



© GTM SUD

# BOULEVARD URBAIN SUD DE MARSEILLE - ÉTUDES ET OPTIMISATIONS GÉOTECHNIQUES

AUTEURS : CLÉMENT MOUGEL, CHEF DE PROJET GÉOTECHNIQUE, EGIS - SÉBASTIEN FLORIAT, INGÉNIEUR HYDROGÉOLOGUE, EGIS

LA TRANCHÉE COUVERTE SITUÉE AU NORD DU BOULEVARD URBAIN SUD CONSTITUE UNE INFRASTRUCTURE MAJEURE DU PROJET. DE FORTES CONTRAINTES AU NIVEAU DE L'ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE, TANT EN TERMES D'URBANISME QU'AU NIVEAU DE LA GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE DU SITE, ONT DÛ ÊTRE APPRÉHENDÉES PENDANT LES PHASES DE CONCEPTION ET DE CONSTRUCTION DE L'OUVRAGE AFIN D'EN LIMITER L'IMPACT AUSSI BIEN PENDANT LA PHASE DE TRAVAUX QU'EN SITUATION D'EXPLOITATION.

## LE PROJET DU BOULEVARD URBAIN SUD

Depuis plusieurs années, Marseille a engagé une véritable mutation de ses infrastructures routières pour faire de son centre-ville un cadre de vie apaisé, où voitures et modes doux de déplacement trouvent leur place au côté des piétons.

Une étape significative a été accomplie à l'automne 2018 avec l'ouverture complète de la L2 (A507).

Le lancement des travaux du boulevard urbain sud (BUS) marque l'aboutissement du projet de rocade de la deuxième ville de France.

En plus d'améliorer globalement le réseau routier de l'agglomération marseillaise en assurant une meilleure desserte du littoral, le BUS va également contribuer à améliorer l'accessibilité aux transports en commun et favoriser le développement économique des quartiers Sud, tout en améliorant

**1- Terrassement de la tranchée sous le premier lit de butons.**

**1- Cut-and-cover earthworks under the first layer of struts.**

la qualité de vie des noyaux villageois. Le projet de 8,5 km est divisé en trois sections géographiques (figure 2a). La première débute au niveau de l'échangeur Florian à l'interface de l'A50 et de la L2, puis se poursuit, avec un profil à 2x2 voies souterraines (figure 2b), jusqu'à la rue Verdillon via une succession de tranchées couvertes et de zones paralumes (figure 3). Les travaux sur cette section d'un kilomètre ont débuté en octobre 2017 pour

## LOCALISATION DU PROJET DU BUS SUR LA CEINTURE MARSEILLAISE



2a- Localisation du projet du BUS sur la ceinture marseillaise.

2b- Section type de l'ouvrage.

3- Coupe schématique de la tranche 1 avec sa tranchée couverte et ses trémies d'accès.

2a- Location of the "BUS" project on the Marseille ring road.

2b- Typical cross section of the works.

3- Schematic cross section of work phase 1 with its cut-and-cover and access shafts.

## TECHNIQUES DE RÉALISATION DE LA TRANCHÉE COUVERTE

La technique de parois moulées de 0,62 m d'épaisseur reliées par un ensemble radier + dalle en béton armé (ou butons définitifs dans les zones en paralume) a été mise en œuvre sur ce projet (figure 4a). Les terrassements sont, en majorité, réalisés à ciel ouvert. La paroi travaille en console pendant la première phase d'excavation, puis un lit de butons métalliques provisoires est placé en tête de paroi pour permettre d'atteindre le fond de fouille sous le niveau radier. Pour des questions de phasage de travaux et de maintien de la circulation routière, certaines sections ont dû être réalisées en terrassement en taube (i.e. réalisation de la dalle de couverture avant les terrassements) (figure 4b).

## CONTEXTE GÉOLOGIQUE / GEOTECHNIQUE

### CONTEXTE GÉOLOGIQUE

D'un point de vue géomorphologique, cette tranchée couverte est située en rive gauche de l'Huveaune, au pied du massif de Saint Cyr. Le relief est mollement ondulé et marqué de quelques incisions par des talwegs descendant du massif avoisinant.

