



Journées techniques GC'2017 (3^e partie)
Le Génie Civil et l'Aménagement des Grandes Métropoles

TUNNEL DE PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14 DE LA RATP SUIVI DU COMPORTEMENT DE VOUSSOIRS PRÉFABRIQUÉS EN BÉTON DE FIBRES MÉTALLIQUES PAR UN RÉSEAU D'EXTENSOMÈTRES À FIBRE OPTIQUE

EXTENSION TUNNEL OF PARIS-METRO LINE 14 FUNCTIONNAL BEHAVIOUR ASSESSMENT OF PRECAST METALLIC-FIBERS REINFORCED CONCRETE SEGMENTS USING AN ARRAY OF OPTICAL FIBER EXTENSOMETERS

**Bertrand COLLIN^{(1)*}, Mikhael DE MENGIN⁽¹⁾, Yohann BLANCO⁽¹⁾, Pierre BROUILLAC⁽¹⁾,
Florence DUCHÊNE⁽²⁾, Samir RENAI⁽²⁾, Laurent DABET⁽²⁾**

⁽¹⁾ SITES SAS

⁽²⁾ Bouygues Travaux Publics

* Correspondant : Bertrand Collin, SITES, 95-97 avenue Victor Hugo, 92500 Rueil-Malmaison -
bertrand.collin@sites.fr

1. CONTEXTE ET OBJET DU PROJET

Dans le cadre des travaux de prolongement de la ligne 14 au nord de Paris (lot T02), Bouygues Travaux Publics construit actuellement un tunnel d'une longueur totale de 2.2 kilomètres

comportant trois sections. Dans certaines sections de ce tunnel, il était prévu d'implanter, à titre provisoire, des voussoirs préfabriqués en béton renforcé de fibres métalliques (BRFM). Pour appréhender, en situation, le comportement mécanique réel de ces voussoirs innovants et envisager, à terme, une



implantation définitive, un programme d'instrumentation spécifique a été conçu, testé, validé puis mis en œuvre sur plusieurs d'entre eux, au niveau du tronçon provisoire de la station Mairie de Saint Ouen.

Une fois identifiés les paramètres à mesurer, le nombre et l'implantation des points de mesures tout en intégrant les particularités du matériau BRFM, nous avons recherché et choisi un type de capteur adapté aux caractéristiques du béton renforcé de fibres métalliques, au process de préfabrication des voussoirs et aux conditions d'exploitation de la future infrastructure ferroviaire. Notre choix s'est porté sur des capteurs à fibre optique à réseau de Bragg qui présentent, pour ce projet, plusieurs avantages : mesure très précise des déformations et des températures, câblage et connectique peu intrusifs, insensibilité aux pertes en ligne de signal et aux perturbations électromagnétiques, possibilité de mesures déportées sans amplification du signal.

Dans un deuxième temps, nous avons mis au point un dispositif spécifique destiné à implanter précisément, avant coulage, les capteurs dans les voussoirs préfabriqués en BRFM, sans ajouter d'armatures support ni perturber le process et la cadence de leur fabrication. Une fois construits et instrumentés, les voussoirs ont été transportés puis implantés dans le tronçon provisoire du tunnel.

Le comportement mécanique des voussoirs sous des contraintes excédant les états limites de service a été évalué dans plusieurs cas de figure, au moyen de sollicitations contrôlées exercées par le tunnelier.

Les campagnes de mesures ont permis d'enregistrer un grand nombre de données. L'analyse et l'exploitation de ces données a permis d'appréhender finement le comportement réel de ces voussoirs innovants et d'améliorer les modèles numériques afférents.

Nous nous focalisons dans cet article sur les aspects du projet liés à l'ingénierie du suivi par instrumentation de structures innovantes, les résultats et l'analyse des mesures devant faire l'objet d'une publication distincte.

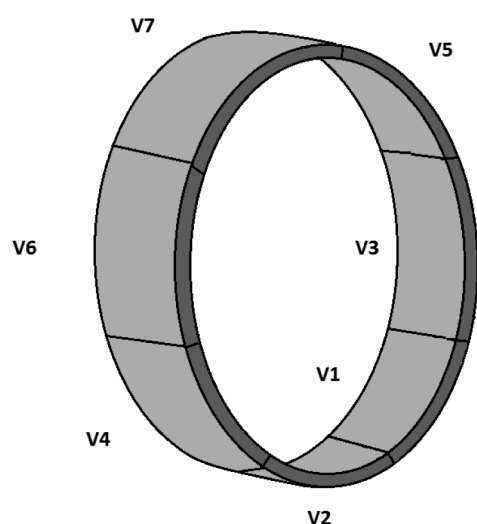


Figure 1 : Anneau complet constitué de sept voussoirs.

