

22 mai à Toulon

Traversée souterraine de Toulon, creusement du tube sud (second tube)

Le 22 mai 2008, la délégation Méditerranée de l'AFGC a organisé conjointement avec l'AFTES une série de conférences sur la traversée souterraine de Toulon, particulièrement sur la réalisation du tube nord dont le chantier est actuellement en cours de réalisation.

Rappel du programme

9 h00 : Accueil des participants salle Panoramique 5ème étage - DDE du VAR

9h30 : Introduction

M. Jaby (AFTES) et M. Resplendino (AFGC)

9h50 : Présentation de l'opération par le Maître d'Ouvrage

Guy Gilbert - DRE/SMO

10h20 : Le contexte géologique - Impact sur la conception et réalisation

JF Serratrice - CETE Méditerranée

10h40 : Impacts des évolutions réglementaires au niveau de la sécurité

G Hamaide - CETU

10h50 : La conception générale des ouvrages et l'organisation du chantier par le Maître d'œuvre

MM Marguet et Thiebault - SETEC TPI

11h20 : La réalisation des ouvrages

M Vigouroux - Bouygues Construction

12h00 : Le suivi des ouvrages existants

Mme Bourguine - Soldata

12h15 : Discussion

12h30 : Déjeuner à la plage du Mourillon

14h30 : Visite du chantier

1 - Le mot du président de l'AFGC Méditerranée

L'Association Française de Génie Civil est un lieu d'échanges où se côtoient maître d'œuvre, maître d'ouvrage, bureaux d'études, architectes et plus généralement tous les acteurs œuvrant pour le génie civil. Les nombreuses manifestations organisées par les six délégations régionales de l'association ainsi que les publications scientifiques et techniques permettent à ses nombreux membres (plus de 800) de partager leur connaissance et savoir faire. L'objectif de l'association est de rapprocher le monde des matériaux de celui des structures, le monde de l'enseignement et de la recherche avec celui de la conception et de l'application. Lieu d'échange, l'association permet aussi de mettre en avant l'expérience acquise sur le terrain lors de visite de chantier.

C'est dans ce souci d'échange que l'AFGC-Méditerranée poursuit une collaboration fructueuse

avec d'autres associations telles que l'association Française des Tunnels et de l'espace souterrain, avec laquelle elle co-organise cette journée de conférences et de visite autour de la traversée souterraine de Toulon.

2 - Présentation de l'opération

La réalisation du tube sud de la traversée souterraine de Toulon s'inscrit dans la continuité du projet initié avec la réalisation d'un premier tunnel. En effet, La conception générale du tunnel et ce dès la Déclaration d'Utilité Publique en 1991, est celle d'un tunnel bitube, le tube nord recevant la circulation dans le sens Nice Marseille, le sud dans le sens Marseille Nice.

Le premier enjeu de cette opération est l'achèvement de la continuité autoroutière entre l'A50 venant de Marseille et l'A70 menant vers Nice. Le second enjeu est de permettre le désengorgement du centre de Toulon par la suppression du trafic de transit sur les axes du centre. En libérant les rues du centre ville, cette réalisation permettra de dégager l'espace nécessaire à la réalisation d'un transport en commun en site propre.

Par ailleurs, la réalisation de ce second tube permettra l'ouverture des tunnels à l'ensemble des poids lourds et transports en commun, exception faite des transports de matières dangereuses.

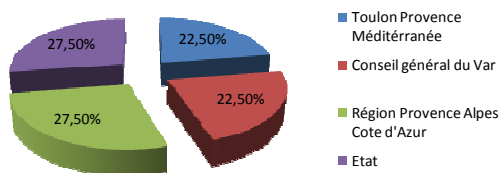
L'objet de cette réalisation est la réalisation du second tube (tube sud) portant le sens Marseille-Nice, venant s'ajouter au premier tube (tube nord) mis en service le 19 septembre 2002. Il s'agit aussi de compléter les dispositifs de sécurité par la confection des deux tubes au moyen de rameaux d'évacuation des usages en cas d'accident majeur.