© METROPOLE AIX-MARSEILLE PROVENCE

2a

## SECTION TYPE DE L'OUVRAGE



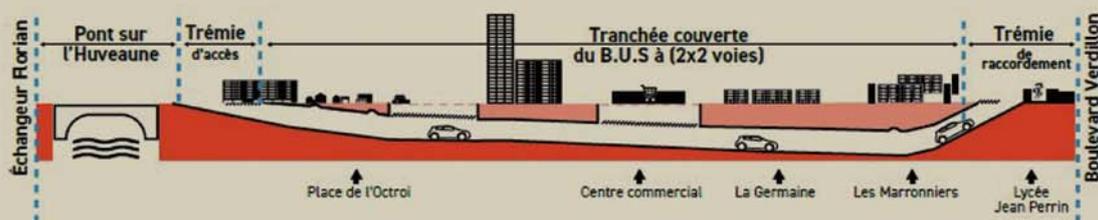
une mise en service prévue en 2020, qui concernera aussi le tronçon allant jusqu'au boulevard Sainte-Marguerite (sections 2 et 3).

Pour le compte de la Métropole Aix-Marseille Provence, qui bénéficie de l'expertise de la direction des infrastructures, le groupement Egis/Ingerop assure la maîtrise d'œuvre des travaux de la première tranche jusqu'au boulevard Sainte-Marguerite qui représente un montant de 161 M€. Les travaux de la tranchée couverte sont réalisés par Gtm Sud en groupement avec Soletanche Bachy, Marengo, Inter Travaux, Sogea Provence, Botte Fondations et Eurovia.

© KCMENVOIR

2b

## COUPE SCHÉMATIQUE DE LA TRANCHÉE 1 AVEC SA TRANCHÉE COUVERTE ET SES TRÉMIES D'ACCÈS



© KCMENVOIR

3

Une analyse du modèle numérique de terrain (figure 5), en particulier pour les zones de failles, corrélée avec un examen croisé des différents sondages géotechniques (ceux réalisés pour le projet et antérieurs), a permis d'établir un profil en long géotechnique cohérent sur l'ensemble de l'ouvrage. Celui-ci met en évidence la succession de terrains suivants :

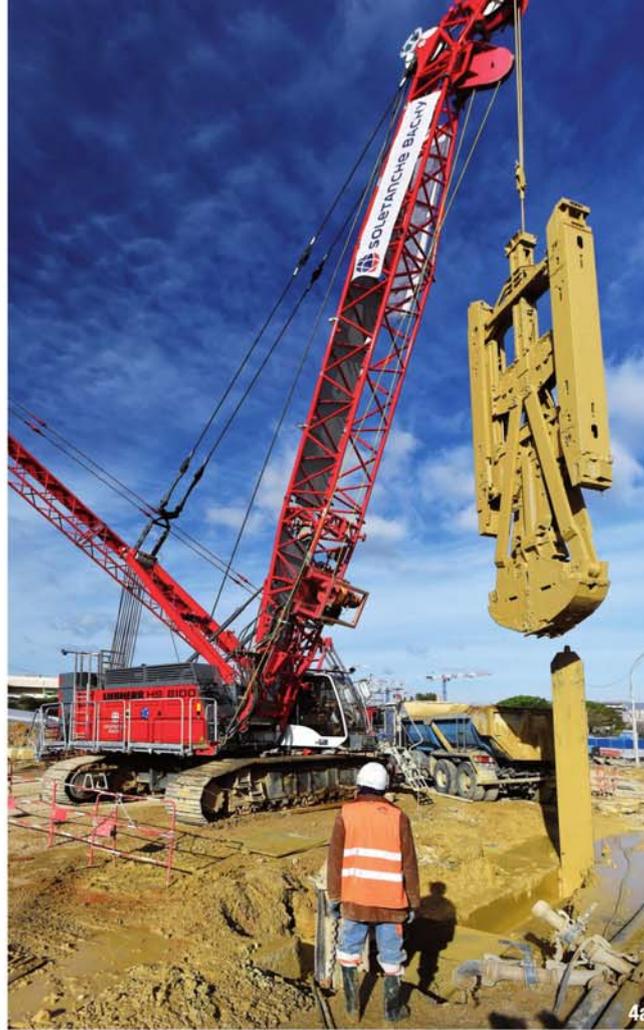
- Remblais hétérogènes en tête dont l'épaisseur varie de 0 à 6 m.
- En partie Nord de l'ouvrage, des dépôts sablo-limoneux à gravo-argileux alluvionnaires ou des matériaux d'érosion du massif de Saint Cyr, plus grossiers à bréchiques (cônes de déjection) sur la moitié sud du projet (puissance de 2 à 7 m).
- Le substratum du Stampien caractéristique de la région marseillaise, rencontré sur l'ensemble du projet. Celui est constitué de différents faciès, majoritairement marneux et d'un faciès de poudingues très compacts.