V7 : voussoir de clé
V5 et V6 : voussoirs de contre-clé
V3 et V4 : voussoirs de contre-voute

2. OBJECTIFS ET CONTRAINTES

Afin d'évaluer de façon représentative le comportement en service des voussoirs en BRFM préfabriqués à l'usine Capremib Bonna Sabla de Conflans-Sainte-Honorine (Yvelines), il a été décidé de réaliser des mesures de déformation sur neuf voussoirs répartis sur trois anneaux complets : trois voussoirs de clé (V7), trois voussoirs de contre-clé (V5 ou V6) et trois voussoirs de contre-voute (V3 ou V4). Une représentation schématique d'un anneau complet est présentée sur la figure 1.

Cette instrumentation se devait d'être la moins intrusive possible afin de ne pas créer des artefacts comportementaux pour le matériau ; de plus, l'installation des capteurs avant le coulage du béton fibré ne devait pas impacter le process de préfabrication. Enfin, sur site, la collecte des mesures devait pouvoir se faire à distance des voussoirs instrumentés et ce, sans perturber l'avancée du tunnelier.

3. PRINCIPE ET CARACTÉRISTIQUES DE L'INSTRUMENTATION CHOISIE

Pour répondre aux objectifs et aux contraintes du projet, nous avons choisi, après étude, un système d'instrumentation à base de capteurs à fibre optique à réseau de Bragg.

Il existe actuellement plusieurs types de capteurs à fibre optique basés sur des principes physiques différents avec, en conséquence, une diversité en termes de paramètres mesurables, de précisions et de domaines d'application. On peut citer :

- les capteurs base longue, fonctionnant en interférométrie Michelson, utilisés pour des mesures de déformation et d'allongement,
- les capteurs pour mesures de déformation ou de température continûment distribuées sur des très grands linéaires, fonctionnant en rétrodiffusion Raman, Brillouin ou Rayleigh,
- les capteurs à réseaux de Bragg qui permettent de réaliser des mesures quasi-distribuées de déformation, de température, d'inclinaison, de pression ou d'allongement.

3.1. Rappel du principe de fonctionnement des capteurs à fibre optique à réseau de Bragg

Le capteur Bragg, pour « capteur à fibre optique à réseau de Bragg », est utilisable pour différents types de mesures : déformation, température, accélération et pression.

Un réseau de Bragg est un réflecteur sélectif inscrit localement dans la fibre optique. Lorsqu'un spectre lumineux est injecté dans une fibre optique équipée d'un réseau de Bragg, le spectre est transmis sur toute la longueur de la fibre, à l'exception de la longueur d'onde de Bragg λ_B , qui elle est réfléchie.

Quand plusieurs réseaux de Bragg sont implantés et répartis sur une même fibre optique, chaque réseau réfléchit alors la longueur d'onde qui lui propre.

Pour les capteurs de déformation, la longueur d'onde réfléchie varie en fonction de la contrainte appliquée localement sur le réseau de Bragg inscrit dans la fibre.

La figure 2 illustre le principe de réflexion sélective des capteurs à réseaux de Bragg.

