

# CONCOURS JEUNES DE L'AFGC

Titre : Innovation : Utilisation des voussoirs fibrés dans les tunnels urbains creusés au TBM

Mariano FERRARI

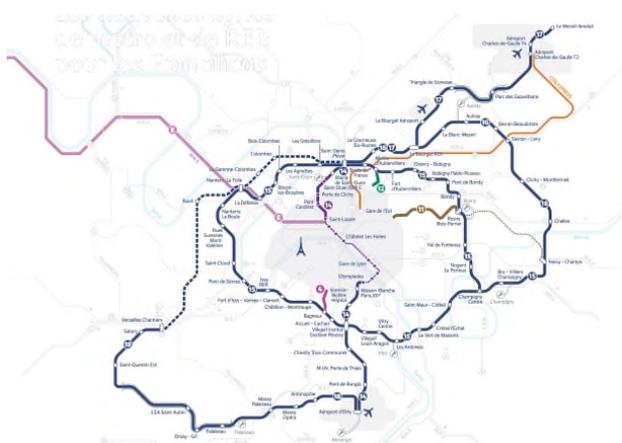
EGIS Rail : Ingénieur confirmé Direction Technique – Service Génie Civil et Ouvrages Souterrains  
Responsable de Marché adjoint Lot 1 Ligne 16 : Responsable secteur tunnels.

Courriel : [mariano.ferrari@egis.fr](mailto:mariano.ferrari@egis.fr)

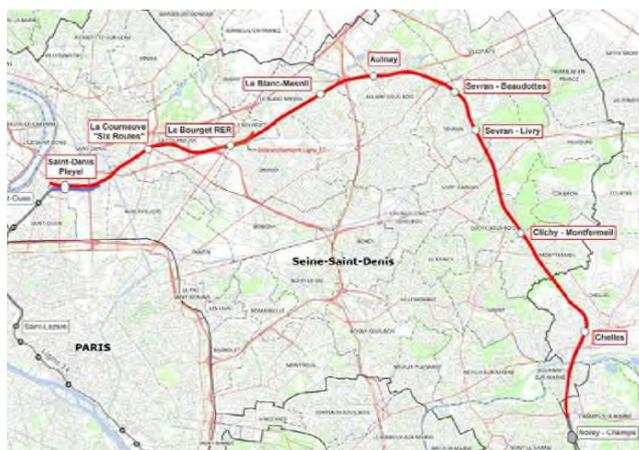
## Introduction avec présentation des objectifs et du contexte

Depuis 2018 j'ai intégré l'équipe EGIS/ Tractebel qui assure la maîtrise d'œuvre infrastructure de la Ligne 16 du Grand Paris Express qui s'étend sur 28 km de la gare Saint-Denis Pleyel à la gare Noisy-Champs. Plus précisément, je suis responsable de Marché adjoint sur la partie tunnel du Lot 1.

Cette nouvelle ligne de métro s'inscrit dans le plus grand projet urbain d'Europe : Le Grand Paris Express, 200 kilomètres de lignes automatiques et 68 gares.



**FIGURE 1 TRACE DU GRAND PARIS EXPRESS**  
**([WWW.GOUVERNEMENT.FR](http://WWW.GOUVERNEMENT.FR))**



**FIGURE 2 VUE EN PLAN DE LA LIGNE 16**  
**(LE MONITEUR)**

Compte tenu de son ampleur, la Ligne 16 a été choisie par la Société du Grand Paris pour étudier et mettre en œuvre une innovation majeure dans les travaux souterrains en France : l'utilisation du béton fibré pour les voussoirs définitifs des tunnels.

