

Comportement du viaduc élevé de la ligne 12 du métro de la Ville de Mexico, autour de la Sierra de Santa Catarina

Elevated Viaduct behavior of Metro Line 12 Mexico City in the nearness of the Santa Catarina

Rodríguez G. L.B.
Directeur de l'Enterprise IPISA de C.V.
Soria C.B.
Chef de Géotechnique, IPISA de C.V.

RÉSUMÉ: Cet article présente l'évolution des mouvements observés pour la fondation du viaduc élevé de la ligne 12 du métro dans les premiers 20 mois après sa construction. La partie observée se trouve dans la zone sud de la Ville de Mexico. Cette zone est formée par la présence de collines souterraines de roches et de sol dur au voisinage des vallées d'argile volcanique lacustre, exposé aux effondrements régionaux, typiques de la zone du lac de la Ville de Mexico. L'article décrit aussi les solutions alternatives utilisées pour les fondations du viaduc et les solutions considérées pour limiter les différences de tassement entre la fondation appuyée sur sol dur et la fondation appuyée sur argile afin d'obtenir un comportement compatible pour l'exploitation de la Ligne.

ABSTRACT: This paper presents the evolution of the movements that have been the foundations of Elevated Viaduct of Metro Line 12 in the first 20 months of construction. The observed section is located in the south-east of Mexico City, formed by the presence of underground rock outcrops and hard floors in the nearness of which are volcanic lake valleys of very soft clay, subject to regional subsidence, typical lake areas of the City. It also describes the foundations used in this viaduct and considered solutions to mitigate subsidence differences between foundations supported on hard and soft clays supported to ensure appropriate behavior during operation of Line.

MOTS-CLÉS: viaduc, fondation, tassement, solution

KEYWORDS: viaduct, foundations, settlements, solution

1 DESCRIPTION DU PROJET ET DE SA COMPLEXITÉ GÉOTECHNIQUE

La Ligne 12 du métro de la Ville de Mexico traverse la partie sud de la Ville d'est en ouest, sur une longueur approximative de 24 km et possède 20 stations, une zone d'ateliers et un dépôt. La choix de conception de la Ligne 12 décrite d'est en ouest correspond à une structure de surface pour les deux premières stations, un viaduc élevé sur le tronçon suivant sur une longueur d'environ 8,5 km, tranchée à ciel ouvert de 2,5 km de longueur, tunnel construit avec l'insigne EPB de 8,5 km de long, pour terminer sur un tronçon d'une longueur de 2,0 km correspondant à un tunnel construit selon des méthodes conventionnelles. La Ligne a été mise en service le 30 octobre 2012.

Du point de vue géotechnique, la Ligne 12 passe par une zone de sols durs à l'Ouest qui correspondent aux reliefs montagneux qui entourent la Ville de Mexico, une zone de transition entre les sols dur et les sols lacustres, une zone d'argiles tendres lacustres typiques de la Ville de Mexico ; dans la région du sud-est nous avons une zone complexe formée d'affleurements rocheux et collines rocheuses souterraines proches de la surface avec à leurs côtés des vallées lacustres formées d'argiles volcaniques tendres sujettes à des tassements localisés typiques de la Ville de Mexico. Figure N° 1.