Localement, un surcreusement net du toit du substratum au niveau du boulevard du Pont-de-Vivaux (toit du Stampien à 17 m au lieu des 5-10 m habituellement rencontrés sur le projet) est vraisemblablement le témoin d'un ancien lit de l'Huveaune.

#### CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

D'un point de vue hydrogéologique, on note deux secteurs distincts :

- Au nord, la présence d'alluvions anciennes correspondant à la vallée de l'Huveaune.



4a  
© GTM SUD

- Au sud, la présence de brèches quaternaires sur des épaisseurs variables, avec un niveau de nappe généralement situé entre quelques décimètres et 2 m au-dessus du toit du substratum stampien, peu perméable. Ce secteur Sud est caractérisé par une forte hétérogénéité liée à des variations de perméabilité au sein des brèches mais également par la présence de paléotalwegs qui concentrent les écoulements et recoupent en plusieurs points le projet.

**4a- Grue treillis et benne à câble utilisées pour la perforation des parois moulées.**

**4b- Zone de terrassement en taupe.**

**4a- Lattice crane and cable grab used for drilling diaphragm walls.**  
**4b- Underground earthworks area.**

#### CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

La faible dureté du substratum marneux n'a pas été un problème pour réaliser l'ancrage des parois moulées. En revanche, l'hétérogénéité des terrains sus-jacents avec des passages bréchiques plus ou moins cimentés ou le faciès de poudingues du Stampien ont été source de challenges permanents pour les équipes. Celles-ci ont dû s'adapter rapidement aux changements de conditions géologiques malgré un environnement urbain contraint, notamment en terme de vibrations admissibles au niveau des bâtis avoisinants.

En outre, la forte variabilité lithologique a nécessité un suivi rapproché des travaux, tant au stade de la perforation des parois moulées qu'au niveau des terrassements, par l'équipe géotechnique (missions G3 et G4) afin de s'assurer en permanence de la compatibilité des hypothèses retenues en phase EXE avec la réalité des terrains rencontrés.

#### PROBLÉMATIQUE DU RADOUCCISSEMENT DES MARNES

Le choix a été fait au stade des études EXE d'optimiser certaines hypothèses du projet, en particulier une réduction de la fiche des parois et une augmentation de la cohésion dans les marnes du Stampien.

Afin de valider ces choix, une étude de sensibilité complémentaire a été menée en phase travaux afin de tester l'influence d'une dégradation des paramètres de cisaillement. Celle-ci a consisté à annuler par itérations la cohésion lorsque le palier plastique est



4b  
© EGCS

atteint en état de butée (rupture fragile) dans les marnes du Stampien au niveau de la fiche des parois moulées. Ce calcul de sensibilité a permis de mettre en évidence qu'en cas de perte de la cohésion dans les marnes du substratum ayant atteint un état de plasticité, le coefficient de sécurité vis-à-vis de la butée diminue et peut être inférieur à 1,5 en fonction des hypothèses retenues pour le sol d'ancrage. De plus, cette baisse du coefficient de sécurité s'accompagne d'une augmentation des déformations.

