

Les tunnels de drainage de Lisbonne: Enjeux et spécificités

The drainage tunnels of Lisbon: Challenges and specificities

C. Jassionnesse*, G. Euzen
Spie Batignolles Génie Civil, Nanterre, France

F. Rocha
Spie Batignolles Portugal, Lisboa, Portugal

*christophe.jassionnesse@spiebatignolles.fr

RÉSUMÉ: Le projet des tunnels de drainage « Monsanto-Santa Apolonia » (TMSA) et « Chelas-Beato » (TCB) vise en priorité à maîtriser les inondations qui se produisent en plusieurs endroits de la ville de Lisbonne. Le marché attribué en Conception-Réalisation au groupement Mota-Engil – Spie Batignolles International (constructeurs), Spie Batignolles Génie Civil – LCW – Aqualogus (concepteurs) comprend la construction des deux tunnels - le TMSA de 4,4 km de longueur, et le TCB de 1,1 km. Il comprend également la réalisation des travaux de dérivation des ruisseaux canalisés en amont des tunnels, de trois chambres d'interception du réseau existant avec les puits de chute associés et les ouvrages de décharge dans le Tage. Le TMSA recoupera deux grands ensembles géologiques, de longueur équivalente. En partie nord-ouest, le tunnel recoupera des calcaires crétacés et les tufs et basaltes du complexe volcanique de Lisbonne. En partie Sud-Est le tunnel recoupera des terrains sablo-argileux compacts à indurés, de la série du Miocène de Lisbonne, Le TCB recoupe uniquement les couches supérieures du Miocène. Les ouvrages de décharge seront réalisés dans des remblais de remodelage des rives du Tage. Le contexte urbain du TMSA est très dense sur les deux tiers sud-est du tracé, avec le croisement de trois lignes de métro sous une faible couverture et le passage sous des quartiers anciens d'une grande valeur architecturale. Le contexte urbain du TCB est moins dense mais comprend le passage sous deux voies ferrées importantes.

ABSTRACT: The «Monsanto-Santa Apolonia» (TMSA) and «Chelas-Beato» (TCB) Drainage Tunnels Project is aimed primarily at controlling flooding in several areas of the city of Lisbon. The design & build contract attributed to the joint-venture Mota-Engil – Spie Batignolles International (builder), Spie Batignolles Génie Civil – LCW – Aqualogus (designer) includes the achievement of the two tunnels - TMSA of 4,4 km long and TCB of 1,1 km. It also includes the work of capturing the canalized streams upstream of the tunnels, three interception chambers of the existing network with the associated shafts and works of the outlets in the Tagus. The TMSA will intersect two large geological units of equivalent length. In the northwest part, the tunnel will intersect Cretaceous limestones and tuffs and basalts of the Lisbon volcanic complex. In part South-East the tunnel will intersect sandy-clay soils, compact to indurated, of the series of the Miocene of Lisbon, TCB only intersects the upper layers of the Miocene. The outlets works will be embedded in the embankments of the Tagus shore. The urban context of the TMSA is very dense on the south-eastern two thirds of the route, with the crossing of three metro lines under a weak cover and the passage under old districts of great architectural value. The urban context of TCB is less dense but includes the crossing under two major railways.

Keywords: Urban tunnelling; drainage; Lisbon.

1 INTRODUCTION

Le projet général des tunnels de drainage s'inscrit dans le cadre du plan général de drainage de la ville de Lisbonne pour la période 2016-2030 (Câmara Municipal de Lisboa, 2015). Ce projet vise à la maîtrise des inondations qui se produisent en plusieurs endroits de la ville. Outre la construction de deux tunnels - le tunnel Monsanto - St. Apolónia (TMSA) d'une longueur de 4,4 km, et le tunnel Chelas - Beato (TCB) d'une longueur de 1,1km (Figure 1) le marché comprend notamment la réalisation des ouvrages de

dérivation des rivières d'Alcântara et de Chelas, des chambres d'interception des réseaux d'eau pluviale, (Av. da Liberdade, R. St Marta et Av. Almirante Reis), avec les puits de chute associés, qui envoient les débits déviés dans le TMSA et les ouvrages de rejet à l'estuaire du Tage. En outre, le marché comprend la construction d'un bassin antipollution à l'entrée amont du tunnel TMSA, et d'un réservoir d'eau traitée, ainsi que la mise en œuvre du système de drainage des eaux usées de la zone basse du bassin de St. Apolónia, dans la zone entourant le rejet du TMSA.