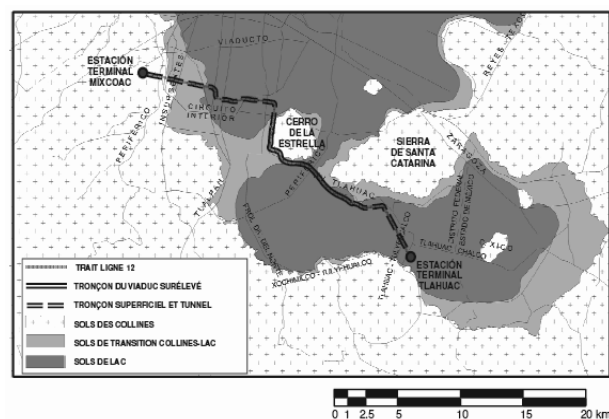


Figure 1. Localisation de la Ligne 12 sur les sols de la Ville de Mexico

Cette dernière zone correspond aux contreforts de la Sierra de Santa Catarina et sa complexité repose sur le fait que la Ligne de métro repose sur des zones dures et sur des zones lacustres d'argiles tendres sujettes à des tassements localisés, proches des premières. Dans ces conditions, la Ligne 12 aura des zones avec beaucoup de tassements dans les vallées lacustres avoisinant des zones fixes, ce qui pose la problématique d'absorber ces grandes différences de subsidence sur de courtes distances tout en garantissant un comportement adéquat des structures devant ces tassements à court et à long terme. Il est important de mentionner que toute alternative pour

accueillir la Ligne dans les environs de la Sierra de Santa Catarina, que ce soit en surface, avec un viaduc élevé, ou encore un tunnel ou une tranchée, sera sujette aux fortes subsidences différentielles et devront donc être prises en compte pour un comportement adéquat.

Pour le tronçon du viaduc élevé, la conception de la Ligne 12 a choisi l'utilisation de structures construites à l'aide de colonnes et de têtes en béton renforcé, avec des séparations variant entre 25 et 30 m, sur lesquelles s'appuient des poutres préfabriquées en béton et des poutres métalliques ne faisant que reposer sur la structure. La hauteur de ces structures laissent un espace libre de 5,50 m sauf dans la zone spéciale de croisement avec un pont routier au nord de la station Periférico où la hauteur du viaduc élevé atteint 15,00 m. Les fondations de chacun des supports ont été définies en accord avec les caractéristiques du type de sol dans lequel ils sont situés, comme décrit ultérieurement.

Du point de vue géotechnique, les formations rocheuses de la Sierra de Santa Catarina sont formées de roches volcaniques basaltiques, très crevassées et mélangées à de la mousse

volcanique "tezontle" dans sa partie la plus proche de la surface, améliorant ainsi les indices de qualité du massif rocheux par rapport aux zones plus profondes. Lorsque le bassin de la vallée a cessé son drainage à cause de la formation des chaînes de montagnes du Sud (ère cénozoïque, référence 1), se sont formés les lacs où se sont déposées les cendres volcaniques, transportées par le vent, qui ont donné origine aux argiles lacustres de la Ville de Mexico.

Au milieu du siècle dernier, il y a eu une forte exploitation des nappes phréatiques profondes pour fournir la Ville en eau, ce qui dans une moindre mesure continue aujourd'hui et qui favorise les affaissements localisés de ces zones lacustres.

Dans les zones des contreforts de la Sierra de Santa Catalina, les vallées lacustres sont constituées d'argiles tendres d'épaisseurs variant entre 20 et 60 m, avec des teneurs en eau variant entre 150 à 450 % et des résistances allant de 2,50 tonnes/m² à 5,00 tonnes/m² de cohésion pour des essais non consolidés et non drainés. Figure 2. Les niveaux d'eau souterraine dans ces sols argileux sont situés entre 3,0 m et 4,0 m profondeurs.

