

---

# **Instrumentations et Capteurs à Fibres Optiques à réseaux de Bragg dédiés aux besoins du secteur ferroviaire : *du concept aux essais terrain***

**Pierre Ferdinand — Guillaume Laffont — Laurent Maurin —  
Nicolas Roussel — Jonathan Boussoir — Stéphane Rougeault**

[pierre.ferdinand@cea.fr](mailto:pierre.ferdinand@cea.fr)

CEA, LIST

Laboratoire de Mesures Optiques

F-91191 Gif-sur-Yvette, France

---

*RÉSUMÉ. Du fait de la prochaine dérégulation du secteur ferroviaire, la commission européenne a lancé plusieurs initiatives de R&D. En effets, dès lors que toute compagnie pourra faire circuler ses trains dans n'importe quel pays de l'Union, cela suscite des inquiétudes de la part des compagnies historiques. Deux projets, SMITS et CATIEMON traitant de la surveillance de l'interface pantographe-caténaire sont présentés : l'un fondé sur des mesures par Capteurs à Fibres Optiques (CFO) à réseaux de Bragg intégrés dans la tête de pantographe, et l'autre sur une 'porte' de contrôle équipée de capteurs et placée en des nœuds stratégiques du réseau. Grace à ces projets, la technologie de mesure par CFO à réseaux de Bragg a prouvé son potentiel en répondant à des besoins en mesures innovantes, dans des conditions difficiles (mesure à grande vitesse, au potentiel, climat hivernal). Les instrumentations et capteurs développés ouvrent la voie à l'utilisation d'une nouvelle technologie pour la surveillance ferroviaire, et à bien d'autres applications industrielles.*

*ABSTRACT. In answer to the deregulation of the railway sector to come, the European Commission launched R&D programs. Since any company will make its trains circulate in any country of the Union, it arouses anxieties of the historical companies. Two projects, SMITS and CATIEMON dealing with the pantograph-catenary interface monitoring are presented: the first deals with Fiber Bragg Grating-based sensors (FBG) embedded into the head of pantographs, and the second with a control gate equipped with FBG sensors and installed at strategic locations of a railway grid. In these projects, the FBG sensing technology has proved its potential by answering needs of innovative measurement, in harsh conditions (high-speed measurements, under high voltage, in severe climatic conditions). Developed instrumentations and sensors open the way to the use of this new technology for monitoring in railway sector, as well as for many other industrial applications*

*MOTS-CLÉS : Capteur à Fibre Optique, capteur à réseau de Bragg, mesure, surveillance, train, TVG, ligne de contact, pantographe, caténaire.*

*KEYWORDS: Optical Fiber Sensor, Fiber Bragg Grating, measurement, monitoring, train, Very high speed train, pantograph, catenary.*

---

## **1. Introduction**

Le secteur ferroviaire est actuellement en cours de dérégulation, du fait des directives de la commission européenne (Anonyme, 2001). Cette ouverture à la concurrence signifie que toute compagnie pourra, à l'avenir, faire circuler ses trains dans l'ensemble de l'Union. Ce nouveau paradigme engendre des interrogations de la part des compagnies historiques, tant celles s'occupant de l'infrastructure que celles exploitant le matériel roulant. La principale problématique concerne l'interface entre ces deux mondes désormais séparés, à savoir le(s) point(s) de contact entre le fil d'alimentation au niveau de la ligne de contact et le(s) pantographe(s) de(s) motrices. Cette interface apparaît comme 'critique', et la surveillance de plusieurs paramètres que sont les forces de contact, les impacts et la température est requise, essentiellement dans le cadre d'une maintenance avancée.

Dans ce contexte, la commission européenne, initiatrice de cette évolution économique, a lancé un certain nombre d'initiatives de recherche (5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> Programmes Cadres de R&D) pour résoudre les questions techniques. A cette occasion, plusieurs projets européens ont été soutenus ces dernières années, dont les projets SMITS puis CATIEMON, auxquels nous avons participé. Le premier, dédié à la surveillance embarquée à bord des trains, a reposé sur la mise en place de Capteurs à Fibres Optiques à réseaux de Bragg à proximité des bandes de contact du pantographe, tandis que le second s'est attaché à la surveillance à poste fixe, au niveau d'un portique équipé de capteurs et pouvant faire office de douane placée à des nœuds stratégiques d'un réseau, de manière à contrôler les convois y pénétrant.