Figure 1. Plan général de localisation des tunnels de drainage de la ville de Lisbonne.

Le système formé par les tunnels et les réseaux existants garantit ainsi le transport des débits pour des périodes de précipitations supérieures à 100 ans. Le TMSA a été dimensionné pour une capacité d'écoulement de 170m³/s et le TCB de l'ordre de 147m³/s. Dans le cas de débits dépassant la capacité des tunnels, les débits excédentaires continuent en aval (par "by-pass") et sont transportés par les infrastructures existantes. Les effluents du système de drainage, par temps sec, seront traités par les stations d'épuration existantes. Par temps de pluie, le déchargement vers les tunnels n'aura lieu qu'à partir d'un débit assurant une dilution élevée. Compte tenu de la profondeur d'implantation des tunnels, les débits interceptés dans ces chambres de dérivation sont conduits à des ouvrages de chute en vortex qui assurent une bonne dissipation d'énergie. Il est également prévu que les tunnels permettent le transport d'effluents traités pour des utilisations d'arrosage d'espaces verts et de nettoyage urbain.

2 LES OUVRAGES DE DERIVATION

2.1 Les ouvrages de dérivation amont (TM1, TC1)

Les ouvrages de dérivation du Caneiro de Alcântara (TM1), en amont du TMSA, se situent à Campolide, dans le bassin de la rivière d'Alcântara canalisée et couverte. Aujourd'hui, les eaux du collecteur de l'Alcântara coulent jusqu'au Tage. L'ouvrage de dérivation des collecteurs de la vallée de Chelas (TC1), en amont du TCB, est implanté dans le lit majeur du ruisseau de Chelas, aujourd'hui canalisé et couvert.

Les ouvrages de dérivation amont incluent fonctionnellement les principaux organes suivants:

- Un chenal d'intersection et de déviation des collecteurs existants;

- Un puits de décharge des gros éléments chariés et des fosses de tamisage/dessablage;
- Des bassins de dépollution et une station de pompage vers une station d'épuration (TM1);
- Un chenal latéral (TM1) ou une chambre (TC1) d'amené du débit de crue au tunnel;
- Divers dispositifs d'écrêtage et de contrôle du flux (seuils, vannes-écluses etc.) entre les organes.

Les débits de temps sec et les débits de pluie (jusqu'à 2 fois le débit de pointe) sont détournés en amont des ouvrages de dérivation et amenés vers une station d'épuration.

Il s'agit d'ouvrages majoritairement enterrés, avec quelques émergences (bâtiment de contrôle-commande etc.). Ainsi, les structures du TM1 sont implantées à 20m sous le terrain naturel. Elles sont constituées de piliers, de dalles massives et de murs en béton armé. Sur le TC1, la structure est enterrée à environ 15m de profondeur. Compte tenu des contraintes de site, il a été retenu des solutions de soutènement périphérique par rideaux de pieux en béton armé avec différents niveaux d'ancrages provisoires, qui seront en définitif remplacés par les dalles des niveaux enterrés.

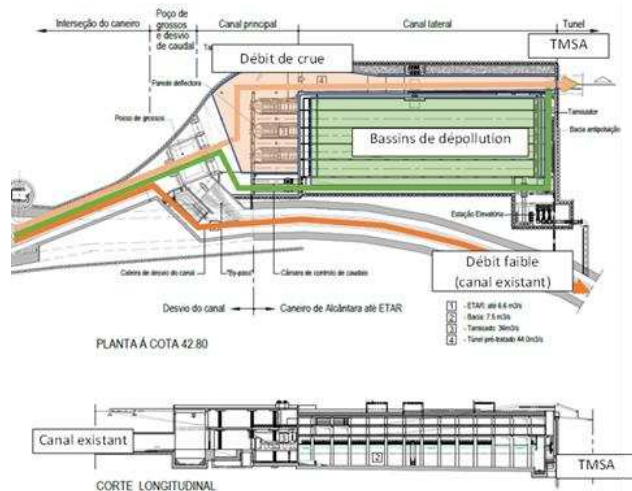


Figure 2. Ouvrage d'interception et de dérivation du collecteur d'Alcantara (TM1).