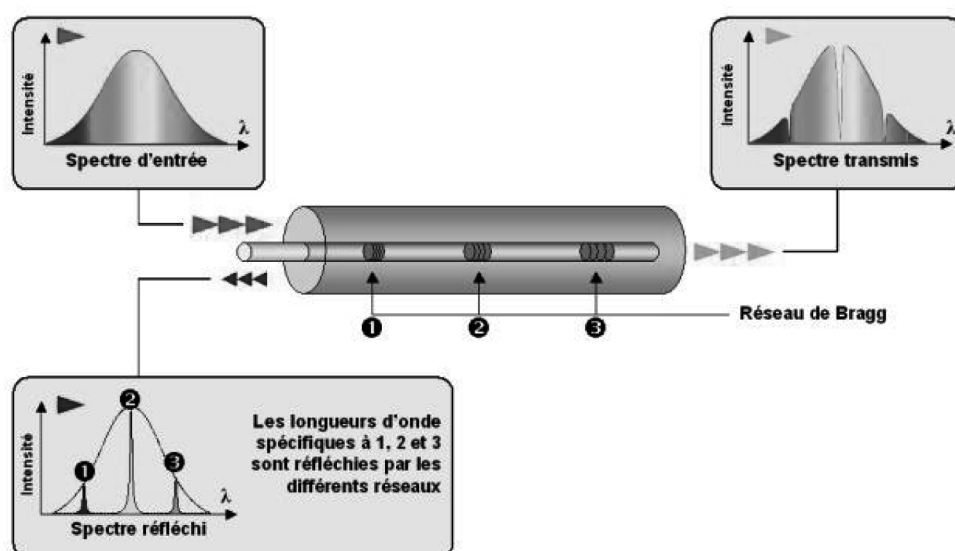


Figure 2 : Capteur à fibre optique à réseau de Bragg : réflexion sélective en longueur d'onde (source SCAIME).



Figure 3 : Type de capteur à fibre optique à réseau de Bragg.

3.2. Caractéristiques principales des capteurs Bragg utilisés

Pour ce projet, les capteurs Bragg choisis (voir figure 3) présentaient l'avantage d'être peu intrusifs et chaînables avec la possibilité de connecter jusqu'à 16 capteurs « en série » sur un seul câble de connexion.

En termes de métrologie, ces capteurs possèdent une excellente stabilité et durabilité dans le temps, des temps de réponse quasi-instantanés, une étendue de mesure de $\pm 2500 \mu\text{m/m}$ avec une résolution de $1 \mu\text{m/m}$ pour les mesures de déformations relatives et de $0,1^\circ\text{C}$ pour les mesures de température.

4. INSTALLATION DES CAPTEURS BRAGG DANS LES VOUSOIRS PRÉFABRIQUÉS EN BÉTON FIBRÉ

4.1. Conception du système d'instrumentation, contrôle et tests préalables des chaînes de mesures

Afin de limiter les risques de dégradation des capteurs lors de leur mise en place dans les coffrages des voussoirs, puis, lors du coulage du béton de fibres métalliques et, enfin, pendant le

transport et l'installation des voussoirs dans le tunnel, une attention toute particulière se devait d'être portée à l'état initial du matériel (capteurs, boîtiers, câbles de connexion et interrogateur). De plus, comme les coffrages des voussoirs n'étaient pas modifiables et que nous n'avions pas, une fois le béton coulé, la possibilité d'accéder aux capteurs, il était essentiel d'anticiper toutes les problématiques en amont des phases irréversibles en termes de réalisation.

Dans un premier temps, il a été procédé à une série de tests dans des conditions maîtrisées pour s'assurer du bon fonctionnement de chaque élément de la chaîne de mesure. Nous avons aussi fabriqué une éprouvette en béton afin de valider la faisabilité de la solution retenue pour l'implantation des capteurs et de la chaîne de mesure ; en particulier, pour permettre l'accès aux extrémités des chaînes optiques une fois le béton de fibres métalliques coulé, nous avons conçu des boîtiers équipés d'un couvercle permettant l'accès à la fibre optique.

Nous avons ainsi testé individuellement 153 capteurs Bragg, dont 135 destinés aux mesures de déformation et 18 à celles de température, avec des mesures de déformation, de température et d'étanchéité (figure 4). Le fonctionnement des fibres optiques de liaison, des connecteurs optiques, des boîtiers de sortie des fibres (figure 5), de l'interrogateur optique et des chaînes de mesure complètes a également été vérifié.

Nous avons ensuite effectué deux autres séries de tests de fonctionnement pour chacune des chaînes optiques, avant et après le coulage des voussoirs.

Ces tests nous ont également permis de déterminer les valeurs de déformation initiales de chaque capteur, valeurs utilisées ensuite comme références lors des mesures en situation.

4.2. Conception d'un système innovant pour l'implantation des capteurs Bragg dans les voussoirs

Pour instrumenter les structures en béton armé « classiques », les capteurs sont généralement fixés aux armatures passives avant le coulage du béton.





Figure 4 : Test d'étanchéité des capteurs.