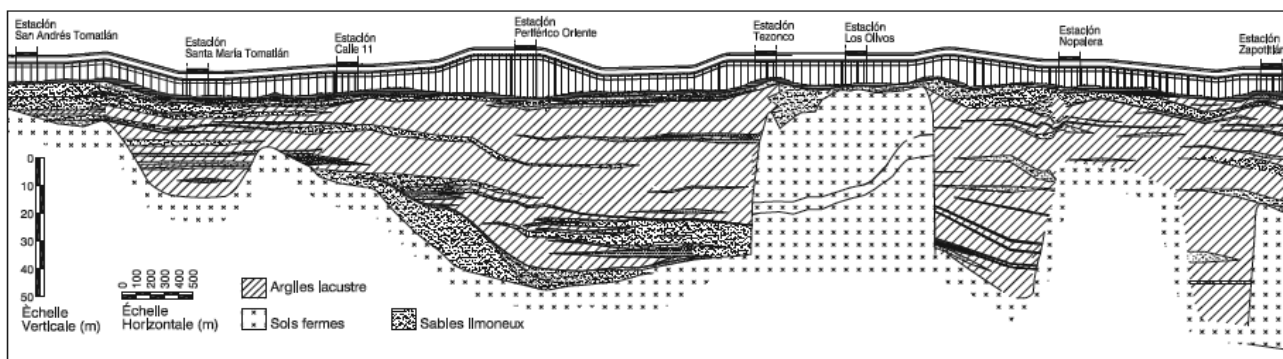


Figure 2. Sols d'assise des fondations du Viaduc Élevé de la Ligne 12.

2 AFFAISSEMENTS LOCALISÉS

Les 8,5 km du viaduc élevé sont situés entre les stations Pueblo Culhuacán et Estación Zapotitlán et le long de cette zone se trouvent trois vallées lacustres limitées de la manière suivante: la première vallée s'étend de la station Zapotitlán à la station Los Olivos, la deuxième vallée de la station San Lorenzo Tezonco jusqu'à la station Calle 11 et la troisième de cette dernière jusqu'à la station San Andrés Tomatlán. Figure 2.

Les vitesses d'affaissement local dans ces vallées ont été obtenues grâce aux nivellements effectués par l'Autorité du Système des Eaux de la Ville de Mexico entre 1970 et 1992 et interprétées par l'Institut d'ingénierie de l'Université Nationale Autonome de Mexico, UNAM (Référence 3). Il est important de préciser que les vitesses d'affaissement local ne peuvent pas être extrapolées de façon linéaire, étant donné que les modèles d'extraction de l'eau de la Ville sont très variables.

Compte tenu de ce qui précède, dans la première vallée les vitesses d'affaissement local enregistrées atteignent des valeurs de 4,0 cm/an, dans la deuxième vallée 6,0 cm/an et dans la troisième vallée 3,00cm/an. Ces vitesses signifient un affaissement total futur de 2,0 m, 3,0 m et 1,50 m pour chacune des vallées respectivement, lesquels correspondent à une période de 50 ans, durée minimum devant être considérée dans la conception. A ces valeurs doivent être ajoutés les affaissements causés par la surcharge des structures du viaduc élevé.

3 MESURES PRISES EN COMPTE POUR LA CONCEPTION

Afin d'obtenir une conception qui garantisse un comportement approprié à long terme pour le Viaduc Élevé et compatible avec son environnement, certains concepts, tels que les suivants, ont été pris en considération.

Nous avons pris en compte le fait que les inclinaisons des voies pourraient souffrir quelques changements qui, sans avoir encore été déterminés, ne dépasseraient pas les 10% pour une période de 50 ans pour ne pas modifier la conception de la Ligne.

Nous avons pris en compte le fait que les déformations des supports de la Ligne devaient être compatibles avec celles de leur environnement pour éviter des problèmes futures. Par exemple, en cas d'emploi de fondations fixes comme des piliers ou des pilots reposant sur les strates dures, par effet de l'affaissement local dans les vallées lacustres argileuses, nous assisterions à une "émersion" des fondations par rapport au sol voisin, ce qui affecterait l'inclinaison des voieries parallèles, ainsi que le comportement des équipements municipaux, particulièrement la présence d'un tuyau d'eau potable de 1,80 m de diamètre qui suit le tracé du métro et qui se trouve à 10,00 m de l'axe de la Ligne et à 4,0 m de profondeur, ce qui pourrait causer des dégâts considérables.