Pour mieux situer le projet un bref rappel historique est nécessaire:

- 1987(Septembre) : début du projet de tunnel de Toulon, avec la prise en considération et la décision de financement
- 1991(Avril) : déclaration d'utilité publique
- 1994: premiers travaux
- 2002 (Septembre) : mise en service du 1er tube (tube nord)
- 2005 (Juillet) : convention de financement du 2nd tube
- 14 novembre 2006: ordre de service de commencer les travaux du second tube

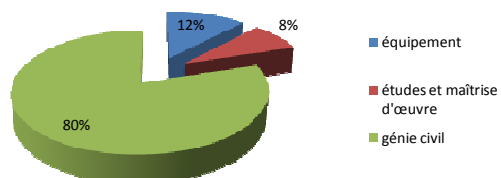
La répartition du financement se fait de la manière suivante:

Répartition des financements



Pour un coût total de 245 M€ en valeur Juin 2003, 292M€ en valeurs de réalisation, se répartissant de la façon suivante :

répartition des coûts



Les intervenants de ce projet sont :

- La DRE SMO pour la maîtrise d'ouvrage.
- La maîtrise d'œuvre est réalisée par Setec tpi/Terrasol, pour les études et le suivi des travaux.
- L'assistance à maîtrise d'ouvrage est réalisée par le CETE Méditerranée à travers le laboratoire et sa section géotechnique, et par la DIR Méditerranée.

- un groupe de 4 experts nommés lors du creusement du tube nord suite au problème qui poursuit son travail d'expertise.
- le CETU
- Le marché de génie civil du tunnel est confié à Bouygues qui est le mandataire d'un groupement comprenant Soletanche Bachy, Colas Méditerranée et Screg Sud Est.
- Et de nombreux contrôle

La réalisation de la traversée souterraine de Toulon s'est faite en deux phases.

La première phase du chantier a vu la réalisation du tube nord ainsi que ses accès qui sont communs aux deux tubes, ainsi que celle de deux usines de ventilation partagées elles aussi par les deux tubes.

La seconde partie des travaux comporte donc trois réalisations principales :

- la tranchée couverte sous l'avenue Alphonse Juin à l'est d'une longueur de 200 m
- la tranchée couverte place Villevieille d'une longueur de 200m
- le tube sud de 1800 m de longueur

A cela s'ajoute la création des rameaux de sécurité inter tube, dont des amorces avaient déjà été effectuées dans le tube nord afin de permettre de limiter les perturbations dans le tube nord du fait des travaux.

Il faut noter que suite à l'accident du tunnel du Mont Blanc de nouvelles règles de sécurités ont été définies ayant comme répercussion importante l'augmentation du nombre de ces rameaux inter tubes.