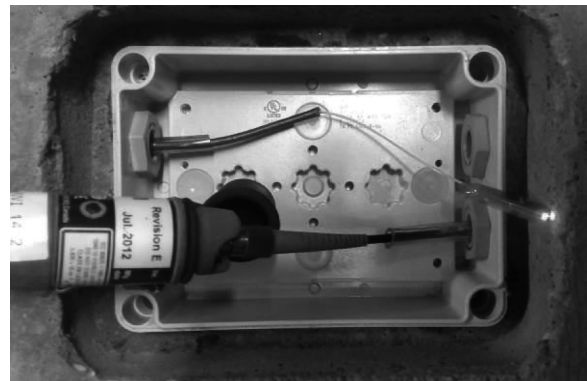


Figure 5 : Test des boîtiers de sortie des fibres.

Pour ce projet, il a été nécessaire de concevoir un système innovant destiné à positionner avec précision les capteurs dans les coffrages avant le coulage du béton de fibres métalliques tout en minimisant plusieurs types de risques :

- perturbation du matériau et des voussoirs par l'instrumentation,
- dégradation des capteurs et des chaînes de mesures lors des phases de coulage, de transport et d'installation par le tunnelier des voussoirs dans le tunnel,
- ralentissement des cadences de production des voussoirs.

Une fois choisi le principe d'instrumentation des voussoirs (figure 6), SITES, Bouygues Travaux Publics et Bonna Sabla ont ensemble conçu et fabriqué un coffrage comportant trois « couvercles » spéciaux (figures 7 et 8).

Ces couvercles, baptisés « planches fakir », étaient équipés de tiges filetées destinées à implanter les chaînes de capteurs sans altérer la qualité du béton ni dégrader le système d'instrumentation tout en évitant de créer des sollicitations mécaniques

parasites d'une part lors du coulage et d'autre part lors des essais sur site avec le tunnelier.

Pour respecter les cadences de fabrication des voussoirs, potentiellement perturbées par l'installation des chaînes de mesure sur les « planches fakir », la durée d'instrumentation d'une planche fakir ne devait pas excéder 4 heures.

Pour faire face à cette contrainte, nous avons positionné un châssis à proximité de l'aire de coulage des voussoirs afin d'installer préalablement au coulage les chaînes de mesures sur les « planches fakir ». Une fois équipées et, après contrôle des chaînes de mesure, les « planches fakir » étaient transportées par un pont roulant sur le moule des voussoirs.

Cette organisation n'a eu aucun impact sur la cadence de production. Le coulage du béton de fibres métalliques dans les voussoirs équipés de chaînes de mesure a été réalisé en même temps que celui des voussoirs courants (figure 8).

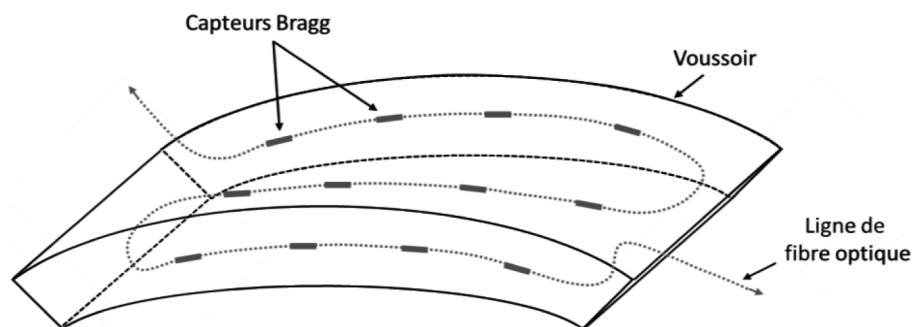
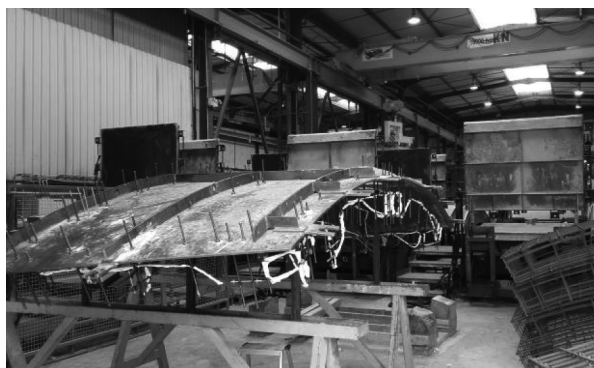


Figure 6 : Principe d'instrumentation d'un voussoir.



Figures 6 et 7 : Implantation des chaînes de mesure dans les « planches fakir ».





Figure 8 : Coulage des voussoirs instrumentés.