Compte tenu des amplitudes de déformation en jeu, leur augmentation liée à un phénomène de rupture du sol en butée serait, en pratique, difficile à suivre voire impossible à détecter par la méthode observationnelle.

Dans ces conditions, la maîtrise d'œuvre a recommandé de prévoir un allongement de la fiche des parois afin de garantir le coefficient de sécurité recherché en phase travaux, ce qui a conduit à un allongement de 0,5 m à 1,5 m en fonction des zones du projet. Afin de satisfaire des conditions de sécurité optimales durant la phase de travaux et de se prémunir contre un risque de plastification des marnes en butée au niveau de la fiche de la paroi, une valeur seuil a été définie en

termes de déplacement de la paroi pendant de la phase de terrassement du fond de fouille à partir de laquelle il serait décidé de mettre en œuvre un deuxième lit de butons (à une cote altimétrique plus basse). Cette disposition a également pour objectif de maîtriser les tassements engendrés sur les bâtis avoisinants, qui localement se trouvent à moins de dix mètres de la paroi et présentent une vulnérabilité aux tassements différentiels.

Une méthode observationnelle a donc été déployée afin de suivre au plus

près les déformations des parois et les efforts repris dans les butons et d'être en mesure de déclencher rapidement le renforcement du butonnage si nécessaire. Pour ce faire, une vingtaine de sections d'auscultation a été mise en place sur la tranchée (figure 6) et suivie sur une base hebdomadaire (ou plus fréquente, ponctuellement, sur des points sensibles). Chacune d'elles est composée de :

- 2 inclinomètres en paroi, ancrés de 5 m dans le substratum afin de garantir un référentiel fixe à leur base ;
- 4 cellules topographiques pour mesures de convergences, en tête et en ventre de paroi ;
- 3 jauges de déformations sur le buton de la section, afin de connaître son état de contraintes.

Il s'est révélé primordial de disposer de ces différentes sources d'information indépendantes de manière à pouvoir croiser les données collectées et analyser de manière plus robuste le comportement de l'ouvrage, en s'affranchissant au maximum des facteurs extérieurs pouvant influencer sur certaines mesures (dilatation des butons suivant la température, cibles de convergence exposées aux activités du chantier...). En parallèle, les bâtis les plus proches

de l'ouvrage ont été équipés de fissuromètres et de cibles topographiques afin de suivre l'impact du projet sur ces structures.

### CONCEPTION D'UN DISPOSITIF DE TRANSPARENCE HYDRAULIQUE MIXTE

Lors des études en phase PRO, les analyses et investigations hydrogéologiques ont montré que le projet était susceptible de générer un effet barrage sur les écoulements souterrains, dans le secteur de la tranchée couverte entre la rue Verdillon et l'Huveaune. Pour atténuer ces désordres au niveau de la nappe et éviter leurs conséquences sur les avoisinants (inondations de caves à l'amont, désordres sur le bâti existant à l'aval), des dispositions constructives ont été prises, à savoir la réalisation de parois moulées en jambes de pantalon afin d'améliorer la transparence hydraulique du projet.

Toutefois, en raison du contexte géologique, il n'est pas possible d'assurer une transparence totale puisque le radier se situe localement dans le substratum très peu perméable (Stampien), rendant impossible tout dispositif de transparence à base de jambes de pantalons.

C'est pour cette raison que d'autres dispositions constructives ont été prises pour limiter l'impact sur la nappe du projet dans sa globalité. Cela signifie d'une part, limiter l'extension et l'amplitude de l'effet barrage en atténuant les variations du niveau piézométrique liées au projet, et d'autre part, assurer la continuité des écoulements souterrains, notamment dans les vallons de forte perméabilité perpendiculaires au projet.