Les excavations du TM1 constituent la tranchée de départ du tunnelier pour le creusement du TMSA en pente descendante. En revanche, le tunnelier sortira de terre dans la tranchée du TC1, à la fin du creusement du TCB en attaque montante.

2.2 Les ouvrages d'interception des réseaux existants (TM2, TM3, TM4)

Ces ouvrages ne sont présents que le long du TMSA. Les ouvrages TM3 et TM4 sont implantés sur la rue St. Marta et l'Av. Almirante Reis respectivement, au droit des deux principaux thalwegs du centre

historique de Lisbonne qui se rejoignent dans la ville basse (Baixa de Lisboa) et débouchent dans le Tage au niveau de la Place du Commerce (Praça do Comercio). L'ouvrage TM2 est implanté sur l'Av. da Liberdade, sur le flanc ouest du thalweg de St. Marta.

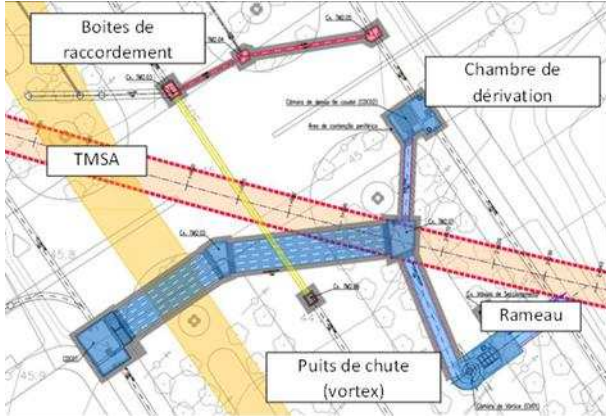


Figure 3. Ouvrage d'interception de l'Av. da Liberdade (TM2).

Les ouvrages de dérivation amont incluent fonctionnellement les principaux organes suivants:

- Des boîtes de raccordement qui interceptent les débits des collecteurs existants;
- Des chambres de dérivation qui dirige le débit de crue vers un puits de chute et les débits courants vers la station d'épuration à travers le réseau existant;
- Un puits de chute en vortex;
- Une chambre de dissipation;
- Un rameau de raccordement au TMSA.

Les puits de chute en vortex sont constitués par une rampe hélicoïdale en pente à 20% environ, à l'intérieur de l'enceinte cylindrique du puits, de 6m (puits TM2, TM3) à 8,6m de diamètre (puits TM4).

L'enceinte des puits TM3 et TM4, de 20m de profondeur environ, est constituée par des pieux en béton armé, complétée par un béton projeté armé et des anneaux de renforcement en béton armé. L'enceinte du puits TM2 est également constituée par des pieux descendus jusqu'au toit du rocher (CVL, voir § 5), et, en dessous, par un soutènement au rocher par boulonnage, béton projeté avec des anneaux de renforcement en béton armé. La base des puits et l'amorce des rameaux en section élargie (hauteur x largeur = 8m x 5m) constitue la chambre de dissipation de l'énergie de chute. Les rameaux ont une longueur de 20m environ sur TM2 et TM3 et de 75m sur TM4. Ils sont excavés en méthode conventionnelle puis revêtus en béton coffré après la réalisation de la jonction au tunnel.

3 LES TUNNELS MONSANTO-SANTA APOLONIA ET CHELAS-BEATO

3.1 Géométrie et structure

Le tunnel Monsanto-Santa Apolónia (TMSA) a une longueur de 4,4km. Il présente une pente de 0,8% sur la majeure partie de son linéaire. La couverture varie de 4m à 85m et la pression hydrostatique maximale des eaux souterraines est de 320 kPa. Il sera excavé dans le sens descendant.

Le tunnel Chelas-Beato (TCB) a une longueur de 1,1km. Il présente une pente constante de 0,5%, permettant de diriger les flux d'eaux de pluie vers l'aval. La couverture varie de 7m à 45m et la pression hydrostatique maximale des eaux souterraines est de 100 kPa. Il sera excavé dans le sens montant.

Le revêtement final est constitué d'anneaux universels composés de 6 voussoirs rhomboïdaux.

Les principaux paramètres géométriques sont listés ci-dessous:

- Diamètre intérieur: 5,50m;
- Diamètre extérieur: 6,10m;
- Epaisseur du revêtement: 0,30m;
- Longueur nominale des anneaux: 1,80m.