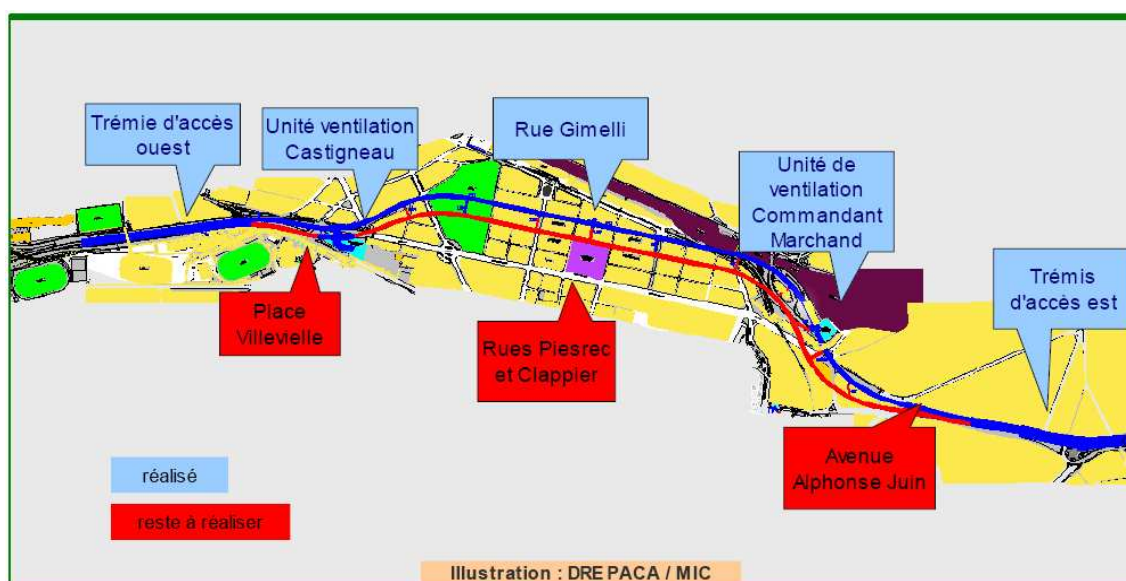


Figure 1 : Visualisation de l'opération

La réalisation de ce second tube ne part pas de zéro puisqu'elle s'inscrit dans la suite du creusement du tube nord. Elle est donc riche de l'expérience accumulée lors du creusement du tube nord. Il faut se rappeler qu'au printemps 1996, un effondrement s'était produit (sans conséquence puisqu'il n'y avait pas d'habitation en surface) lors du creusement du tube nord.

Cet effondrement s'était produit dans une zone à la géologie difficile, zone que le tube sud traverse lui aussi avec cependant des constructions en surface (immeuble de 8 étages).

Cette expérience permet de proposer des méthodes d'excavations appropriées, de proposer une stratégie particulière de traversée de la zone à la géologie délicate avec la création d'un puits d'attaque dans cette zone (Puit Marchand) permettant de déconnecter le creusement de cette zone des chemins critiques de creusement depuis l'est et l'ouest.

Du fait de la spécificité de l'opération (travaux en souterrain sous la ville de Toulon), il a été décidé d'un suivi précis du comportement du sol et du bâti.

De plus des solutions techniques ont dû être recherchées pour limiter la gêne en surface en réalisant le maximum de travaux en souterrain, y compris pour les tranchées couvertes.

Celles-ci ont été réalisées de la manière suivante :

- création de la paroi moulée jusqu'au niveau du butonnement, excavation et pose des butons.
- Fin de la création de la paroi moulée de la tranchée, création d'une dalle de couverture.
- Excavation de la tranchée.
- Pose des cadres, remblaiement.

Entre février et novembre 2007 pour la tranchée Est, et entre février 2007 et avril 2008 pour la tranchée Ouest.

Pour garantir la qualité de l'opération, mais aussi pour vérifier le respect des engagements pris pendant les travaux, de nombreux contrôles sont effectués :

- ✓ suivi du bâti (*Bureau Veritas*)
- ✓ contrôle topographique (*Optio méditerranée*)
- ✓ coordination SPS (*M.S. GC-BTP*)
- ✓ qualité des eaux (*Laboratoire de la ville de Toulon*)
- ✓ qualité de l'air (*AtmoPACA*)
- ✓ acoustique (*Acouplus*)
- ✓ contrôle des matériaux (*Cete Méditerranée*)
- ✓ contrôle extérieur étanchéité (*EGIS rail*)

Il faut noter que la circulation dans le tube nord est maintenue en journée ce qui pose certaine contrainte pour le chantier.

La fin du creusement est prévue pour le début de l'année 2010, les équipements seront posés entre février 2010 et juin 2011 pour une mise en service en septembre 2011

3 - Un contexte géologique particulier: conséquences sur la conception et la réalisation

Si pour toute opération de creusement de tunnel, la géologie est l'une des problématiques majeures, ici le contexte géologique rend celle-ci particulièrement prééminente.

La géologie du massif dans lequel le tunnel est réalisé est particulièrement complexe.

On retrouve essentiellement trois zones dont la construction géologique est bien distincte:

- stratigraphie logique
- semelle de charriage
- zone charriée à la stratigraphie inversée

De plus, cette complexité et cette variabilité des terrains constituant le massif se retrouve à toutes les échelles, du mètre au centimètre, Cela rend la prévision des profils géologiques particulièrement difficile. Notamment lors du percement du tunnel la prévision des structures géologiques à l'avant du front de taille.