Au sein de la Maîtrise d'œuvre, une équipe composée de deux ingénieurs calculs, un ingénieur matériaux, un directeur technique, un expert international et moi-même a été formée afin d'intégrer et de déployer cette innovation sur le marché Lot 1 Génie Civil de la Ligne 16 attribué à la société EIFFAGE :

J'ai été chargé du pilotage de cette équipe ainsi que de l'interface avec le titulaire du Marché du Lot 1 (EIFFAGE), la Maîtrise d'Ouvrage (Société du Grand Paris) et les experts externes au projet qui nous ont aidé à étudier ce projet d'innovation :

- le CETU et l'université Gustave Eiffel avec qui j'ai pu avoir plusieurs réunions de travail, qui nous ont challengé sur les différentes phases du projet d'innovation et sont intervenus à la demande de la Maîtrise d'ouvrage ,

- le professeur Meda de l'université de Rome « Tor Vergata » et le CERIB sont intervenus à la demande de EIFFAGE

Dans les prochaines lignes, je développerai les méthodes utilisées pour valider la faisabilité de cette innovation et le processus d'amélioration continue mis en place depuis la pose du premier voussoir fibré en tunnel.

### **Mon rôle dans le projet :**

Depuis 10 ans, je fais partie de la direction technique d'Egis Rail avec une spécialisation dans les projets souterrains.

Après plusieurs expériences en phase DET (Direction de l'Exécution des contrats de Travaux) sur des projets de tunnel au tunnelier et stations souterraines (Tramway de Nice, Tramway Vélizy-Villacoublay, Métro B de Lyon), j'ai intégré l'équipe de Maitrise d'œuvre de la ligne 16 pour assurer le rôle de responsable de Marché adjoint et de responsable de l'équipe tunnel du Lot 1 : 19 km de tunnel creusé à l'aide de 6 TBM EBP.

Ce projet me permet de mettre en œuvre et développer deux axes de compétences distincts : le management et l'excellence technique.

L'équipe tunnel de la maîtrise d'œuvre dont j'assure le management est constituée par une dizaine de personnes salariées de deux entreprises différentes : EGIS et Tractebel. Nous effectuons les missions de la phase DET : suivi de chantier, suivi administratif et contractuel, échanges techniques avec le titulaire du Marché GC, reporting à la Maitrise d'ouvrage...

Passionné depuis le début de mes études d'ingénierie par la technicité des grands projets d'infrastructure, le lot 1 de la ligne 16 du GPE me permet de m'épanouir grâce aux challenges quasi quotidiens à relever pour assurer notre mission de maîtrise d'œuvre sur un projet qui compte presque 20 km de tunnel à creuser en simultanée à l'aide de six TBM.

### **Présentation des hypothèses et méthodes de travail**

La ligne 16 du Grand Paris Express a été divisée en trois lots de génie civil différents qui ont été notifiés à des périodes différentes :

- Lot 1 :
  - Notification : Février 2018 EIFFAGE GC
  - Longueur tunnel : 19 km
  - 6 TBM EPB
  - 4 stations
  - Montant Marché : 1,84 Md €
- Lot 2 :
  - Notification : Octobre 2018 Webuild S.p.A
  - Longueur tunnel : 11 km
  - 2 TBM EPB
  - 4 stations
  - Montant Marché : 720 M €
- Lot 3 :
  - Notification : Février 2021 Fayat
  - Longueur tunnel : 5,5 km
  - 1 TBM EPB