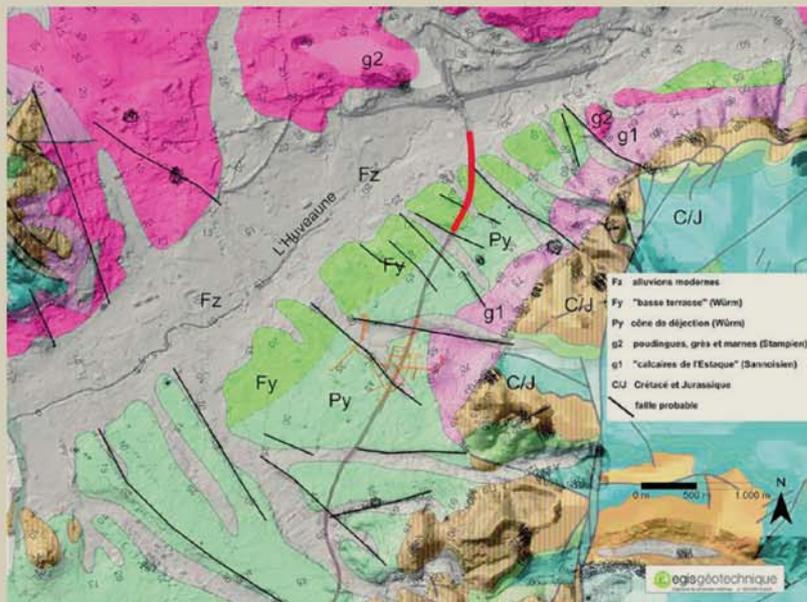
Après étude et analyse des différentes techniques, les jambes de pantalon, qui ne peuvent être mises en œuvre que sur environ 60% du linéaire du projet (soit 600 m sur les 1 000 m), ont été associées à des panneaux drainants. Ces panneaux réalisés au contact des parois moulées, sur leur face extérieure, sont remplis de matériaux drainants et permettent, à l'amont, de collecter l'eau bloquée par le projet et de faciliter la répartition et l'écoulement des eaux à l'aval. Ces deux panneaux sont connectés par une conduite de liaison qui passe sous le radier de la tranchée couverte et à travers les deux parois moulées. Elle permet le transit de l'eau de l'amont vers l'aval, sous l'effet de la différence de charge entre les 2 panneaux, comme indiqué sur le schéma de principe ci-après (figure 7).

**5- Carte géologique harmonisée (BRGM) drapée sur le modèle numérique de terrain, le projet étant en rouge (extrait dossier PRO Egis).**

**5- Coordinated geological map (BRGM) draped over the Digital Terrain Model, the project being in red (extract from Egis project file).**

## CARTE GÉOLOGIQUE HARMONISÉE (BRGM) DRAPÉE SUR LE MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN, LE PROJET ÉTANT EN ROUGE

(extrait dossier PRO Egis)



EXTRAIT DE LA VUE EN PLAN PRÉSENTANT LES SECTIONS D'AUSCULTATION SUIVIES SUR LE PROJET ET UNE COUPE TYPE DU DISPOSITIF MIS EN PLACE  
(inclinomètres dans les parois, cibles de convergence et jauges de déformations sur les butons), extrait du dossier EXE



6 © GTM SUD

Au stade PRO, les dispositions constructives retenues sont synthétisées dans le tableau A.

Les longueurs cumulées pour chaque dispositif sont donc les suivantes :

- 175 m sans disposition constructive.
- 515 m de jambes de pantalon (mais, sur un linéaire de 70 m en plus, prévoir panneaux drainants complémentaires au droit des panneaux non ouverts des jambes de pantalon : ces panneaux drainants seront connectés par des conduites  $\varnothing$  200 à 300 mm passant sous

le radier de l'ouvrage et traversant les parois moulées - réservation à prévoir dans le radier -, l'assise de la conduite étant placée à environ 0,8 m en sous-face du radier. Ainsi, l'écoulement de la nappe se produit d'abord par les panneaux ouverts des jambes de pantalon, puis, par les conduites reliant les panneaux drainants. Ce linéaire supplémentaire de panneaux drainants ajoute 13 conduites additionnelles sous le radier, portant ainsi le total de ces conduites à 68 environ (55+13).

- 310 m de panneaux drainants.

