

# **Instrumentation de lignes caténaïres par capteurs à réseaux de Bragg fibrés pour la surveillance du trafic ferroviaire**

## ***Du concept de l'instrumentation aux essais terrain***

**G. Laffont, N. Roussel, J. Boussoir, S. Rougeault, L. Maurin et P. Ferdinand**

*CEA, LIST, Laboratoire de Mesures Optiques, Gif-sur-Yvette, F-91191*

*Contacts : [guillaume.laffont@cea.fr](mailto:guillaume.laffont@cea.fr) – [pierre.ferdinand@cea.fr](mailto:pierre.ferdinand@cea.fr)*

### **Introduction**

Le captage du courant électrique est au centre des préoccupations des sociétés de chemin de fer et des exploitants d'infrastructures ferroviaires. Il conditionne les vitesses de circulation des trains commerciaux mais également la disponibilité des infrastructures. Chaque année, des incidents sont imputés à l'interaction pantographe-caténaire et occasionnent des interruptions du trafic : les incidents récents dans l'hexagone, tant sur les lignes TGV que sur le RER, sont là pour le rappeler. Pour prévenir ces incidents, des opérations de surveillance de l'infrastructure sont régulièrement planifiées, et exécutées à partir de trains dédiés. Elles sont lourdes à réaliser et impliquent un matériel onéreux ainsi que du personnel qualifié. En outre, ces méthodes de surveillance ne détectent que des défauts liés à l'infrastructure, et non pas des problèmes liés aux trains. Ainsi, des pantographes mal ajustés ou détériorés sont également la source de nombreux incidents. En effet, une force de contact trop élevée peut engendrer une usure excessive de la ligne de contact et causer des dommages aux supports. Dans le cas inverse (force trop faible), le pantographe risque de perdre le contact ce qui génère le plus souvent un arc électrique – détériorant la bande de frottement et la ligne de contact – mais également des fluctuations de l'intensité du courant transmis aux moteurs.

La dérégulation du secteur ferroviaire en Europe a en outre conduit la Commission Européenne à lancer des initiatives de Recherche visant à améliorer la fiabilité et la disponibilité des réseaux ferrés transnationaux. Dans ce contexte, l'Institut LIST du CEA participe au projet CATIEMON – pour *CATenary InterfacE MONitoring* – qui, piloté par Siemens, se déroule en partenariat avec des compagnies ferroviaires et des industriels assurant l'exploitation et la maintenance des infrastructures correspondantes [1]. Le rôle du CEA LIST consiste plus précisément à développer des Capteurs à Fibres Optiques reposant sur la technologie des réseaux de Bragg et des instrumentations dédiées. L'objectif est de caractériser l'interaction entre les lignes caténaïres et les pantographes des trains empruntant un réseau donné (Cf. Fig. 1). Les mesures obtenues serviront à optimiser la maintenance et à accroître la disponibilité des infrastructures.

Dans cet article, nous décrivons les différents capteurs et systèmes de mesure à réseaux de Bragg développés et testés dans le cadre de ce projet, tant en laboratoire que sur site. Enfin, ces résultats sont analysés et discutés au regard des besoins des utilisateurs finaux.

### **1. Un « portique d'inspection » pour la surveillance du trafic ferroviaire**

De façon à détecter tout convoi ferroviaire risquant d'endommager l'infrastructure, un concept de portique d'inspection a été imaginé et développé. Positionné à demeure et en un point stratégique du réseau ferré, il regroupe différents capteurs, et les instrumentations associées, permettant de caractériser et diagnostiquer tout convoi le traversant. Un tel dispositif vise non seulement à stopper tout train présentant un danger immédiat pour le réseau (et donc réduire les risques d'incident, par exemple en tunnels) mais aussi à estimer l'impact de chaque train en terme d'usure de l'infrastructure.

Le comportement dynamique d'une ligne de contact est relativement complexe : le point d'application de la force est par nature glissant, la ligne est suspendue par des « pendules » souples et chemine en zig-zag au-dessus des voies, des phénomènes de propagation d'ondes doivent donc être considérés ... Aussi est-il nécessaire de disposer des capteurs en plusieurs points d'observation. Ceci est particulièrement vrai pour les mesures des déformations locales de la ligne de contact : des travaux de modélisation ont ainsi montré que ces déformations évoluaient de façon oscillatoire sur une section comprise entre deux pendules de suspension.