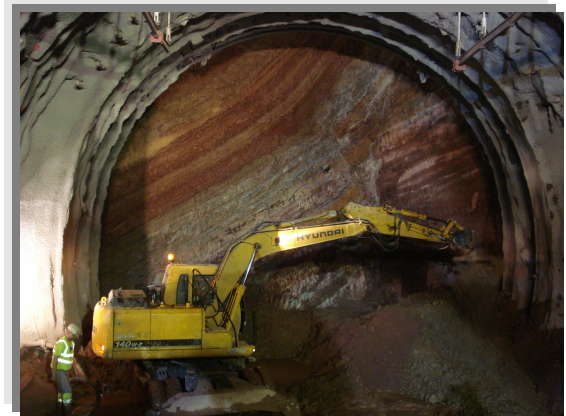


Figure 2 : Front de taille de l'attaque Est du tube sud

Par exemple lors du percement du tube nord dans le secteur du Chalucet, les structures géologiques dépassent le front.

Globalement on peut dire que la géologie du massif est due à un mouvement de charriage des terrains¹ conduisant à un empilement et mélange de couches géologique qui ne suit pas forcément l'ordre logique². De manière simplifiée on peut décrire la géologie du massif d'ouest en est de la façon suivante :

- A l'ouest, des matériaux charriés dont la stratigraphie est inversée
- Une nappe de charriage d'une centaine de mètre d'épaisseur à l'origine des difficultés rencontrées lors du creusement du tube Nord
- A l'est, des matériaux à la stratigraphie logique

¹ Les terrains ont été déplacés sur plusieurs kilomètres. L'explication de l'inversion de la stratigraphie de la nappe de charriage fait débat. Selon une des explications avancées, cela serait dû à un glissement de terrain sur une ancienne montagne sous marine.

² Ordre logique : l'âge de formation des terrains croît avec la profondeur

Pour accéder à une connaissance suffisante du massif pour permettre les travaux (rappelons que le percement du tunnel se fait en plein sous la ville de Toulon...), des campagnes de sondages très importantes ont dû être menées (10 mètre de sondage par mètre de tunnel soit 20 km. On considère généralement que 0,5 à 1 m/m de tunnel constitue déjà une reconnaissance de qualité). Les premiers sondages datent des années 60 et se sont poursuivis jusqu'à la réalisation du tube Nord. Leurs profondeurs ne dépassaient pas la cote du radier du tube.

A partir de 2000, des sondages profonds, des essais pressiométriques et le creusement de puits de reconnaissances ont permis de mieux appréhender la géologie : du fait de la complexité des structures géologiques une vision large et synthétique est ici obligatoire !

A cette complexité des structures géologiques s'ajoute la complexité de l'hydrographie.

En effet, tous les ouvrages se situent en dessous du niveau de la mer, et les terrains sont très variés. De plus, on est en présence de nappes différentes en fonction des terrains, nappes qui sont rabattues pendant la construction du tunnel³. Ces nappes sont parfaitement connues grâce à l'expérience de la construction du tube nord.

Il faut noter que la nappe des terrains calcaires est en communication avec la semelle de charriage et peut donc poser un problème à l'ouvrage.

D'un point de vue géotechnique, les effets d'échelles rendent le terrain difficile à appréhender, difficulté renforcée par les effets mécaniques du charriage.

Lors du creusement se propageront des cuvettes de tassement avec l'avancement du front. Celles-ci sont déterminées par la structure du massif. Le tunnel se trouvant en site urbain, ces tassements peuvent poser problèmes. Le tassement admissible par le bâti est ici dimensionnant pour le tunnel⁴.

Pour résumer, on est ici en présence d'un massif complexe, d'un régime hydrographique sensible et de terrains aux propriétés géotechniques variées dispersées et difficilement accessibles. A cela s'ajoutent les contraintes d'un site urbain.

Compte tenu de ce contexte, des traitements de terrains sont nécessaires soit pour des raisons hydrographiques soit pour renforcement. Le tunnel est réalisé avec une méthode séquentielle avec pré-soutènement pour limiter les tassements, ainsi qu'un soutènement modulable.