En phase travaux, l'entreprise a proposé des ajustements et des optimisations de ces dispositions constructives, à partir des observations réalisées durant les travaux de parois moulées et de terrassement (méthode du suivi observationnel). Ces ajustements se traduisent notamment par une diminution du nombre de panneaux drainants. Elle a aussi dû s'adapter à certaines contraintes de chantier, liées à la géologie (discontinuités dans la profondeur du toit du Stampien, présence de blocs, variations de faciès au sein des alluvions...) ou à la présence d'éléments

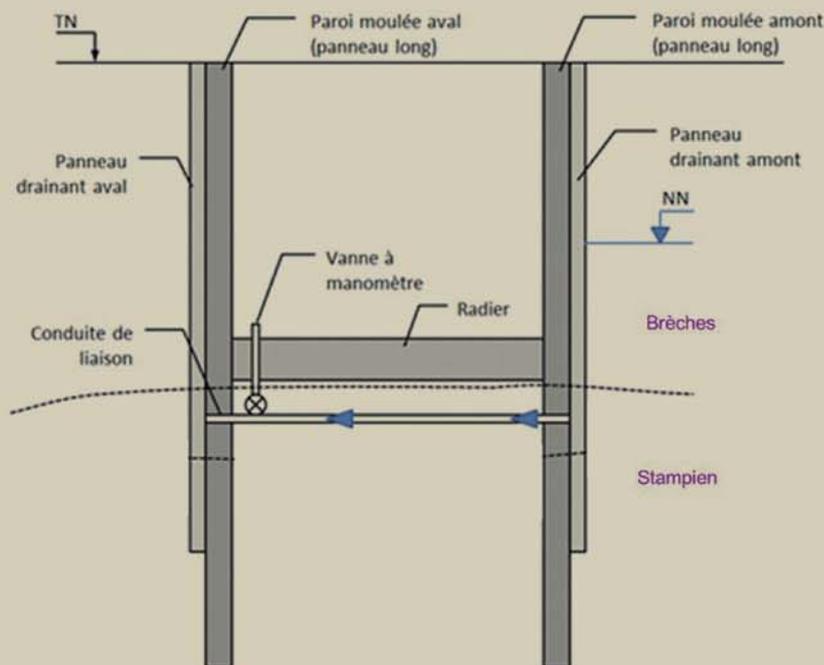
6- Extrait de la vue en plan présentant les sections d'auscultation suivies sur le projet et une coupe type du dispositif mis en place (inclinomètres dans les parois, cibles de convergence et jauges de déformations sur les butons), extrait du dossier EXE.

TABLEAU A : DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES RETENUES

Du Pk...	au Pk...	Longueur (m)	Disposition constructive	Commentaire
3840	4015	175	Aucune	-
4015	4190	175	Jambes de pantalon	Ouverture de la PM dans les brèches
4190	4405	215	Panneaux drainants	-
4405	4475	70	Jambes de pantalon + panneaux drainants	Ouverture de la PM dans les brèches mais épaisseur résiduelle potentiellement très faible
4475	4525	50	Panneaux drainants	-
4525	4680	155	Jambes de pantalon	Ouverture de la PM dans les alluvions
4680	4725	45	Panneaux drainants	-
4725	4840	115	Jambes de pantalon	Ouverture de la PM dans les alluvions
Total (m)		1000		

6- Extract of the plan view showing the monitoring sections followed on the project and a typical cross section of the system put in place (inclinometers in walls, convergence targets and strain gauges on struts), extract from work file.

## SCHEMA DE PRINCIPE DES TRAVERSEES DRAINANTES PAR PANNEAUX DRAINANTS



### CONCLUSIONS

Au premier trimestre 2020, la première section du Boulevard Urbain Sud (BUS) devrait être mise en service après deux ans et demi de travaux qui auront été nécessaires pour réaliser cet ouvrage clé dans la desserte des quartiers Sud de Marseille.

La complexité du contexte géologique et hydrogéologique a nécessité une forte implication des équipes de géotechniciens et d'hydrogéologues côté maîtrise d'œuvre et entreprise, en appui aux équipes travaux, afin d'ajuster au mieux l'ouvrage à son environnement.