## **2. Les nouveaux besoins de surveillance dans le secteur du rail**

### ***2.1. La surveillance embarquée de l'interaction pantographe caténaire***

La dérégulation du secteur ferroviaire, ainsi que l'augmentation des vitesses d'exploitation commerciales, en particulier concernant la très grande vitesse où il est question aujourd'hui d'aller jusqu'à 360 km/h dès 2016 (Anonyme, 2008), font de l'interface pantographe / caténaire (au travers de laquelle un train puise son énergie électrique), l'un des éléments sensibles d'une rame commerciale dont la défaillance peut occasionner, par son arrêt soudain, une perte d'exploitation, non seulement pour l'opérateur, mais aussi pour tous les exploitants de la ligne ferroviaire en question.

La mise en place d'un outil permettant dans un premier temps la mesure, pour la mise au point, à terme, d'un pilotage en temps réel de la force de contact entre le pantographe et sa ligne contact, est donc tout à fait pertinente puisqu'il serait alors possible d'assurer, par un ajustement permanent de cette force (aujourd'hui principalement réalisé à l'aide de courbes maîtresses dépendant de la vitesse du train), des conditions optimales de captage du courant et d'usure des bandes de contact, facilitant ainsi la mise en place d'une maintenance prédictive.

De façon symétrique au portique d'inspection du projet CATIEMON qui permet de réaliser des mesures à poste fixe avec pour vocation d'informer le gestionnaire de l'infrastructure des conditions réelles d'exploitation de son réseau *via* un échantillonnage local représentatif, la mesure continue de la force de contact proposée dans SMITS, à l'aide de fibres optiques positionnées dans la tête de pantographe et d'un système embarqué permet quant à elle à son exploitant de maîtriser en permanence les conditions d'exploitation du matériel roulant, eu égard aux spécifications du gestionnaire de l'infrastructure, en tout point du réseau.

## **2.2. Un portique d'inspection**

La sécurité d'un réseau ferré est l'une des problématiques majeures de ses exploitants. Il s'agit pour eux de s'assurer qu'à tout moment, aucun train au pantographe défectueux ou mal ajusté ne pénètre sur leur réseau, étant alors porteur de risques graves pour l'infrastructure, dont les conséquences peuvent être la destruction de la ligne de contact. Intégrant capteurs et instrumentations, le rôle d'un portique d'inspection est justement de diagnostiquer les convois, pour si besoin stopper ceux présentant un danger immédiat, et d'évaluer l'impact de chacun d'eux en terme d'usure de l'infrastructure. Le portique d'inspection prototype, développé lors du projet CATIEMON regroupe différentes technologies (télémètre laser, nappe laser + caméra) ainsi que des CFO à réseaux de Bragg du CEA (capteur de déplacement 3D et de déformations). Mais, seuls les CFO réalisent l'éventail complet des mesures : *i*) déplacement 3D de la ligne, *ii*) déformations locales de la ligne de contact, *iii*) oscillations de cette dernière *via* un bras de rappel instrumenté.

## **3. Les capteurs à réseau de Bragg développés pour la surveillance ferroviaire**

### **3.1. Mesures en ligne de force de contact par un pantographe instrumenté**

A l'heure actuelle, il n'y a pas, de façon systématique, de mesure des efforts de contact entre un pantographe et sa ligne de contact : sur le TGV utilisé courant 2005 pour les essais de qualification pendant le projet SMITS par exemple, l'asservissement en force du pantographe répondait à une courbe maîtresse faisant intervenir entre autres paramètres, le carré de la vitesse, permettant ainsi d'assurer un captage de courant dans des conditions d'exploitation commerciale standard.

Dans le cadre d'essais, une solution consiste à instrumenter les supports d'archet du pantographe à l'aide de jauges de mesure d'efforts, permettant à l'aide de deux équations d'équilibre, l'une en forces et l'autre en moments, de calculer en temps réel la position du fil de contact et des efforts qu'il exerce sur le support d'archet. Cette solution est satisfaisante car elle fournit une information globale pour le pantographe, mais elle ne permet pas de dissocier les efforts exercés sur chacune des deux bandes de contact équipant par exemple les pantographes CX25 des TGV.

#### 4 Nom de l'ouvrage

A *contrario* d'une mesure globale, la solution proposée par le consortium SMITS a consisté à transformer chacune des bandes de contact en un capteur d'efforts individuel, au plus proche du point de contact.