De plus il est nécessaire d'installer un dispositif de surveillance important en surface.

³ Ce phénomène a pu être observé pendant la construction du tube nord

⁴ Définition des seuils de dommages acceptables : autour de 0,2% pour le tube nord, et 0,05% pour le tube sud

Les manifestations régionales

Un contrôle des dommages aux bâti, déjà mis en place⁵ pour le tube nord a été reconduit pour le tube sud. Il permet de définir des indemnités en cas de désordre. Pour le tunnel nord ce système a donné satisfaction puisque l'opération n'a entraîné aucun recours au tribunal

4 - Les apports particuliers du CETU pour de tels projets.

Pour ce projet, la maîtrise d'ouvrage s'est entourée de plusieurs partenaires. Le Centre d'Etude des Tunnels est un de ceux-ci et cette opération permet de donner un exemple de son apport à un tel projet.

La participation du CETU⁶ à ce projet se décompose en trois pôles, l'assistance au maître d'ouvrage pour le creusement du tunnel sud, l'assistance à l'exploitant pour le suivi du tunnel nord et la communication auprès des usagers du tunnel.

L'assistance à maîtrise d'ouvrage prend la forme d'avis et de conseils techniques en ce qui concerne l'exécution des travaux. Le CETU aide aussi le maître d'ouvrage à respecter les fonctionnalités de l'ouvrage dans tous les domaines, équipements d'exploitation et de sécurité compris, ainsi qu'à contrôler les coûts et délais de l'opération. Pour cela le CETU peut s'appuyer sur ses capacités d'analyse multi-domaines, comme il l'a fait par exemple pour proposer une analyse puis des modifications du système de ventilation du tube sud.

L'assistance à l'exploitant pour le suivi du tube nord s'est faite à la demande de la DIR méditerranée, notamment par la réalisation et l'exploitation d'une imagerie scanner de l'ensemble du tube nord en vue de détecter d'éventuelles évolutions de désordre dues au percement du tube sud.

Le suivi du chantier se fait aussi grâce à OSCAR, outil de suivi du chantier, des auscultations et du récolement en Tunnel, outil permettant le partage des données, et le suivi à distance. Ce suivi se fait selon trois échelles de temps (jour, semaine et mois) correspondant à trois échelles de décision (données de creusement-soutènement, décision de pilotage, bilans). Cet outil permet la saisie graphique des éléments de réalisation des travaux ainsi que la gestion documentaire. OSCAR permet aussi la localisation, la visualisation et l'exportation des informations par le Web.

Le CETU apporte aussi sa connaissance du comportement des usagers. Il est nécessaire de les informer pour qu'ils s'approprient le fonctionnement de l'ouvrage dans les différentes situations qu'ils peuvent rencontrer. Cela se traduit par la mise en place pour les toulonnais d'une *maison du tunnel* qui devrait ouvrir à l'automne 2008.

⁵ Référé expertise du Tribunal Administratif de Nice

⁶ Centre d'étude des tunnels, à Lyon

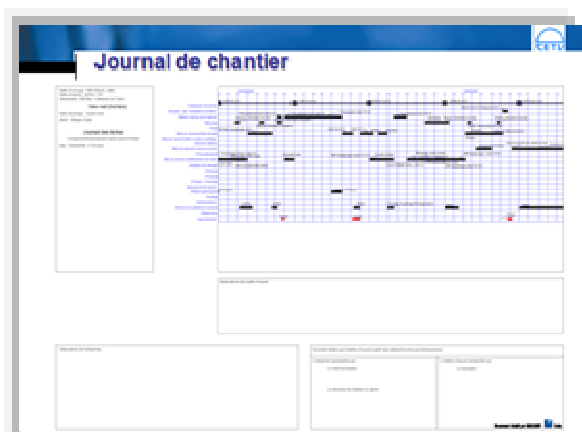


Figure 3 : Journal de Chantier OSCAR

5 - Conception générale, organisation du chantier, réalisation de l'ouvrage

Le tunnel est de type bitube, chaque tube contenant un sens de circulation.