La mise en œuvre de la méthode observationnelle en phase travaux a ainsi permis d'optimiser les ouvrages en réduisant la fiche des parois et le nombre de dispositifs de transparence hydraulique, ce qui constitue un atout significatif pour le projet en terme de coûts et de délais. □

© EGIS  
7

particuliers du projet (issues de secours, station de pompage) ne permettant pas la réalisation des dispositions constructives définies en phase PRO. Finalement, le dispositif mis en œuvre contient :

- 16 jambes de pantalons entre les Pk 4010 et 4135 ;
- 13 panneaux drainants raccordés par des connexions hydrauliques entre les panneaux amont et aval entre les Pk 4174 et 4533 ;
- 26 jambes de pantalon entre les Pk 4568 et 4796, complétées par 2 panneaux drainants aux Pk 4684 et 4707 ;
- 3 jambes de pantalon uniquement sur la paroi Ouest (aval) aux Pk 4804, 4811 et 4818 en raison de la différence de cote du toit du Stampien dans ce secteur Nord ;
- 3 traversées drainantes en matériaux calibrés et reliant des jambes de pantalons aux Pk 4604, 4625 et 4639.

**7- Schéma de principe des traversées drainantes par panneaux drainants.**

**7- Schematic diagram of drainage crossings by draining panels.**

En complément, et pour assurer le suivi du niveau de la nappe pendant les travaux et à l'issue de ceux-ci, un réseau de piézomètres est implanté et suivi régulièrement afin de garantir l'absence de désordres au niveau des écoulements souterrains liés au projet et de confirmer la transparence hydraulique de la tranchée couverte.

### PRINCIPALES QUANTITÉS

**LONGUEUR DE L'OUVRAGE : 998 m**

**PAROIS MOULÉES : 24530 m<sup>2</sup>**

**FERRAILLAGE DE LA PAROI MOULÉE : 75 kg/m<sup>3</sup>**

**DÉBLAI TRANCHÉE COUVERTE : 180 000 m<sup>3</sup>**

**BUTONS : 165 u**

**TRANSPARENCE HYDRAULIQUE PAR PANNEAUX DRAINANTS : 15 u**

**TRANSPARENCE HYDRAULIQUE PAR JAMBES DE PANTALON : 45 u**

**SECTIONS D'AUSCULTATION : 19 u**

**MONTANT DU MARCHÉ : 161 M€**

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : Métropole Aix Marseille Provence**

**CONCEPTION ET MAÎTRISE D'ŒUVRE TRAVAUX : Egis, Ingerop**

**GROUPEMENT D'ENTREPRISES DE TRAVAUX : Gtm Sud, Soletanche Bachy, Marengo, Inter Travaux, Sogea Provence, Botte Fondations, Eurovia**

### ABSTRACT

#### SOUTH MARSEILLE URBAN BOULEVARD - GEOTECHNICAL ENGINEERING AND OPTIMISATION

CLÉMENT MOUGEL, EGIS - SÉBASTIEN FLORIAT, EGIS

The cut-and-cover tunnel of the South Marseille Urban Boulevard ("BUS") is an essential link in the project to improve access to the southern district and provide a link with the A50/A507 interchange. This diaphragm-wall structure underwent optimisation during its design and execution, based in particular on use of the observational method during the works phase. The as-built structure thus represents optimal integration by limiting its impact on its environment, in terms of hydraulic transparency and built-up land. □

#### CIRCUNVALACIÓN URBANA SUR DE MARSELLA - ESTUDIOS Y OPTIMIZACIONES GEOTÉCNICAS

CLÉMENT MOUGEL, EGIS - SÉBASTIEN FLORIAT, EGIS

La túnel en zanja cubierta de la Circunvalación Urbana Sur de Marsella es un eslabón clave del proyecto de integración de los barrios del sur de la ciudad y de enlace con el nudo A50/A507. Esta obra en pantallas de hormigón ha sido objeto de optimizaciones a lo largo de su diseño y su realización, entre las que destaca la aplicación del método de observación durante la fase de obras. La obra ejecutada responde así a una integración óptima que limita su impacto sobre el entorno en términos de transparencia hidráulica y estructura. □