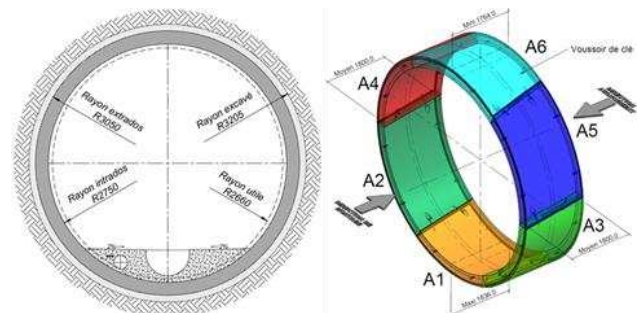


Figure 4. Géométrie du revêtement.

3.2 Contraintes de conception

Le dimensionnement du revêtement intègre des contraintes particulières:

- Le revêtement doit être en mesure de suivre une courbe de rayon 200m (courbe la plus serrée du projet). Les anneaux de voussoirs présentent donc un pincement important;
- La partie avale des tunnels peut être en contact avec l'eau de mer (zone de marée). Cela conduit à des enrobages non courants afin d'éviter la corrosion induite par les chlorures;
- Le revêtement doit pouvoir reprendre une pression hydrostatique interne de 1 bar;
- Les tunnels sont situés en zone sismique.

4 LES OUVRAGES DE RESTITUTION

Les ouvrages de restitution dans l'estuaire du Tage (TM5 pour le TMSA, TC2 pour le TCB) sont constitués par des cadres fermés en béton armé, enterrés, avec un nombre variable de cellules intérieures, et une largeur et une hauteur variables qui augmente avec le nombre de cellules, destinées à réduire les vitesses d'écoulement en sortie.

L'ouvrage TM5 à St. Apolónia, se développe sur une longueur de 180 m et l'ouvrage TC2 sur 320m à Poço do Bispo, avec une pente de l'ordre de 0,5%. Le niveau de restitution au Tage étant inférieur de quelques mètres au niveau moyen de l'estuaire, les ouvrages reçoivent le flux de la marée remontante.

L'ouvrage TM2 s'inscrit dans un site contraint, avec un passage au-dessus du tunnel de la ligne bleue du métro, avec une très faible couverture. L'ouvrage sera alors porté par des pieux descendus sous le tunnel. Le contexte géologique de ces ouvrages est caractérisé par la présence d'alluvions lâches et de remblais, d'épaisseur croissante vers l'aval.

La présence des terrains de faible compacité sous la nappe, nécessite la réalisation de rideaux de soutènements par pieux sécants, sur une grande partie du linéaire de ces ouvrages, avec la mise en place de tirants provisoires.

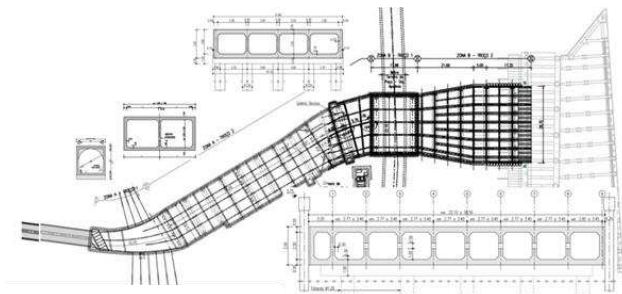


Figure 5. Ouvrage de restitution (TM5) – plan et coupes-types.

Compte tenu de la forte exposition au risque sismique de liquéfaction, ces terrains feront l'objet de traitement d'amélioration en place (colonnes ballastées etc.).

5 GEOLOGIE ET GEOTECHNIQUE

Le TMSA traverse dans sa moitié nord-ouest une structure rocheuse anticlinale, localement faillée, avec des calcaires et des calcaires marneux du Crétacé, recouverts par le complexe volcanique de Lisbonne (CVL) constitué d'une alternance de basaltes et de tufs volcaniques. Sur ce tronçon, le TMSA pourrait traverser une zone de failles avec la présence de roches

altérées et fracturées, avec des passages argileux et d'éventuelles cavités karstiques.