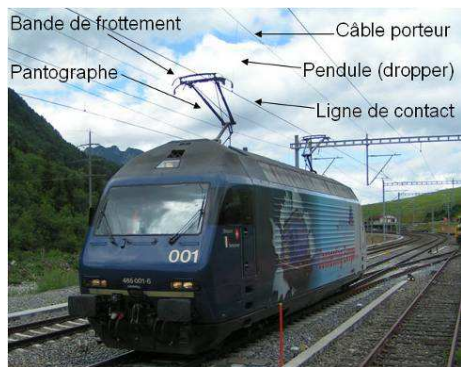


Fig. 1 : Eléments de structure au centre de l'interaction dite « pantographe/caténaire »

L'interaction pantographe/caténaire peut être caractérisée par les mesures du déplacement tridimensionnel et des déformations mécaniques induites localement sur la ligne de contact par le frottement des patins, généralement à base de carbone, équipant les pantographes (Cf. Fig. 1). Prenons le cas d'une force de contact trop élevée : le pantographe engendre alors des soulèvements plus importants de la ligne de contact et des déformations locales excessives. De telles mesures imposent des contraintes fortes : il est nécessaire de disposer de capteurs insensibles aux perturbations électromagnétiques (les lignes à grande vitesse françaises sont alimentées en 25 kV alternatif) mais également peu intrusifs et résistant à des conditions environnementales

sévères (variations de températures saisonnières, pluie, grêle, gel ...). En outre, la vitesse des trains et les dimensions centimétriques des bandes de frottement imposent des cadences d'acquisition de l'ordre du kHz, voire mieux. Enfin, le comportement oscillatoire des déformations oblige à moyenner la réponse de plusieurs capteurs successifs pour obtenir un indicateur pertinent de la force de contact.

Le portique d'inspection mis en oeuvre dans le cadre du projet Catiemon constitue un prototype. Aussi regroupe-t-il différentes technologies de mesure complémentaires développées par les partenaires : télémètre laser pour la mesure du soulèvement (1D), nappe laser associée à une caméra pour un suivi bidimensionnel (vertical et horizontal) par imagerie, capteur de déplacement 3D et capteurs de déformations multiplexés par réseaux de Bragg (CEA LIST). En fait, seule la technologie des fibres optiques à réseaux de Bragg permet de réaliser l'éventail complet des mesures : à savoir celle du déplacement 3D de la ligne de contact et un maillage fin d'une section de ligne de contact pour la mesure des déformations mécaniques locales. Un bras de rappel (ou *steady arm*) servant à définir la position du fil de contact par rapport aux rails a également été instrumenté avec des réseaux de Bragg. Il s'agit dans ce cas de caractériser les oscillations de la ligne, en complément des mesures effectuées directement sur le fil de contact. La figure 2 illustre le schéma d'implantation des différents capteurs à réseau de Bragg équipant le portique d'inspection.

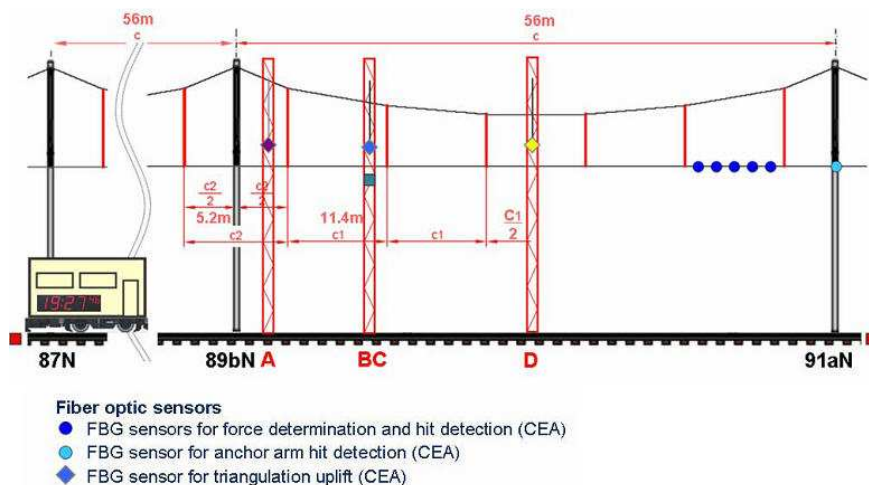


Fig. 2 : Schéma d'implantation des capteurs de Bragg dans le portique d'inspection

## 2. Capteurs à réseaux de Bragg et instrumentations

**Mesure du déplacement tridimensionnel du fil de contact.** Trois capteurs de déplacement sont montés aux extrémités d'un cadre triangulaire rigide surplombant la caténaire, et reliés en leur extrémité mobile en un même point du fil de contact (Cf. Fig. 3a). Chaque capteur se compose d'une tige mobile reliée à des ressorts répercutant le déplacement de ladite tige à un corps d'épreuve comportant un réseau de Bragg. Les ressorts et le corps d'épreuve sont conçus de façon

