à géoréférencer les géométries des bâtiments et des sous-sols de toute la zone dans le Système d'Information Géographique (SIG) ArcGis™ (ESRI). Cette procédure permet de regrouper les bâtiments par typologies simplifiées; il a été défini trois types de constructions: vieilles maisons et églises en pierre, bâtiments en briques et constructions récentes en béton armé. Le logiciel GOCAD™ (Mira Geosciences) a été choisi pour la modélisation 3D géométrique et gravimétrique. Le développement actuel s'oriente vers une utilisation en parallèle de ces deux logiciels en automatisant les différentes étapes. Nous utiliserons également le SIG ArcGis pour implémenter tous nos résultats et assurer la communication avec les bureaux d'ingénieurs.

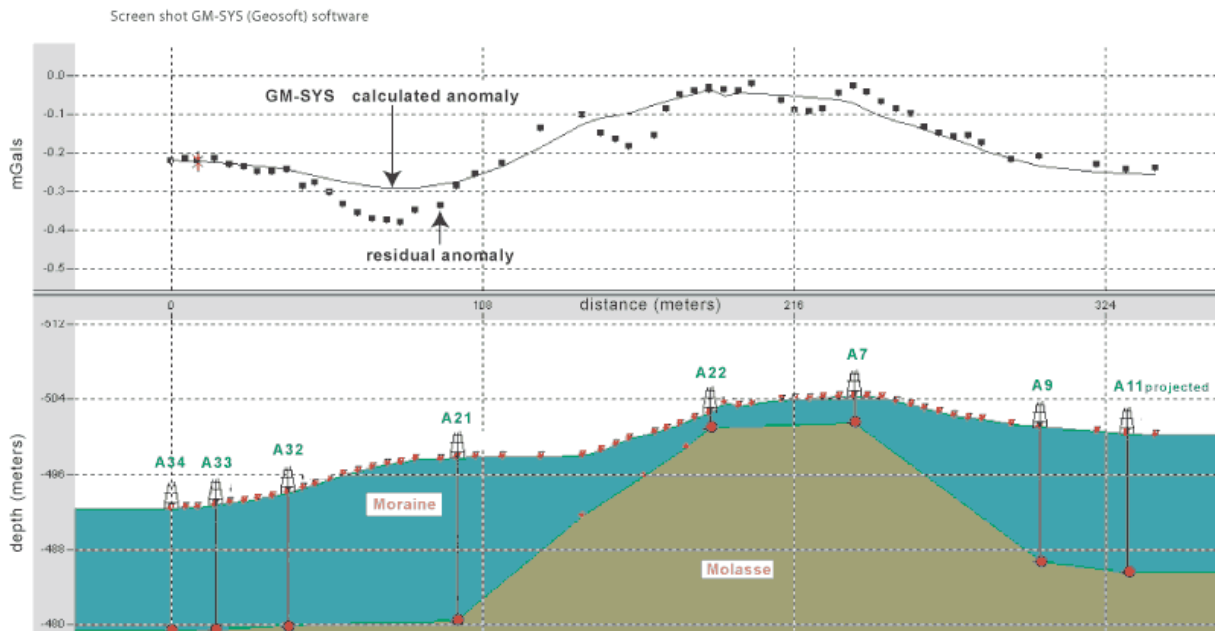


Figure 11 et 12

CONCLUSION

Ces travaux préliminaires nous ont donné les informations nécessaires pour évaluer par l'observation et par calcul l'influence des infrastructures sur les mesures microgravimétriques et nous a confirmé que seule une correction globale des caves, des bâtiments, de l'infrastructures des réseaux de distribution et de la topographie sur une distance adéquate permettra d'isoler une anomalie résiduelle gravifique cohérente liée essentiellement à la géologie et par là de modéliser finement le toit de la Molasse.

REMERCIEMENTS

Nous remercions chaleureusement notre collègue, le professeur Emile Klingele de l'ETHZ, pour nous avoir mis à disposition leur microgravimètre Lacoste&Romberg, très régulièrement durant ces 3 dernières années, Messieurs Roger Weidmann et Cyril Durussel et Madame Michaela Dumitrescu de la division de routes nationales du Département des infrastructures de l'Etat de Vaud pour nous avoir communiqué toutes les informations cadastrales et de génie civil du M2. Nos remerciements vont aussi à Monsieur Mathieu Beck, géologue, pour son aide méticuleuse lors de l'acquisition de la micro gravimétrie en 2002 et 2003.

REFERENCES

- Arzi, A.A., 1975. Microgravity for engineering applications. *Geophysical Prospecting*, 23, 408-25.
- Debeglia, N. et Dupont, F., 2002. Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 50, 435-454.
- Hááz, I.B., 1953. Relations between the potential of the attraction of the mass contained in a finite rectangular prism and its first and second derivatives (in Hungarian), *Geofizikai Közlemenyek*, II, n° 7.
- Hammer, S., 1939, Terrain corrections for gravimeter stations, *Geophysics*, 4, 184-194.
- Logean, Ph. & Olivier. R., 1995. Programme VENUS II, calcul de la correction topographique de 0 à 167 km, IG-UNIL, communication interne.
- Nagy, D., 1966. The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics*, 31, 362-371.
- Nozaki, K. et Kanemori, T., 1996. Microgravity survey for shallow subsurface investigations, *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and environmental Problems*, Keystone, Colorado, USA.
- Olivier, R., 1974. Elaboration d'un système de traitement gravimétrique géré par ordinateur. Etude gravimétrique du Plateau romand de Versoix à Concise, *Matér. Géol. Suisse, Série géophysique*, n° 17, pages 56.
- Qianshen, W., Chijun, Z., Fuzhen, J., Wenhui, Z. et al., 1996. *Microgravimetry*. Science Press, Beijing, China.
- Radogna, P.V., Olivier, R. et Logean, P., 2002. An underground railway project in Lausanne, Switzerland, as an urban micro-gravity test site, *Proceedings of the 8th meeting EEGS-ES*, Aveiro, Portugal, Septembre 2002
- Radogna, P.V., Olivier, R. et Logean, P., 2003. Micro-gravity survey in urban environment: modelling, evaluation and correction of building influence, *Proceedings of the 9th meeting EEGS-ES*, Prague, Czech Republic, August 31 – September 4, 2003.
- Radogna, P.V., Olivier, R. et Logean, P., 2003. Evaluation des effets des constructions en microgravimétrie urbaine, *Actes du 4^{ème} Colloque Géophysique des Sols et des Formations Superficielles*, Paris, France, 23-24 septembre 2003.
- Walther, R., 1993. *Construire en béton - Synthèse pour architectes*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- Yule, D.E., Sharp, M.K. et Butler, K.D., 1998. Microgravity investigations of foundation condition, *Geophysics*, 63, 95-103.