La largeur roulable est de 8,25m pour le tube sud, contre 7,60 pour le tube nord.

Le tunnel sud est composée de deux tranchées couvertes d'accès est et ouest de 200m chacune ainsi que d'un tube de 1800m.

Le phasage du chantier a été réalisé pour perturber le moins possible la circulation en surface. De ce fait, les tranchées couvertes ont d'abord été réalisées avec la création d'un platelage définitif. La réalisation du génie civil, se faisant ensuite depuis ces tranchées ce qui a permis de rétablir les voies de circulations au plus vite.

La section d'excavation du tunnel varie de 115m² à 140m², la couverture elle varie de 7m (attaque) à 40m. Le tunnel est percé depuis 3 attaques principales :

- Ouest : depuis une chambre de l'usine de ventilation n°1. Cette attaque ne fonctionne que la nuit car elle débouche dans le tunnel nord qui est fermé à la circulation la nuit pour permettre les travaux.
- Est : depuis la tranchée couverte
- Zone marchand : depuis un puits d'accès

Cette organisation a pour but de gagner du temps.

Le fonctionnement de l'attaque ouest est réduit du fait de difficulté d'accès à travers l'usine de ventilation qui pose problème pour sortir les matériaux extraits et alimenter les matériels.

La zone Marchand correspond à la zone géologique de la semelle de charriage, particulièrement difficile. C'est cette zone où s'était produit un effondrement au printemps 1996 lors du percement du tube nord.

Le creusement s'effectue depuis un puits (recouvert d'un hangar d'isolation phonique pour limiter la gêne aux

riverains), ce qui permet une première reconnaissance du terrain, et surtout dans cette zone difficile de ne pas être soumis à la pression des délais. Cette attaque est déconnectée des chemins critiques du chantier.

L'attaque ouest se situe dans les alluvions, sous nappe en pente descendante. Le travail s'effectue au moyen de pelle mécanique et de pelle fraise permettant de monter jusqu'à 11m.



L'attaque est profite elle de l'utilisation d'une nouvelle machine innovante. Celle ci permet de s'affranchir des problèmes de stabilité d'une nacelle posée (lors du percement) sur un sol de mauvaise qualité.

Cette machine est dérivée de celle qui était utilisée dans les mines des bassins de Lorraine, en Allemagne ou en Autriche.

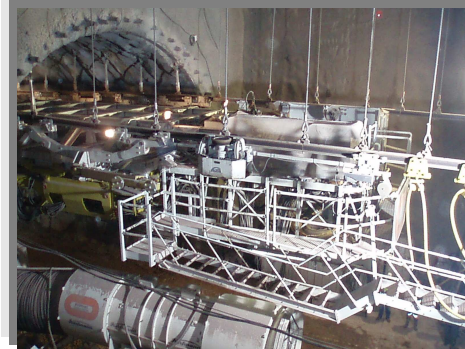


Figure 4 : L'attaque Est et sa nouvelle machine

Elle permet de réaliser les opérations de nacelles de forage ou de pose de cintre. L'entreprise n'effectue pas d'opération de béton projeté avec cette machine pour ne pas l'endommager.



Figure 5 : Une machine innovante

Cette organisation doit permettre une cadence de percement d'environ 40m par mois (variant selon les profils de soutènement).

Le chantier utilise différents profils de soutènement en fonction de la nature des terrains : 2 profils (PS0 et PS1) ne comportent pas de pré soutènement, ni de contre radier. Le soutènement est réalisé par un boulonnage radial de la voûte ou par des cintres HEB espacés de 1,5m, ainsi que du béton projeté. Il est prévu d'utiliser ces profils sur 6% de la longueur.

Les profils les plus couramment utilisés (PS2 à PS5, pour 92% de la longueur) comportent un pré soutènement par voûte parapluie (L=18m, inclinés à 6°, tous les 9 m) ou par boudon divergents (L=18m, inclinés à 14°, renouvelés tous les 4,5 ou 9 m). Un pré confinement du front est réalisé par des boulons de fibre de verre de 18mm subhorizontaux. Le soutènement est réalisé par des cintres HEB tous les 1,5m et du béton projeté. La plupart du temps, il est prévu un contre radier.