Dans sa moitié sud-est, le tunnel interceptera une partie de la série sédimentaire miocène de Lisbonne (MI à MIVb), évoluant de l'Aquitainien au Burdigalien, constituée de terrains compacts de nature sablo-argileuse dominante avec la présence d'horizons rocheux peu nombreux et discontinus de résistance faibles de calcarénites et d'argilites.

Toutes ces assises sont légèrement basculées d'environ 5° à 10° vers le Tage.

Le contexte hydrogéologique du tronçon rocheux est déterminé par l'état de fissuration et d'altération des roches. La charge hydraulique peut atteindre quelques dizaines de mètres au-dessus du tunnel mais les flux souterrains sont généralement faibles comme le montre l'expérience sur les travaux dans ces formations, sauf potentiellement au droit des failles.

Le contexte hydrogéologique du tronçon en terrain meuble est caractérisé par la présence d'un système multicouche avec des communications latérales et verticales et des variations importantes des conditions hydrogéologiques. Les perméabilités mesurées dans les essais de perméabilité réalisés sont variables, mais généralement faibles (10^{-6} à 10^{-9} m/s).

Les calcaires du Crétacé présente une résistance moyenne, de l'ordre de 45 MPa. On observe une grande dispersion des résistances obtenues sur les roches du CVL: les basaltes sains correspondent à des roches très résistantes et très rigides et les tufs volcaniques correspondent à des roches peu résistantes et peu rigides.

Les sols de la série miocène vont des sables silteux peu plastiques aux argiles très plastiques avec des sols intermédiaires (silts ou sables silteux à très silteux peu à moyennement plastique).

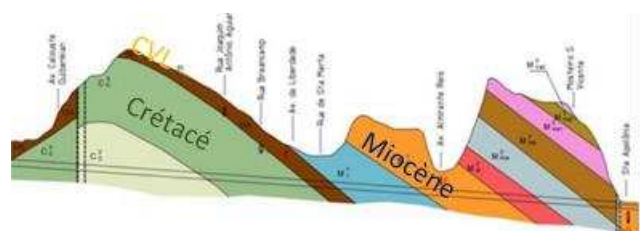


Figure 6. Profil en long géologique du TMSA.

Les terrains traversés par le TCB appartiennent à la série miocène finale, du Burdigalien Supérieur au Serravalien. Sur les deux tiers ouest, le tunnel s'inscrit dans des terrains à dominante sableuse, avec de nombreux niveaux indurés grés-carbonatés, sous une faible charge hydraulique de quelques mètres en radier. Sur le tiers est, les terrains sont majoritairement argileux avec des niveaux marno-calcaires ou de calcarénites. La charge hydraulique peut atteindre une

dizaine de mètres sur ce tronçon. Les derniers mètres du tunnel s'inscrivent dans la formation des Grès de Grilos, affectée de phénomènes karstiques importants.

6 LES METHODES DE REALISATION DES TUNNELS

Le TMSA sera excavé par un tunnelier à confinement par pression de terre (EPB). Le TCB, initialement prévu d'être excavé en méthode conventionnelle, sera également excavé par le même tunnelier, à la suite du TMSA. La roue de coupe est de type mixte, équipée de 40 molettes 17'' et de couteaux, avec un taux d'ouverture de près de 30%. Le diamètre du bouclier est de 6,4m environ, pour une longueur de 10m. La poussée totale de 38000 kN est assurée par 24 vérins au contact des voussoirs.

Le tunnelier fonctionnera selon plusieurs modes de pilotage du confinement:

- En mode « ouvert », la vis fonctionne en extraction à la pression atmosphérique;
- En mode « chambre mi-pleine » avec confinement à l'air en partie supérieure et injections de bentonite le long du bouclier éventuelles;

Le mode « ouvert » est réservé aux tronçons en terrain rocheux, hors zone de failles, prévisible sur 40% du linéaire du TMSA.

En mode « chambre pleine », avec injection de bentonite le long du bouclier.



Figure 7. Réception en atelier du tunnelier « Oli ».

Le mode « chambre mi-pleine » est prévu en terrain meuble (partie du TMSA et totalité du TCB). Le mode « chambre pleine » est réservé aux tronçons sous faible couverture (thalwegs...) sur la base d'un pilotage observationnel par les tassements en surface et une instrumentation en forage. L'injection de remplissage du vide annulaire, de type « coulis bi-composants » est également pilotée en pression-volume sur la base des observations.