En effet, du fait de la nature des efforts qui lui sont appliqués, la bande de contact se comporte globalement comme une poutre en flexion 3 points. La mesure en temps réel de cette flexion à l'aide de capteurs de déformations adéquats (*i.e.* : suffisamment résolvents car la bande de contact, très rigide, se déforme peu d'une part, mais aussi insensibles aux perturbations électromagnétiques compte tenu de la proximité de haute tension d'autre part) et en nombre suffisant, permet donc de réaliser, à l'aide d'un modèle de comportement mécanique adéquat, une mesure individuelle d'efforts.

Compte tenu des contraintes spécifiques liées à la haute tension (jusqu'à 25 kV), le choix de Capteurs à Fibres Optiques (CFO) à réseaux de Bragg s'est montré très judicieux. A cet effet, 2 lignes de CFO totalisant 8 réseaux de Bragg pour 4 points de mesure par bande en température (détection d'échauffements excessifs pouvant entraîner la détérioration de la bande de carbone) et en déformations (mesure des efforts de contact et de frottement entre le pantographe et sa ligne de contact) ont été mises en place dans les bandes de contact du pantographe par l'*IPHT Jena* et *Morganite Electrical Carbon Ltd* (Fig. 1).



**Figure 1.** *Pantographe instrumenté, avec vue de détail des câbles à fibre optique*

#### **3.2. Mesures à poste fixe des déplacements 3D du fil de contact**

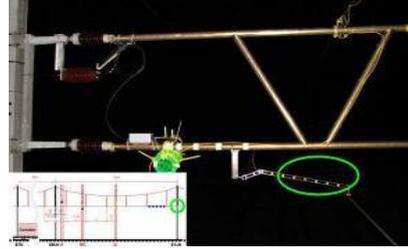
Le capteur développé comporte 3 extensomètres (intégrant chacun un réseau de Bragg ainsi qu'un dispositif mécanique à ressort de réduction du déplacement) qui constituent les arêtes d'un tétraèdre inversé surplombant la caténaire, son sommet étant fixé en un point (Fig. 2a). Ceci permet de remonter aux mouvements 3D du fil.

#### **3.3. Détection d'impacts par bras de rappel instrumenté**

Dans ce but, un réseau de Bragg est collé le long de la partie cylindrique d'un bras de rappel de la caténaire (Fig. 2b). Lorsqu'il se déforme ou subit un impact, au passage d'un convoi, on détecte les variations de la longueur d'onde du réseau.



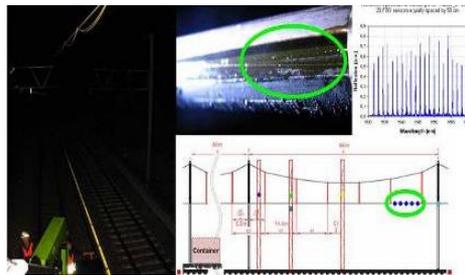
**Figure 2a.** *Tétraèdre formé de 3 capteurs de déplacements à réseau de Bragg*



**Figure 2b.** *Réseau de Bragg collé sur un bras de rappel du fil de contact*

### 3.4. Capteurs de déformations de la ligne de contact

Pour mesurer les déformations du fil de contact, des fibres contenant 20 réseaux de Bragg séparés, de 25 et 50 cm, ont été collées le long de ce fil (Fig. 3), par un procédé « de terrain » innovant. Effectuées en plusieurs points du fil, ces mesures sont reliées à la force. Puis, répétées sur divers trains commerciaux, elles définissent une distribution des déformations du fil, permettant d'identifier les trains 'à risque'.