On peut aussi s'intéresser au profil prévu pour la zone marchand (PS8, 2% de la longueur). Celui ci se compose d'un pré soutènement par voûte parapluie (L=18m, inclinés à 6° renouvelés tous les 9m), d'un pré confinement par colonnes de jet grouting subhorizontales (longueur variable, diamètre 80cm) dans le front et sous le radier.

Le pilotage du soutènement se fait au moyen de courbes de déformations (mesurées et prévisionnelles). La comparaison avec les courbes théoriques définies par les seuils du marché permet d'adapter les profils.

Un travail important de traitements des terrains est nécessaire.

Ainsi on procède à l'injection d'une couronne de terrain autour du tunnel. Au niveau de l'attaque Ouest, ces injections sont réalisées depuis la surface et permettent l'étanchement des colluvions.

Les manifestations régionales

Ces injections sont aussi nécessaires pour l'étanchement des calcaires du Muschelkalk et des brèches là aussi depuis la surface.

Le chantier utilise aussi du jet grouting depuis la surface pour la stabilité du bouchon du Puits Marchand, ainsi que le renforcement des zones molles du rameau 6.

7 - Suivi des ouvrages existants

L'ouvrage se situe dans une zone urbaine, très densément construite. La construction de l'ouvrage ne doit pas entraîner de dommages trop importants au bâti.

Pour vérifier le bon déroulement du chantier vis à vis de cette problématique un programme d'osculation a été mis en place. Il a pour but d'assurer la surveillance du bâti et de permettre d'adapter le soutènement en fonction des prévisions en avant du front de taille.

Pour cela, une étude prévisionnelle a permis de décomposer le tracé en secteurs en fonction des tassements admissibles en surface, et de définir pour chacun trois niveaux de seuil de tassement :

- vigilance (tassement de 22mm et 44mm pour 1,2/1000 à 1,5/1000 de tassement relatif selon les secteurs)
- anomalie (26-55mm, soit 1,5/1000-1,8/1000)
- alerte (29-66mm, soit 1,8/1000-2/1000)

Pour permettre le suivi, l'entreprise Soldata a mis en œuvre une base de données accessible à tout moment par Internet. Celle ci permet de compiler toutes les informations obtenues. Ainsi la base de données et mise à jour toutes les trois heures pour les données recueillies automatiquement, toutes les 24 heures sinon.

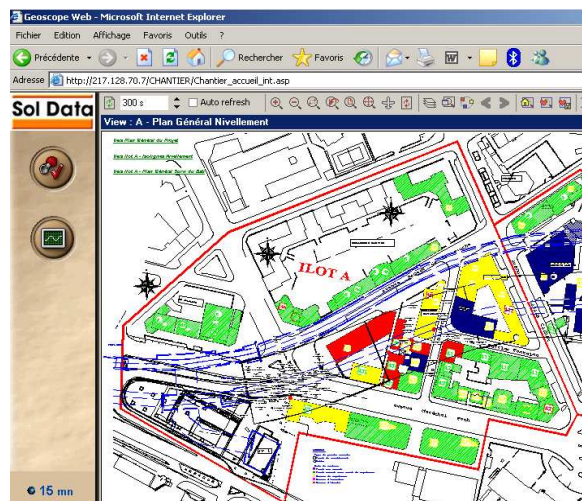


Figure 6: Explorateur Géoscope

Un explorateur *Géoscope* permet de naviguer à travers les 13 ilots et de retrouver toutes les informations le long du tracé.