à respecter les limites d'élasticité des fibres optiques et de résistance mécanique des réseaux de Bragg. La mesure du déplacement passe par un calibrage pour établir une loi de conversion avec la déformation mesurée : une course de 20 cm (amplitude imposée par le cahier des charges) correspond à un décalage spectral de 1 nm. Ensuite, des relations trigonométriques permettent de remonter au déplacement tridimensionnel de la ligne de contact.

**Bras de rappel instrumenté.** Dans ce cas, un capteur à réseau de Bragg est positionné dans des rainures usinées spécifiquement le long des éléments cylindriques constituant le bras de rappel (Cf. Fig. 3b). Le réseau de Bragg est ensuite collé en laboratoire et un câble de déport est pré positionné. Le bras de rappel se déforme sous l'action des mouvements de la ligne de contact induisant des variations de la longueur d'onde de Bragg du réseau.

**Lignes de RdB multiplexées pour la mesure des déformations locales de la ligne de contact.** La mesure des déformations locales de la ligne de contact est particulièrement intéressante en vue de caractériser l'interaction caténaire/pantographe. Effectuées en plusieurs points, ces mesures sont mises en relation avec la force de contact appliquée. En outre, répétées sur des trains commerciaux, elles permettent d'établir une distribution des déformations subies par la ligne de contact. Une fois des limites hautes et basses définies par les responsables d'infrastructures ferroviaires, de telles données permettent la détection des trains risquant de détériorer l'infrastructure. Dans cet objectif, nous avons utilisé des lignes de mesure comportant chacune jusqu'à 20 réseaux de Bragg multiplexés spectralement et espacés de 25 cm et 50 cm chacun. Chaque ligne est positionnée directement le long d'un fil de contact puis fixée à celui-ci à l'aide d'un procédé de collage « de terrain » développé spécifiquement (Cf. Fig. 3c).

**Instrumentation pour capteurs à réseaux de Bragg.** Ces différents capteurs sont analysés à l'aide d'une unique instrumentation effectuant des mesures spectrales avec une résolution de 1 pm à la cadence de 1 kHz et sur 6 voies de mesure simultanément (Cf. Fig. 3d). Cette instrumentation a été conçue selon une approche client/serveur. Un ordinateur portable est utilisé pour configurer le serveur qui constitue l'instrumentation de mesure proprement dite et possède des cartes réseaux Ethernet ainsi que Wifi. Tout utilisateur peut ainsi se connecter à distance sans difficulté. Ceci s'avère particulièrement utile dans le cadre d'applications déployant un réseau de capteurs sur le terrain. Il suffit de se placer à portée de l'instrumentation pour paramétrer, vérifier ou récupérer ses mesures, tout en restant à distance de sécurité et, dans notre cas, sans gêner le trafic ferroviaire.