La Réglementation des Constructions du District Fédéral de la Ville de Mexico ne prévoit que la conception de bâtiments et indique que les tassements, entre deux supports consécutifs pour des structures en béton est: $\delta = 0,006 \cdot l$ où 'l' est l'espace entre les supports, en conséquence de quoi les assises admissibles

pour des espaces de 30 m, ce qui est le cas typique de la Ligne 12, seront de 18 cm.

La même réglementation limite les déformations totales par consolidation des fondations isolées à une valeur de 30 cm pour les sols lacustres.

En ce qui concerne les spécifications AASHTO, celles-ci indiquent que pour des solutions structurelles de ponts juste posés, la subsidence différentielle « δ » entre deux supports consécutifs ne doit pas excéder: $\delta = 0,008 * l$ qui correspond aux valeurs de 24 cm.

Pour nous conformer aux limitations décrites ci-dessus, les mesures décrites ci-dessous ont été prises.

- Dans le projet des voies, nous avons envisagé des contreventes pour les transitions critiques entre les zones fixes et les zones mobiles qui permettraient avec le temps d'atteindre les valeurs de conception et qui plus est de supporter les tolérances décrites antérieurement.
- Espace suffisant pour la mise en place de cales entre la tête et la poutre de la structure située sur les transitions critiques entre les zones fixes et les zones mobiles afin de pouvoir corriger une partie de la déformation à long terme.
- L'installation de pilots d'inclusion, au niveau des fondations et de leur environnement dans le but d'échelonner les déformations produites par les tassements local au niveau des transitions critiques entre les zones fixes et les zones mobiles. Ces inclusions ont été installées entre une certaine profondeur et les strates dures de façon à agir de façon "entrelacée" avec le système de fondations et à réduire progressivement les déformations causées par les tassements local. Figure 3. Cette solution de pilots entrelacés a donné de bons résultats dans la réduction des tassements des fondations dans les sols de la Ville de Mexico.
- L'utilisation de poutres simplement posées entre deux supports consécutifs.
- L'utilisation de fondations "flottantes" ou compensées se déplaçant en fonction de l'affaissement local.
- L'emploi éventuel d'épaisseurs de ballast supérieures aux normes.

4 CHOIX DE CONCEPTION DES FONDATIONS EMPLOYÉES

Les Fondations utilisées pour les sections du viaduc élevé de la Ligne 12 (Figure 3) ont été des différents types suivants :

Zone	Type de fondation
Zone rocheuse	Semelles isolées reposant sur la roche.
Zones de vallée lacustre	Semelles isolées avec pilier en béton incorporé dans la roche saine. Caissons compensés de fondation avec pilot de friction Cellules structurées travaillant par friction.
Zones de transition	Cellules structurées travaillant par friction et caissons compensés de fondation avec pilot de friction, dans les deux cas avec pilots d'inclusion situés longitudinalement et transversalement au tracé de la Ligne, interagissant avec les fondations.

5 ANALYSES DE TASSEMENTS FUTURS

La détermination des tassements à long terme, concernant les fondations situées dans les vallées lacustres, tant en ce qui concerne les caissons compensés que les cellules structurées, est basée sur les théories classiques pour définir les tassements des fondations avec pilots dans les sols tendres. Dans le cas des

fondations situées dans les régions critiques de transition, nous avons eu recours en plus à des programmes d'éléments finis qui ont pris en considération les caractéristiques de rigidité et de déformabilité des sols, les fondations et les inclusions, ainsi que certains artifices pour représenter le phénomène des tassements local. Avec cette méthode, la quantité, la distribution et les caractéristiques des pilots d'inclusion ont été précisés.