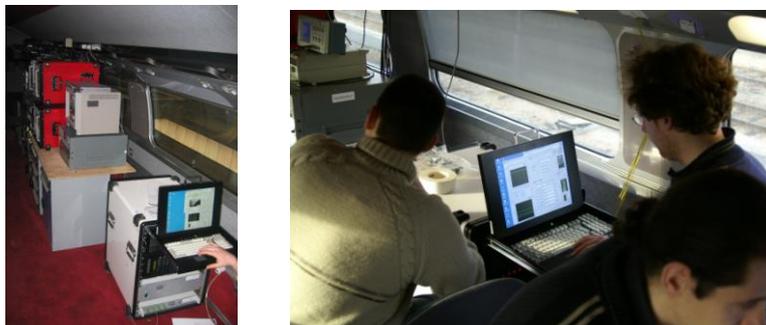


**Figure 3:** *Ligne de 20 réseaux de Bragg multiplexés collée sur le fil de contact*

## 4. Les systèmes de mesure à vocation industrielle pour Capteurs de Bragg

### 4.1. L'instrumentation embarquée mise au point dans le projet SMITS

Les 4 lignes de fibre optique permettant l'interrogation des réseaux de Bragg intégrés à la tête de pantographe ont été reliées, depuis le toit de la motrice, à un système de mesure pour CFO à réseaux de Bragg installé, pour les essais en ligne, dans une voiture spécialement aménagée en laboratoire d'essai. Compte tenu des performances imposées par le cahier des charges pour atteindre la résolution du Newton en effort vertical, la mise au point d'un système de mesure spécifique fondé sur une source accordable et permettant la mesure simultanée sur 4 lignes, en temps réel à 500 Hz, de chacune des 16 longueurs d'onde de Bragg avec une résolution meilleure que le pm, nous a été confiée (Laffont, 2005).



**Figure 4.** *Instrumentation embarquée à bord du TGV Duplex utilisé pour les essais en ligne avec vue d'ensemble de l'intérieur de la voiture d'essai*

Les mesures réalisées par ce système optoélectronique ont été comparées en temps réel, pendant toute la durée des essais sur la ligne TGV entre Paris et Vendôme, aux mesures de référence à 20 Hz du système utilisé par la SNCF-AEF pour les paramètres de force de contact, position du fil de contact ainsi que les températures relevées par les réseaux de Bragg au sein de chacune des deux bandes.

Dans ces conditions, où plus de 6000 km sur 5 jours d'essai ont été parcourus jusqu'à 320 km/h en vitesse de pointe, le système de mesure du CEA LIST a pu fournir, sans aucune défaillance, toutes les mesures requises (Maurin, 2007).

#### **4.2. Le portique d'inspection développé dans le projet CATIEMON**

Les capteurs de ce portique ont été scrutés au kHz, simultanément sur 6 voies, à l'aide d'une seule instrumentation dénommée BraggFit<sup>3</sup> reposant sur une approche client – serveur de mesure spectrale de résolution 1 pm (Fig. 5). Dans une telle architecture, un PC portable sert à configurer le serveur que constitue l'instrumentation. Equipée de cartes réseaux Ethernet et Wifi, elle permet les connexions distantes pour paramétrer et récupérer les mesures, tout en restant à distance de sécurité. Un second système dénommé BraggLight a aussi été conçu (Fig. 6). Compact, il peut scruter une unique ligne de réseaux de Bragg multiplexés à une cadence de 200 Hz. Il est alimenté par USB (liaison qui sert également au transfert des data), et vient en appoint du système BraggFIT<sup>3</sup>, étant particulièrement intéressant pour suivre en temps réel l'installation des lignes de capteurs à réseaux de Bragg sur le terrain, alors que l'on ne dispose pas d'alimentation électrique, ou que les câbles de déport par fibre optique ne sont pas encore installés par exemple.



**Figure 5.** *Système BraggFIT<sup>3</sup> surveillant le portique d'inspection*



**Figure 6.** *Système compact monocanal BraggLight pour le contrôle de terrain*

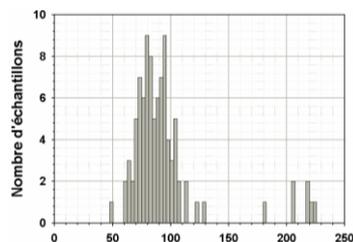
## 5. Les essais embarqués et à poste fixe

### 5.1. Les essais TGV du projet SMITS

Des essais en ligne jusqu'à 320 km/h entre Paris et Vendôme ont été réalisés sur plus de 6000 km à bord d'un TGV Duplex tout spécialement équipé. La mesure simultanée par le système développé par le CEA LIST des 16 longueurs d'onde de Bragg des réseaux présents sur les 4 lignes optiques équipant le pantographe a permis la mesure en temps réel à 500 Hz des efforts de contact exercés sur chacune des bandes de contact, ainsi que leur température en divers points. Toutes ces mesures ont été comparées en temps réel aux mesures réalisées à 20 Hz par le dispositif de référence de la SNCF-AEF. Le système de mesure du CEA LIST a fourni, sans anicroche, toutes les mesures requises pendant toute la durée des essais.