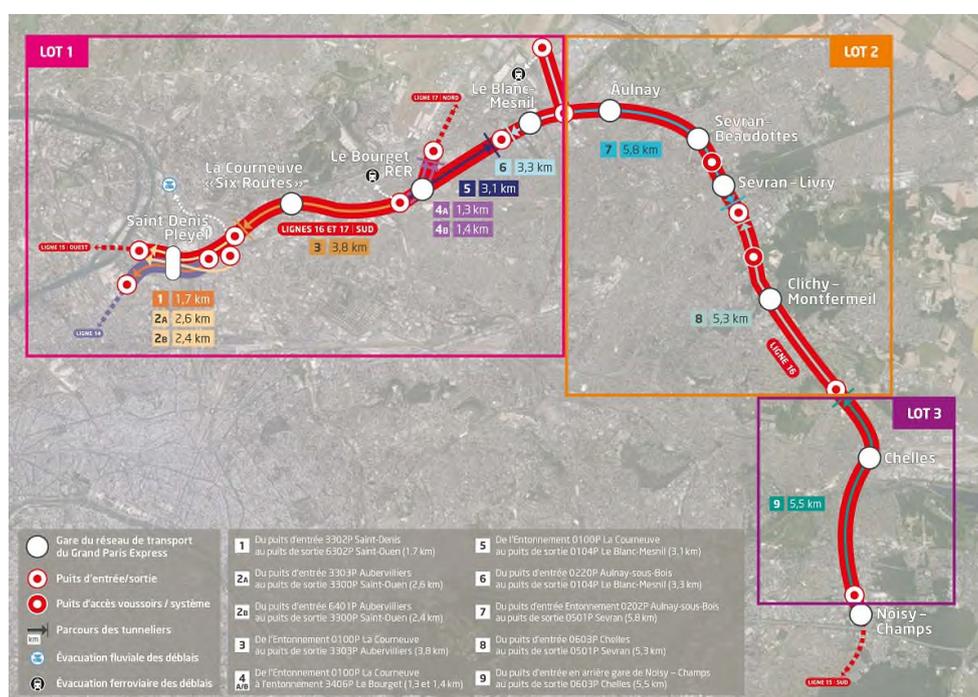
- 1 station
- Montant Marché : 325 M €

La décision d'étudier la possibilité de mettre en œuvre pour la première fois en France des voussoirs fibrés dans les tunnels définitifs de la Ligne 16 a été prise par la Société du Grand Paris après signature du Marché du Lot 1 et avant notification des Marchés des Lots 2 et 3.

La Société du Grand Paris a donc demandé au Maître d'œuvre et au titulaire du Lot 1 de mener une étude commune sur cette portion du projet.

Ce processus d'innovation a été réalisé en 4 phases principales :

1. Mise en place d'un référentiel commun ;
2. Etudes et test de convenance ;
3. Mise en place des anneaux en béton fibrés ;
4. Amélioration continue.



**FIGURE 3 LOTS GC LIGNE 16:**  
([HTTPS://WWW.SOCIETEDUGRANDPARIS.FR](https://www.societedugrandparis.fr))

## La présentation des résultats et de l'avancement du projet

Dans cet article, je présenterai ma contribution dans les différentes phases du projet qui nous ont permis de mettre en place des voussoirs fibrés sans cependant donner les détails techniques car ceux-ci seront présentés pour la première fois lors de la conférence de l'AFTES 2021.

Cette étude a constitué ma première expérience concrète d'utilisation du béton fibré. Lors d'un chantier réalisé en 2012, le titulaire du Marché de GC avait proposé d'étudier la mise en place des voussoirs fibrés sur un tronçon limité du tunnel définitif. Cette opportunité avait été écartée par la Maîtrise d'ouvrage compte tenu des risques associés et le manque de retour d'expérience.

Depuis, plusieurs projets en France ont mis en place des voussoirs fibrés dans des portions de tunnel non définitif ou non exploité : dans une station traversée par le TBM avant le terrassement (Ligne 2 Tram Nice), dans un débranchement (Ligne 14 RATP).

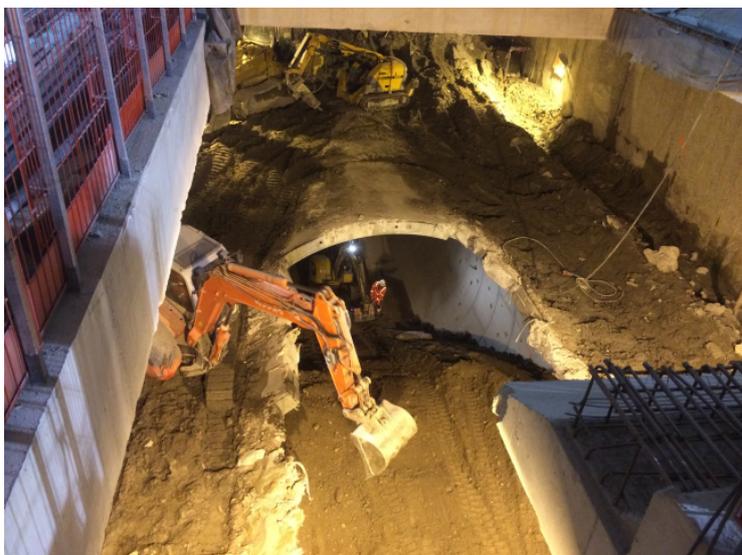


FIGURE 4 : EXEMPLE VOUSOIRS NON DEFINITIFS LIGNE 2 TRAM NICE  
(EGIS)

La mission qui m'a été confiée par Egis est donc de suivre ce projet de la phase conception jusqu'à la phase de mise à disposition à l'exploitant.