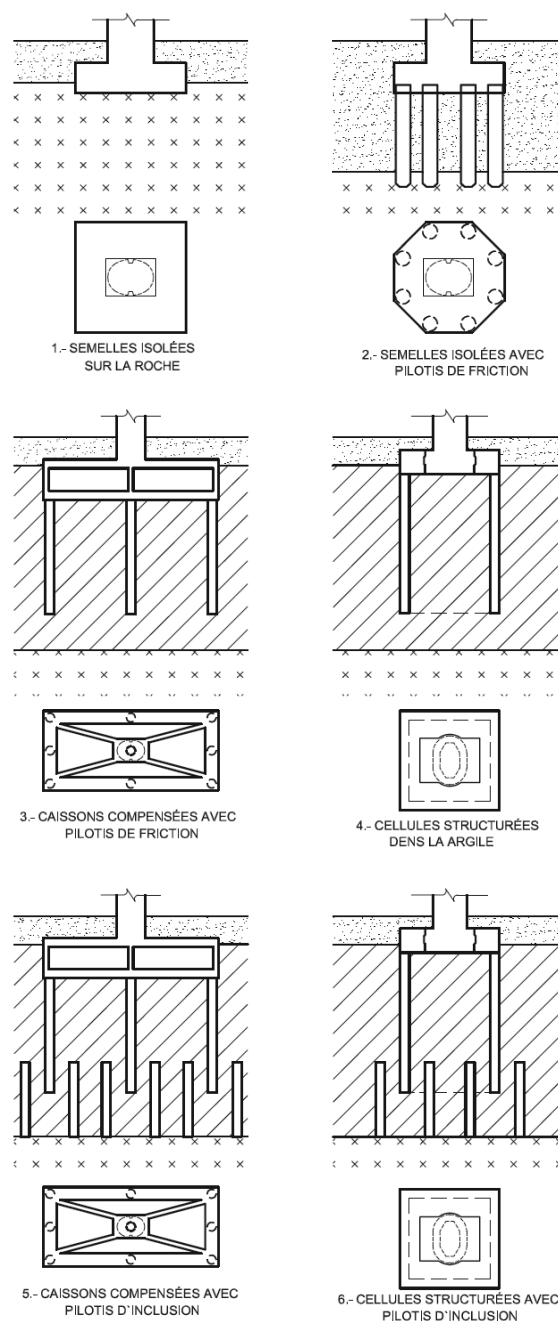


Figure 3. Différent types de fondations utilisées en tronçons de argile lacustre et de transition de Viaduc Élevé de Ligne 12.

6 CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES DE CHAQUE SECTION ET ENREGISTREMENT DES TASSEMENTS

Nous présentons ici l'évolution et l'interprétation des mouvements des supports du viaduc élevé de la Ligne 12 du Métro, correspondant aux tronçons compris entre les stations

Zapotitlán - Nopalera, Nopalera – Los Olivos, San Lorenzo - Periférico Oriente et Calle 11 - Santa Maria Tomatlán. Les périodes de nivellement vont de janvier 2010 jusqu'aux premiers mois de 2012.

Les déformations enregistrées entre les supports constitués pour différentes solutions sont résumées dans le tableau suivant. Deux fondations tassements type représenté sur la figure 4.

Vue d'ensemble des assises sur les supports et des assises différentielles du Viaduc Élevé de la Ligne 12 par type de fondation

Type de support	Tronçon	Assise Minimum (mm)	Assise Maximum (mm)	Assise différentielle maximum entre supports contigus (mm)
Caisson partiellement compensé	Zapotitlán – Nopalera	2	10	6
Caisson partiellement compensé	Nopalera – Los Olivos	2	10	6
Caisson partiellement compensé	Calle 11 – Lomas Estrella	3	6	3
Cellule structuré	Zapotitlán – Nopalera	10	70	28
Cellule structuré	Calle 11 – Lomas Estrella	16	25	9
Piliers ou Semelles reposant sur roche saine	Nopalera – Los Olivos	2	8	4
Piliers ou Semelles reposant sur roche saine	Calle 11 – Lomas Estrella	4	4	0