Figure 9 : Contrôles et mesures après fabrication.

Après la prise du béton de fibres métalliques, les extrémités des tiges filetées des « planches fakir » ont été sectionnées et meulées, et les couvercles des moules, retirés. Après cette étape, pour s'assurer de l'intégrité des chaînes de mesures, l'équipe de SITES a effectué une série de contrôles et de vérifications sur les 9 voussoirs instrumentés (figure 9). **Ces contrôles et vérifications ont montré que, malgré la fragilité apparente des câbles non gainés, aucun capteur n'avait été endommagé et que toutes les chaînes de mesure fonctionnaient correctement.**

5. IMPLANTATION DES VOUSSOIRS INSTRUMENTÉS DANS LE TUNNEL

Tous les voussoirs, instrumentés ou non, ont été implantés de la même façon dans le tunnel. Pour ne pas ralentir la progression du tunnelier, l'équipe SITES a, une fois installés les anneaux contenant les voussoirs instrumentés, rapidement connecté le système d'acquisition aux chaînes de mesure *via* des câbles multifibres monomodes renforcés (figure 10). La longueur de ces câbles de liaison, 60 m, a été pré-dimensionnée en tenant compte d'une part de la progression du tunnelier et, d'autre part, de la distance entre les voussoirs et la cabine de pilotage du tunnelier. Nous avons installé dans cette cabine le système d'acquisition qui comprenait un interrogateur optique et un ordinateur de contrôle (figure 11).

6. LES MESURES

Afin de ne pas ralentir l'avancement du chantier, deux équipes de SITES se sont relayées pour connecter les anneaux instrumentés au système d'acquisition et effectuer les mesures dont l'acquisition devait se faire en temps réel. Simultanément, le logiciel et l'écran de visualisation installés dans la cabine de pilotage du tunnelier nous ont permis de suivre les mesures. Les deux premiers anneaux comprenaient six voussoirs instrumentés. Les données issues des capteurs ont été enregistrées pendant environ 8 heures, à compter du début de leur pose par le tunnelier.

Pendant ces huit heures qui intégraient la durée nécessaire au tunnelier pour installer quatre anneaux dont un instrumenté, nous avons réalisé deux types de tests destinés à évaluer le comportement des voussoirs vis-à-vis de deux situations susceptibles de se produire en cours de chantier. Il a été évalué :

- L'influence d'une poussée progressivement appliquée jusqu'à la fissuration des voussoirs, au moyen de sollicitations contrôlées *via* les vérins hydrauliques du tunnelier (phase A de la figure 12) ;
- L'influence cumulée d'un défaut de pose et d'une poussée dissymétrique (phase B de la figure 12).

Après avoir réalisé ces essais sur les deux premiers anneaux instrumentés, la durée du suivi du comportement du troisième anneau a pu être limitée à 4 heures et demi.

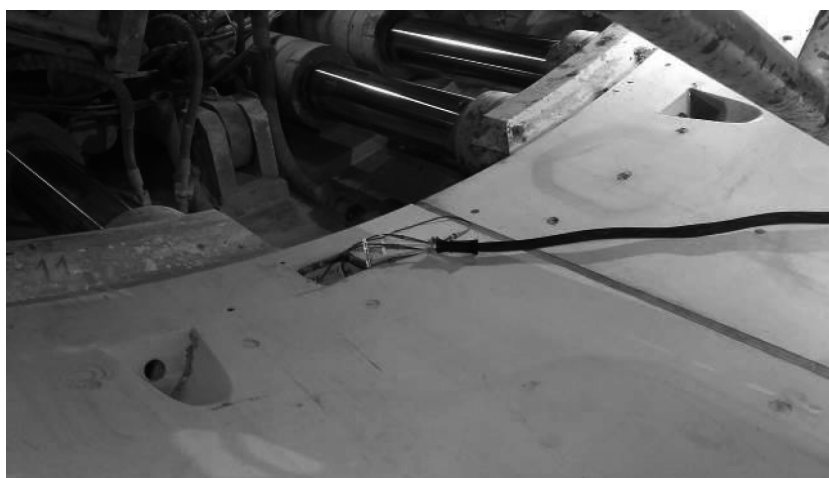


Figure 10 : Extrémité d'un voussoir installé dans le tunnelier : connexion du boîtier aux câbles multifibres.



Figure 11 : Cabine de pilotage du tunnelier - Système d'acquisition et câblage optique.