La pression de consigne maximale est de 3,8 bars sur le TMSA et de 2,6 bars sur le TCB.

7 LES POINTS SENSIBLES

7.1 Les thalwegs et les passages sous le metro

Le tunnel Monsanto-Santa Apolónia passe successivement sous deux thalwegs:

- Le thalweg de l'ancienne rivière de Valverde où se trouve aujourd'hui la rue St. Marta;
- Le thalweg de l'ancienne rivière de Arroios au niveau de l'actuelle av. Almirante Reis.

Dans ces zones, la couverture est d'environ 13m (2Ø) et le contexte urbain est dense.

Sous le versant ouest du thalweg de Valverde, le tracé du TMSA croise successivement la ligne jaune du métro sous une couverture de 20m et la ligne bleue sous une couverture de 14m. Sous le thalweg de l'av. Almirante Reis, le tracé du TMSA croise la ligne verte sous une couverture réduite à 6m.

En cours de creusement, le suivi des déplacements sur ces ouvrages et le bâti environnant fera l'objet d'un monitoring renforcé, avec notamment la mise en place d'une instrumentation en forage sur le premier thalweg franchi.

7.2 Les intersections tunnel - rameaux

Au droit des intersections tunnel - rameaux, les ouvertures à réaliser dans le revêtement de voussoirs sont relativement importantes (environ 5m de largeur pour 3,5m de hauteur). Par ailleurs, les structures provisoires de reprise doivent impacter le moins possible le gabarit tunnel pendant les travaux de celui-ci. Afin de répondre à cette problématique, les structures provisoires de reprise sont constituées de deux linteaux en UPN (inférieur et supérieur) connectés par deux piédroits cintrés en HEB. Les linteaux inférieurs et supérieurs sont connectés aux anneaux par le biais de scellements et de bèches.

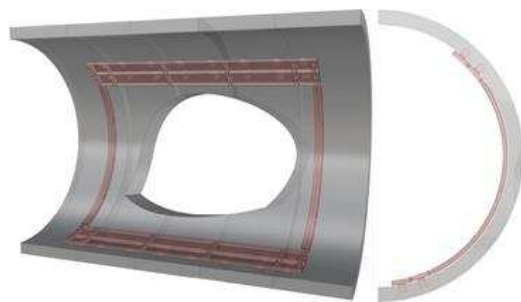


Figure 8. Structure provisoire de reprise au droit des intersections tunnel – rameaux.

7.3 La sortie du tunnelier à St. Apolónia

Le site de sortie du tunnelier à Santa Apolónia est situé au pied de la colline de l'Alfama. Le site est caractérisé par une forte pente. Les avoisinants sont constitués par un bâti très dense, de construction ancienne en

maçonnerie, de deux à quatre niveaux habitables, séparé par des ruelles étroites et des escaliers. Le bâtiment le plus proche du tympan du tunnel, avec une très faible couverture de 3m sous les fondations, est particulièrement sensible en raison de son revêtement de façade en carrelage (« Casa do Azulejo »). Le seuil de déformation admissible (« Limiting Tensile Strain, d'après Boscardin et Cording, 1989), pour un niveau de dommage « léger » est alors de 4.10^{-4} , correspondant aux paramètres de contrôle suivants:

- Tassement différentiel: $\Delta S < 25 \text{ mm}$
- Angle de distorsion: $\beta < 1/350$

Compte tenu de la faible couverture, le respect de ces seuils ne permet pas d'envisager la sortie du tunnelier en mode « confinement en pression de terre ».

En effet, ce mode de confinement ne permet pas une régulation suffisamment précise de la pression, notamment le long du bouclier.

Par ailleurs, le contexte géotechnique présente une forte variabilité des faciès au sein des « Sables de la Quinta do Bacalhau » et des remblais hétérogènes d'épaisseur variable, en lien avec les vestiges archéologiques de la « Muralha Fernandina ».