La première étape a donc été la mise en place d'un référentiel commun à respecter.

Nous avons donc mené une étude bibliographique qui nous a permis de nous accorder sur l'utilisation des documents suivants : Model code 2010, le fib83 et la recommandation AFTES GT38R1F1.

Pour la deuxième étape qui consistait à étudier la faisabilité de cette innovation, je me suis occupé du pilotage des actions suivantes:

- mise en place et suivi du planning de réalisation des études,
- animation des réunions d'avancement,
- suivi contractuel,
- pilotage de l'équipe MOE
- résolution des problèmes rencontrés.

Il s'agissait de définir les sollicitations dimensionnantes et d'identifier les zones d'exclusion de ce type de revêtement en vérifiant la résistance des voussoirs fibré en fonction des contraintes.

A cause des sollicitations, certains tronçons du tunnel n'ont donc pas fait l'objet de la mise en œuvre des voussoirs fibrés :

- un tronçon du tunnel d'environ 500 m à cause de la faible couverture
- les interfaces avec rameaux de ventilation ou de secours
- un faible linéaire de tunnel au droit des entrée et sortie des ouvrages.

Compte tenu des contraintes planning pour lancer le prototype nous n'avons pas pu mener ces études approfondies dans les zones listées ci avant. Cette première expérience sur le Lot 1 de la Ligne 16 n'exclue donc pas que pour des prochains projets ces zones pourront être étudiées dans le détail afin d'envisager d'avoir la totalité du tunnel réalisée en voussoirs fibrés.

Je me suis appuyé sur les compétences pointues de mes collègues spécialisés dans ce matériau « peu connu dans le monde des tunnels au tunnelier » et sur le professionnalisme du personnel EIFFAGE qui a suivi cette étude.

Compte tenu de son expérience sur les voussoirs fibrés utilisés sur des projets à l'international, EIFFAGE a demandé au Professeur Meda de l'université de Rome « Tor Vergata » de collaborer au développement de cette expérience.

Une fois la formule de béton validée et les tests de convenance effectués, des voussoirs grandeur nature ont été réalisés et envoyés à Rome pour être testés à l'université de « Tor Vergata » afin de vérifier les conditions de charges critiques :

- Simuler l'effort des vérins de poussé du TBM : essai de charge ponctuelle
- Résistance du voussoir sous l'action du moment fléchissant critique : essai de flexion

Puis, un test de résistance au feu a été effectué au CERIB.

Ces tests ont permis de constater des anomalies dans le processus de fabrication des voussoirs qui ont été par la suite résolues par le fournisseur des voussoirs (Bonna Sabla) et EIFFAGE.



**FIGURE 5 VOUSOIRS FIBRE APRES ESSAI AU FEU**  
*(EGIS)*



**FIGURE 6 ESSAI DE CHARGE VERINS DE POUSSE TBM ET ESSAI DE FLEXION**  
*(RAPPORT UNISEVITE DE ROME TOR VERGATA)*

Les résultats de ces essais nous ont permis d'achever la phase de conception des voussoirs. Cette deuxième étape du processus d'innovation qui a duré environ 15 mois nous a permis de démarrer la fabrication des voussoirs fibrés qui sont utilisés comme revêtement définitif du tunnel de la ligne 16.

Afin de discerner des éventuels problème de rodage, en plus du plan de contrôle du titulaire basé sur les recommandations AFTES, j'ai pu définir en coopération avec notre direction technique, un programme de contrôle renforcé lors des premiers mois de fabrication de voussoirs.