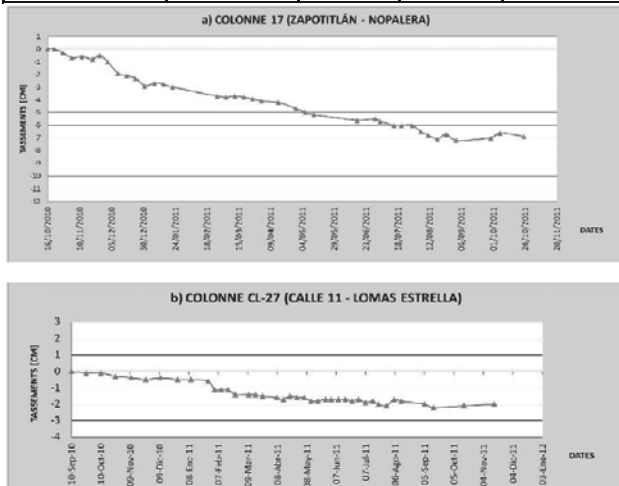


Figure 4. Évolution des tassements en fondations des zones d'argiles (a) et en zones de transition avec inclusions (b).

Le comportement des supports dans les zones de transition critique et les supports contigus avec des fondations différentes sont donnés ci-dessous :

- Sur le tronçon Zapotitlán - Nopalera au niveau du passage de cellule structuré à caisson compensé, nous avons observé des assises 10 mm et 5 mm respectivement.
- Sur le tronçon Nopalera – Los Olivos au niveau de la zone de transition critique entre caisson compensé et pilier sur roche, nous trouvons des assises de 3 mm et 5 mm respectivement.
- Sur le tronçon de transition critique San Lorenzo-Periférico, entre caissons compensés et piliers sur roche, les assises enregistrées varient entre 6 et 8 mm
- Sur le tronçon Calle 11 – Lomas Estrella nous trouvons trois solutions de fondation. Les assises entre caisson compensé et

cellule structuré sont de 6 mm et 23 mm respectivement et les assises entre cellule structuré et pilier sur roche sont respectivement de 20 mm et 4 mm.

7 CONCLUSIONS

Dans tous les cas, les graphiques d'assise correspondant aux supports déviés sur argile montrent une tendance de stabilisation avec des vitesses d'affaissement très petites sur les derniers mois; et l'ampleur des déformations pour chaque support ainsi que les déformations différentielles entre les supports contigus, restent dans l'échelle des normes spécifiées dans les règlements susmentionnés.

Avec la construction du viaduc élevé déjà conclue, on remarque que pendant les premiers mois, les affaissements enregistrés sont petits et ne mettent pas en danger le fonctionnement de la Ligne ni les installations voisines, mais il est nécessaire de contrôler l'affaissement de la Ligne avec une période d'observation plus longue pour contrôler et garantir son comportement futur.

8 REFERENCES

- Raúl J. Marsal y Marcos Mazari. (1955). "El Subsuelo de la Ciudad de México" Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Instituto de Ingeniería, UNAM. (2009). *Informe final Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro*. D.F. Non publié.
- Gobierno del Distrito Federal (2004). "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones", Gaceta del Distrito Federal, México.
- AASHTO, (2012). "Standard Specifications for Highway Bridges", 17th Edition - 2012.
- Consortio ICA – ALSTOM – CARSO. (2010). *Campaña de instrumentación geotécnica de la Línea 12 del Metro*. D.F. Non publié.
- EIBS GmbH, 2010, Planfeststellungsunterlage zum Ersatz der Bundesstraße B 176 zwischen Pödelwitz und Neukieritzsch, Bauabschnitt I (unpublished)
- Ahner, C., Kirstein, J., Uhlemann, S., Röder, K., Uhlig, P.: Baugrundverbesserungsverfahren zur Gründung der Bundesstraße B 176 auf einer jungen Hochkippe im Braunkohlenrevier der MIBRAG. Baugrundtagung 2012
- Ahner, C., Kirstein, J., Uhlemann, S., Uhlig, P.: Ground improvement methods for establishment of the federal road B 176 on a new elevated dumb in the brown coal area of MIBRAG, ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels 2012