### 5.2. Les essais du portique d'inspection du projet CATIEMON (Heustrich, Suisse)

Une motrice BLS a permis de calibrer, de nuit, les capteurs vis-à-vis de la force de contact (jusqu'à 90 N) et de la vitesse du train (jusqu'à 100 km/h) ; afin de relier ces deux grandeurs aux déformations et déplacements mesurés. Puis, les mesures ont été collectées lors du passage de convois commerciaux, permettant d'établir la distribution de la déformation moyenne d'une section de ligne de contact (Fig. 7).



**Figure 7.** *Histogramme des déformations moyennes d'une section de ligne de contact obtenu à partir de mesures sur des trains franchissant le portique*

## 8 Nom de l'ouvrage

L'approche a consisté à détecter les pics de déformation dus à chaque bande de frottement du train considéré, puis de les moyenner sur l'ensemble des réseaux de Bragg de la ligne. Cette procédure a permis l'identification de trains dont l'impact sur l'infrastructure sort du gabarit (Fig. 7, entre 150 pm et 250 pm) (Laffont, 2008).

## 6. Conclusion

Les projets présentés répondent de manière complémentaire à la problématique de la surveillance de l'interface pantographe-caténaire, sujet devenu majeur dans le contexte de dérégulation du secteur ferroviaire européen. SMITS vise l'instrumentation embarquée à bord de trains, et utilise des CFO à réseaux de Bragg intégrés dans la tête de pantographe, tandis que CATIEMON concerne le développement d'une « douane » de contrôle, entre autres équipée de capteurs de Bragg, vérifiant l'interaction pantographe-caténaire de tout train s'approchant d'une zone sensible du réseau, pour identifier ceux à risque pour l'infrastructure. Ces développements ouvrent de nouvelles perspectives aux utilisateurs, du secteur ferroviaire, mais aussi de tout domaine concerné par la surveillance structurelle.

## 7. Bibliographie

- Anonyme, Livre blanc : “*La politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix*”, Commission Européenne, 2001, [http://ec.europa.eu/transport/white\\_paper/documents/doc/lb\\_texte\\_complet\\_fr.pdf](http://ec.europa.eu/transport/white_paper/documents/doc/lb_texte_complet_fr.pdf)
- Anonyme, “La SNCF veut pousser ses TGV à 360 km/h pour mieux rivaliser avec l'avion” Dépêche AFP du 14 oct. 2008, [http://afp.google.com/article/ALeqM5gzPcZz3wTv2Z-OLGzBY\\_ZJ3MjsKA](http://afp.google.com/article/ALeqM5gzPcZz3wTv2Z-OLGzBY_ZJ3MjsKA)
- CATIEMON, contrat n° TST4-CT-2005-12105, Consortium : Siemens [D], Morganite [UK], IPHT [D], CEA [F], Cybernetix [FR], Eurailscout [NE], BLS [CH], Furrer & Frey [CH].
- P. Ferdinand, G. Laffont, N. Roussel, J. Boussoir, L. Maurin and S. Rougeault, “High Performance Fiber Bragg Grating Systems for Smarts Structures: Application to overhead Contact Line Monitoring in the Railway Industry”, *Structural Health Monitoring 2009*, Vol. 1, pp. 641-648, edited by Fu-Kuo Chang, DESTech publication, <http://www.destechpub.com>, ISBN 978-1-60595-007-5
- G. Laffont, N. Roussel, L. Maurin, J. Boussoir, B. Clogenson, L. Auger, S. Magne and P. Ferdinand, “Wavelength tunable fiber ring laser for high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors”, *17<sup>th</sup> Intern. Conf. on Optical Fibre Sensors (OFS-17)*, May 23-27, 2005, Bruges, Belgium. SPIE Vol. 5855, ISBN 0-8194-5855-4
- L. Maurin, P. Ferdinand, G. Laffont, N. Roussel, J. Boussoir et S. Rougeault, “High speed real-time contact measurements between a smart train pantograph with embedded fibre Bragg grating sensors and its overhead contact line”, *Structural Health Monitoring 2007*, Vol. 2, pp. 1808-1815, edited by Fu-Kuo Chang, DESTech publication, <http://www.destechpub.com>, ISBN 978-1-932078-71-8
- SMITS, contrat n° G3RD-CT-2002-00812, Consortium : Siemens [D], Morganite Electrical Carbon Ltd [UK], SNCF [F], IPHT [D], CEA LIST [F], BLS [CH].