Les premiers voussoirs fibrés ont été mis en œuvre à partir du 09/07/2020. Le creusement du tunnel a été arrêté le 10/07/2020 suite à l'apparition de plusieurs fissures en partie basse du tunnel.

S'agissant d'un processus d'innovation, il a été décidé d'arrêter la poursuite du test sans cependant arrêter le creusement du tunnel pour ne pas pénaliser le planning du projet. Le creusement du tunnel

s'est donc poursuivi en mettant en œuvre des voussoirs en béton armé le temps de trouver les causes de la fissuration des voussoirs fibrés.

J'ai eu en charge la gestion de cette problématique avec les différents acteurs, dont EIFFAGE et son fournisseur de voussoirs, afin d'identifier les causes possibles du problème et les solutions pour y remédier.

Les visites sur site nous ont permis de constater qu'il s'agissait de plusieurs microfissures et de deux fissures plus importantes (1.5mm et 3mm).



FIGURE 7 FISSURATION VOUSOIRS LOT 1 LIGNE 16 TBM6  
(EGIS)

Nous avons donc listé les causes qui pouvaient générer ces fissures et j'ai demandé au titulaire du marché GC de nous proposer sa vision à travers la méthode de l'arbre des causes.

En parallèle, avec mon équipe nous avons produit notre vision de l'arbre des causes en écartant celles qui, grâce à des justifications techniques, pouvaient à notre avis être supprimées. Par exemple, une cause de fissuration possibles est le dépassement de la poussée maximale sur les voussoirs lors du creusement. Grâce au suivi des paramètres TBM, nous avons pu constater que la poussée réellement exercée était inférieure à la poussée limite. Cette cause éventuelle a donc pu être écartée.

Une comparaison entre notre arbre des causes et celui produit par le titulaire a été menée. Des actions correctives ont ensuite été mise en œuvre pour supprimer les causes identifiées. Un article qui traitera ce sujet est en cours de finalisation et sera publié dans le cadre du World Tunnel Congress qui aura lieu à Copenhague en 2022.

Cette analyse a été ensuite présentée à la Maitrise d'ouvrage et à ses experts afin de partager nos premières conclusions. Suite à ces échanges, il a donc été décidé de reprendre la mise en place des voussoirs fibrés sur la totalité des TBM et d'effectuer un suivi accru des éventuelles fissures lors des premiers anneaux posés.

A ce jour, les six TBM du Lot 1 de la ligne 16 ont creusé un linéaire cumulé d'environ 7 km. Aucune fissure dépassant les seuils préfixés n'a été observée depuis le redémarrage.

Une étude comparative menée par EIFFAGE a montré que sur ces 7 km, le pourcentage de microfissures constaté sur le revêtement en béton fibré est équivalent à celui observé sur les voussoirs classiques en béton armé. Ce ratio (environ à 2%) est tout à fait comparable avec d'autres tunnels réalisés en béton armé. Cette étude statistique est plutôt rassurante mais nous poursuivons, dans le cadre de l'amélioration continue, la recherche d'autres causes qui peuvent impacter la fissuration :

- Impact des virages serrés,
- Erreurs humaines,
- ...

## **Perspectives et applications**

Les voussoirs fibrés seront utilisés sur les autres lots de la ligne 16 mais également sur d'autres projets en France. Ce type de revêtement permettra aux prochains projets de profiter des économies directes sur le revêtement mais également d'envisager une optimisation de l'épaisseur de celui-ci. Cette réduction d'épaisseur permettrait d'optimiser le diamètre excavé ce qui a un impact direct sur les volumes de terres excavés et la quantité de béton, réduisant ainsi les coûts mais aussi l'empreinte environnementale des travaux.

Ce projet a été pour moi une belle expérience de travail d'équipe entre plusieurs entreprises différentes mais surtout avec plusieurs ingénieurs passionnés par le même métier et poussés par l'envie de faire évoluer notre profession. Cela correspond bien à l'image que j'avais de l'ingénieur avant d'entreprendre mon parcours d'études qui m'a amené au bout d'une dizaine d'année de travail à participer à une belle innovation qui était attendue depuis plusieurs années par toute notre profession !