Fig. 3a : Capteur de déplacement 3D

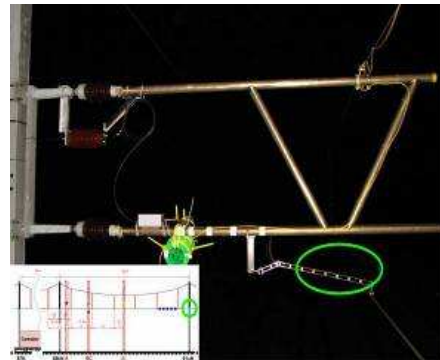


Fig. 3b : Bras de rappel

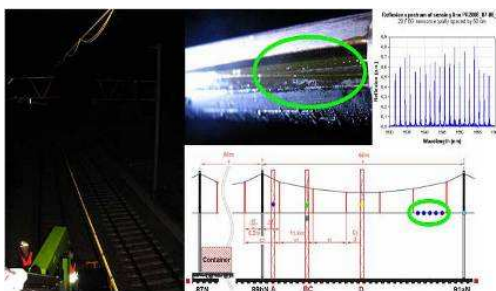


Fig. 3c : Lignes multiplexées



Fig. 3d : Système de mesure

### 3. Installation sur site et essais ferroviaires

**Installation.** Capteurs et instrumentations ont été installés sur un site sélectionné en Suisse par les partenaires du projet. Ce site a pour caractéristique de se trouver juste en amont d'un tunnel ferroviaire percé sous les Alpes et inauguré en 2007 (le tunnel du Lötschberg), ce qui constitue un site critique par excellence. Pour éviter de perturber le trafic commercial, le montage a été effectué de nuit (trafic réduit) avec renvoi des trains de façon alternée sur une voie adjacente. Les conditions de travail (nuit, intempéries, froid, vent ...) ont nécessité des méthodes d'installation spécifiques, en particulier pour le collage des lignes de réseaux de Bragg sur la caténaire (Cf. Fig. 4a). Ainsi, ces lignes ont été fixées avec une colle mono-composant et polymérisant aux UV, une lampe UV avec faisceau de fibres de déport permettant d'insoler la colle appliquée de façon continue sur les fibres de mesure. Un système de mesure pour réseaux de Bragg, portable et autonome, permet de suivre en temps réel le procédé de collage malgré l'absence d'alimentation électrique. Par ailleurs, des câbles de terrain ont été utilisés pour le déport des signaux de mesure jusqu'à un container positionné le long des voies : ces fibres de déport passent par des isolateurs électriques permettant de protéger personnels et instrumentations de la haute tension (25 kV en l'occurrence).

**Essais ferroviaires.** Deux types d'essais ont été menés. Tout d'abord, une motrice a été utilisée pour calibrer la réponse des différents capteurs vis-à-vis de la force de contact appliquée et de la vitesse de passage sous le portique d'inspection. L'objectif principal est ici d'explorer la possibilité de relier les grandeurs mesurées (déplacements, déformations) à la vitesse du train et à la force de contact (Cf. Fig. 4b). Des vitesses allant de 5 km/h à 100 km/h (vitesse maximale autorisée au niveau du portique) ont été utilisées. Concernant la force de contact, elle pouvait être ajustée à 50 N, 70 N et 90 N. Ces calibrages ont été réalisés de nuit, et au cours de plusieurs campagnes d'essais s'étalant sur 18 mois. Par ailleurs, durant les mêmes périodes, nous avons également collecté la réponse des capteurs lorsque le portique était franchi par des trains commerciaux (passagers et frets). Ceci a permis d'établir, par exemple, la distribution de la déformation moyenne d'une section de ligne de contact lors du passage de ces types de trains (Cf. Fig 4c). Pour ce faire, on détecte les pics de déformation locale associés à chaque bande de frottement, pour le (ou les) pantographe(s) du train considéré, puis l'on moyenne ces valeurs sur l'ensemble des réseaux de Bragg de la ligne de mesure. Il est ainsi possible d'identifier les trains dont l'impact sur l'infrastructure sort du gabarit (Cf. Fig. 4c, entre 150 pm et 250 pm).



Fig. 4a : Opération de collage d'une ligne de mesure à réseaux de Bragg sur la ligne de contact

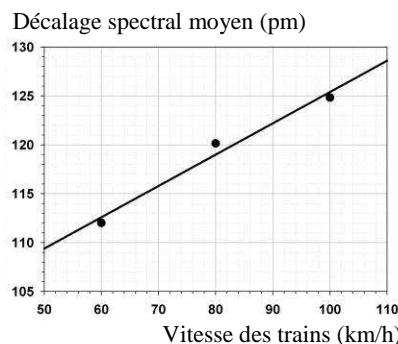


Fig. 4b : Evolution de la déformation moyenne d'une section de ligne de contact en fonction de la vitesse du train pour une force de contact de 92 N

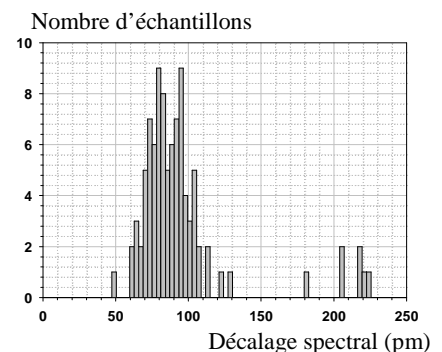


Fig. 4c : Distribution de la déformation moyenne d'une section de ligne de contact relevée pour une centaine de trains commerciaux

### Bibliographie

1. <http://www.catiemon.com>
2. S. Kusumi, T. Fukutani & K. Nezu, « *Diagnosis of Overhead Contact Line based on Contact Force* », QR of RTRI, vol. 47, n° 1, pp. 39-45, 2006
3. Yong Hyeon Cho, « *Numerical simulations of the dynamic responses of railway overhead contact lines to a moving pantograph, considering a nonlinear dropper* », Journal of Sound and Vibration, vol. 315, pp. 433-454, 2008.