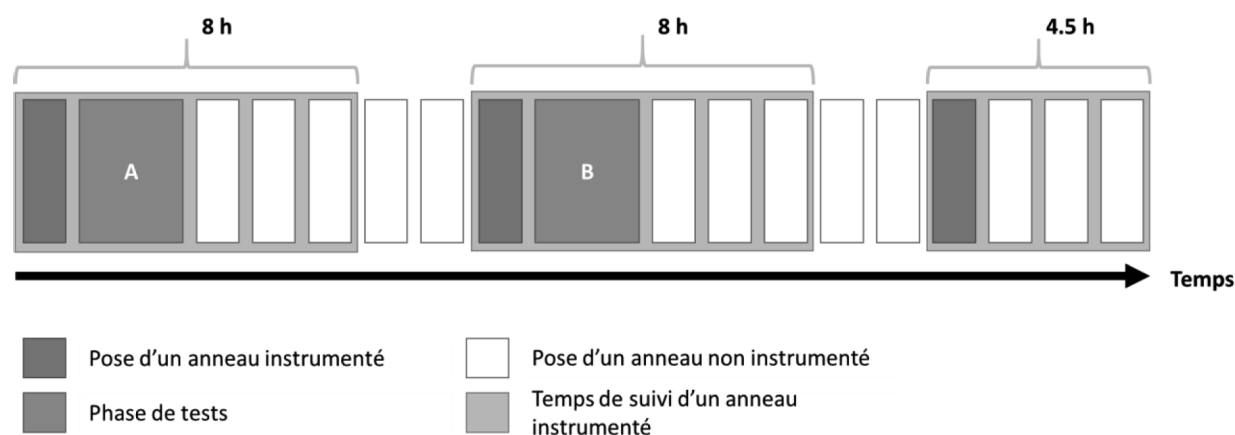


Figure 12 : Cinématique des tests en lien avec la pose des anneaux par le tunnelier.

Suite à l'arrachement, lors de l'avancement du tunnelier, d'un câble optique de liaison avec, pour conséquence la perte de la chaîne de mesures associée, nous avons dû améliorer et ajuster le système de fixation de ces câbles au fur et à mesure de l'avancement.

Grâce à ces précautions, 17 des 18 chaînes de mesures sont restées intactes pendant toute la durée des essais, nous permettant ainsi de collecter et d'enregistrer la quasi-totalité des mesures initialement prévues. La figure 13 présente l'écran de contrôle des mesures.

7. CONCLUSION

Dans le cadre du projet de prolongation au nord-ouest de Paris de la ligne M14, Bouygues Travaux Publics devait justifier, pour la construction de la section en tunnel, l'utilisation d'anneaux constitués de voussoirs innovants. Ces voussoirs innovants, produits par Bonna Sabla dans son usine de préfabrication de

Conflans-Sainte Honorine dans les Yvelines, présentent la particularité d'être constitués de béton renforcé de fibres métalliques (BRFM).

Nous devons donc démontrer que le comportement mécanique de ces voussoirs répondait aux exigences et aux spécifications du marché en termes de conditions de mise en œuvre par le tunnelier, de fonctionnement mécanique et de durabilité. Pour ce faire, SITES, Bouygues Travaux Publics et Bonna Sabla ont, en complète synergie, conçu, testé et mis en place dans plusieurs voussoirs un système d'instrumentation spécifique ainsi qu'un programme d'épreuves et d'essais sur site. Ce système d'instrumentation et ce programme d'épreuves devaient prendre en compte les difficultés liées au phasage complexe de fabrication et d'implantation des voussoirs intégrant les spécificités du béton renforcé de fibres métalliques, le procédé et les cadences de préfabrication, le transport ainsi que l'installation à l'avancement par le tunnelier. De plus, l'instrumentation et les épreuves de chargement ne devaient en aucun cas perturber le planning de chantier de construction de ce tunnel ferroviaire.