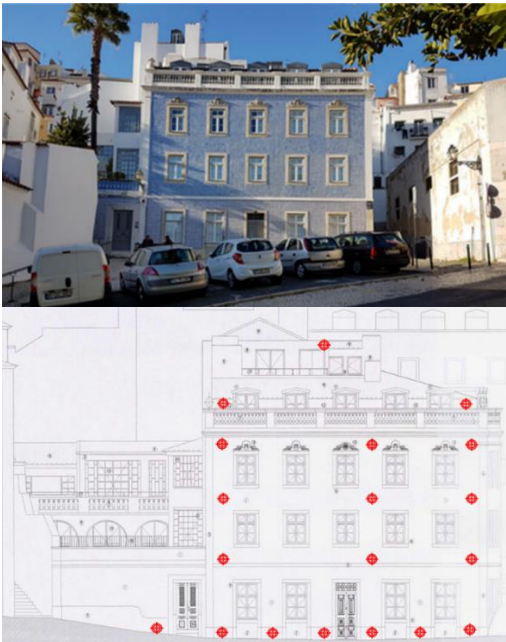


Figure 9. Vue de la Casa do Azulejo et élévation des cibles de suivi des déplacements.

Le principe retenu est la réalisation en méthode traditionnelle avec présoutènement par voûte parapluie, d'une galerie en demi-section supérieure, en contre-attaque à partir du tympan de la tranchée couverte du TM5 (voir § 4). La longueur de cette galerie est conditionnée par la présence d'un niveau rocheux plurimétrique de calcarénites, remontant en voûte du tunnel à 26m du tympan et constituant un toit suffisant pour abaisser en sécurité la pression de

confinement du tunnelier. Une fois la section inférieure excavée par le tunnelier, le revêtement définitif de la galerie sera constitué par les voussoirs.

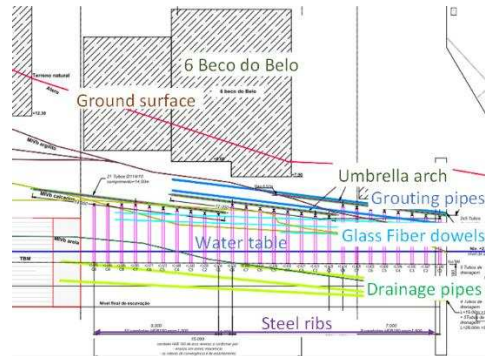


Figure 10. Profil en long de la galerie de contre-attaque.

Le vide entre l'extrados des voussoirs et l'intrados de la galerie de contre-attaque, sera comblé par des injections de mortier, à partir de conduits disposés préalablement à l'intrados de la galerie.

Une évaluation des dommages engendrés sur la « Casa do Azulejo » a été menée à l'aide d'un modèle aux éléments finis de la façade, afin de vérifier le respect du critère de déformation admissible. En cours de creusement, le suivi des déplacements sur la façade sera réalisé par un théodolite, à l'aide d'un réseau dense de cibles de mesures optiques (voir Figure 10).

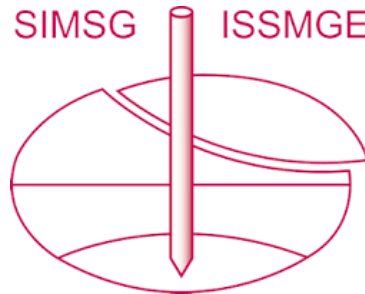
8 CONCLUSION

La maîtrise des inondations urbaines est un des enjeux de l'adaptation au changement climatique, auquel répond la construction des tunnels de drainage de Lisbonne. Le projet associe des ouvrages hydrauliques complexes à des tunnels de longueur et de diamètre importants, qui justifient l'utilisation d'un tunnelier. Malgré un contexte géologique relativement favorable, les contraintes en site urbain ont nécessité des études approfondies de l'impact du chantier et des solutions techniques au cas par cas, comme le recours à un tunnelier à confinement de type pression de terre, diverses solutions de traitements de terrains ou la réalisation d'une galerie de contre-attaque pour la sortie du tunnelier. Après une phase d'étude de trois ans dans le cadre du contrat de Conception-Réalisation, l'année 2023 verra le démarrage du chantier, avec un objectif de mise en service en 2026.

REFERENCES

- Boscardin, M., & Cording, E. (1989). Building Response to Excavation-Induced Settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), pp. 1-21.
- Plano Geral de Drenagem de Lisboa - Câmara Municipal de Lisboa (2015). <https://planodrenagem.lisboa.pt/noticias>
<https://youtu.be/yWG4t8m2tHU>.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 18th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and was edited by Nuno Guerra. The conference was held from August 26th to August 30th 2024 in Lisbon, Portugal.