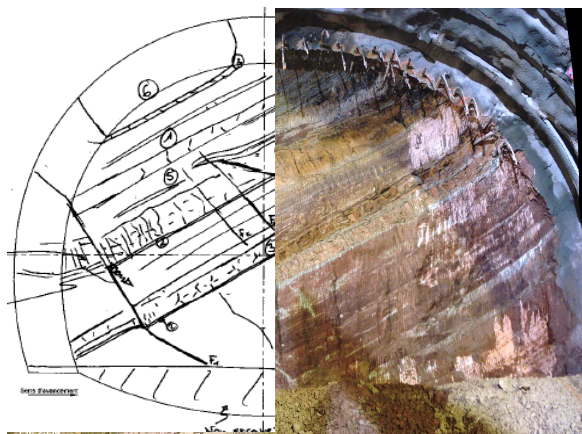


Figure 7: Profil géologique de l'attaque Est

Le suivi du bâti se fait au moyen d'un matériel performant est nécessaire. Le système le plus courant est un théodolite automatique d'un rayon d'action de 50m permettant de un suivi automatisé du bâti (précision de l'ordre du 10^e de mm, relevé toutes les 2h). A cela s'ajoute bien sur des mesures par jauges piezo et extensiométrique, clinomètre, fissuromètre...

Le suivi de la surface de nivellement (route, voirie...) est réalisé tout les 9m lui aussi par des théodolites automatiques.

Cette base de données permet d'éditer des courbes de tassements, de cartographier l'avancement des cuvettes de tassement ou de suivre l'évolution du rabattement de nappe.

Cette base de données permet aussi d'obtenir par semaine les mesures de convergence et d'extrusion du front.

Ce système de suivi permet d'adapter au mieux la réalisation de l'ouvrage à son environnement : chaque paramètre important pour la réalisation de l'ouvrage est en effet suivi constamment, accessible aisément ce qui facilite les prévisions.

Cela permet de se prémunir de tout accident ou incident important.

8 - Visites de chantiers

L'après midi a été consacrée a une visite du chantier, pour permettre à chacun de mieux mesurer les différents aspects présentés en conférence le matin. La visite a permis de voir l'attaque Est ainsi que la tranchée couverte d'accès. En voici quelques photographies.



Figure 8 : Tour d'accès à l'attaque Est



Figure 9 : Cintre de soutènement



Figure 10

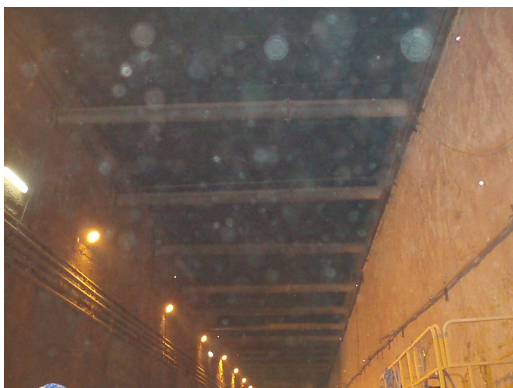


Figure 11 : Butonnement des parois moulées

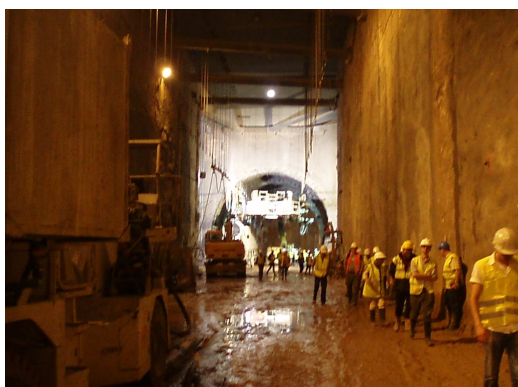


Figure 12 : Vue de la tranchée couverte Est



Figure 13 : Equipements d'attaques du front



Figure 14 : Front de taille de l'attaque Est. On peut observer les rails servant à la machine utilisé pour l'attaque du front

9 - Conclusion

A travers de très intéressantes conférences, et grâce à la visite du chantier cette journée aura permis à tous de découvrir cette belle réalisation qu'est la traversée souterraine de Toulon. Cela aura permis aux différents acteurs de cet ouvrage de présenter les différents aspects de la conception à la réalisation de ce projet que ce soit à travers les question-réponses lors des conférences du matin, que lors des échanges aussi riches que conviviaux lors du déjeuner ou de la visite.

Compte-rendu rédigé par Clément Gastaud,
élève-ingénieur de 3ème année à l'ENTPE de Lyon