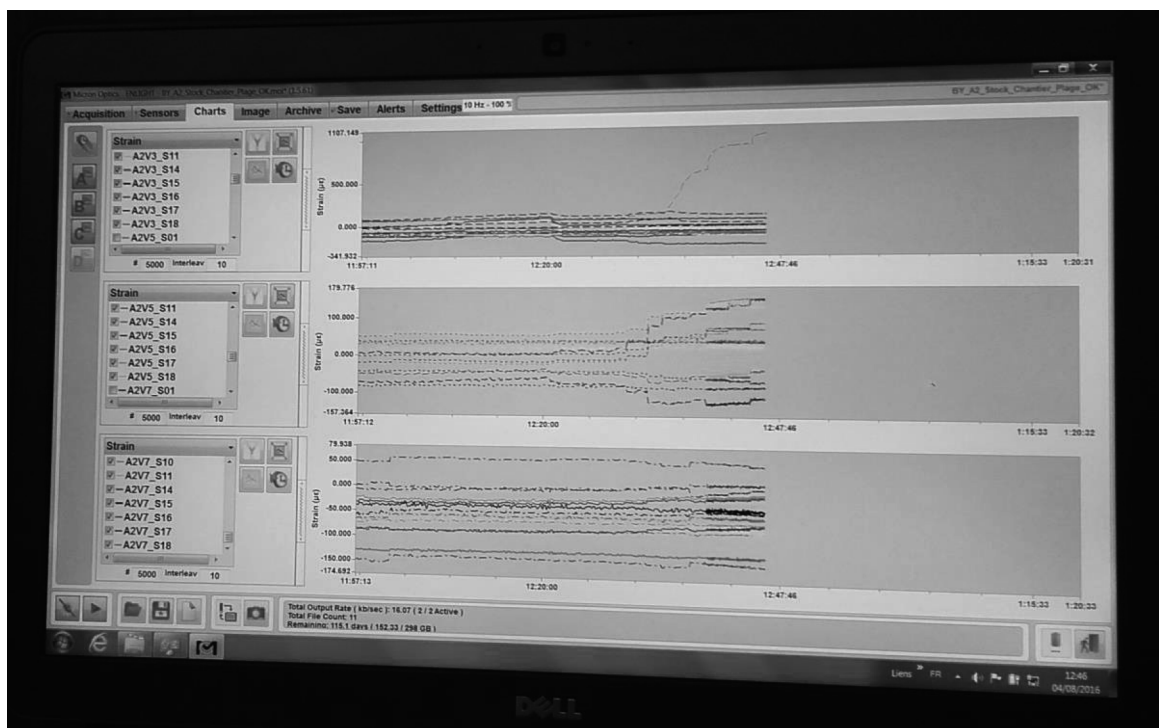


Figure 13 : Visualisation directe des contraintes appliquées aux voussoirs et des mesures.

Pour ce projet, nous avons conçu un système d'instrumentation constitué de chaînes de capteurs à fibre optique de type réseau de Bragg avec, par voussoir, 15 capteurs de déformation et 2 capteurs de température.

Pour implanter précisément les capteurs et les chaînes de mesure dans les voussoirs avant le coulage du béton renforcé de fibres métalliques, nous avons créé un dispositif spécifique appelé « planches fakir » qui a prouvé son efficacité, tant en termes d'adaptation au processus de préfabrication qu'en fiabilité et solidité.

Nous avons ainsi pu réaliser avec succès le programme d'épreuves de ces voussoirs intégré aux anneaux mis en place par le tunnelier, programme destiné à évaluer leur comportement, d'une part sous des sollicitations excédant leur état limite de service et, d'autre part, sous l'effet de défauts de pose et de poussées dissymétriques exercées par le tunnelier. Là encore, l'intégration des voussoirs instrumentés au tunnel et les épreuves de chargement associées n'ont pas, malgré les contraintes de co-activité, perturbé l'avancement du chantier.

Les résultats obtenus ont permis d'évaluer les corrélations entre la pression exercée sur les voussoirs par le tunnelier en progression, les variations d'ouverture des fissures créés par les sollicitations au-delà de l'état limite de service, les contraintes de traction dans le béton renforcé de fibres métalliques et la valeur de la poussée maximale admissible.

Afin de compléter nos connaissances sur l'état et le comportement des voussoirs, les équipes de SITES ont récemment réalisé plusieurs contrôles et mesures complémentaires quelques mois après les opérations décrites dans cet article.

L'analyse des résultats de ces mesures, présentée dans des publications ultérieures, sera intégrée aux modèles de calcul et contribueront à affiner les règles de dimensionnement des voussoirs en béton renforcé de fibres métalliques.

Les mesures géométriques et les inspections réglementaires qui seront effectuées avant la mise en service de la prolongation de la ligne 14 seront également riches d'informations sur les innovations en ingénierie de l'instrumentation et de la construction présentées ici.