

Pantographe instrumenté de capteurs à réseaux de Bragg fibrés pour la surveillance de l'interface avec le fil de contact

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

▶ **To cite this version:**

Laurent Maurin, Guillaume Laffont, Nicolas Roussel, Jonathan Boussoir, Stéphane Rougeault, et al.. Pantographe instrumenté de capteurs à réseaux de Bragg fibrés pour la surveillance de l'interface avec le fil de contact : Du concept de l'instrumentation aux essais TGV. Colloque 2007 du Club "Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie", Société Française d'Optique, Nov 2007, Arcachon, France. cea-04102452

HAL Id: cea-04102452
https://cea.hal.science/cea-04102452

Submitted on 22 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Colloque 2007 du Club "**C**ontrôles et **M**esures **O**ptiques pour l'**I**ndustrie" de la **S**ociété **F**rançaise d'**O**ptique
19-23 novembre 2007, Arcachon, France

Pantographe instrumenté de capteurs à réseaux de Bragg fibrés pour la surveillance de l'interface avec le fil de contact

Du concept de l'instrumentation aux essais TGV

Laurent Maurin, Guillaume Laffont, Nicolas Roussel, Jonathan Boussoir, Stéphane Rougeault et Pierre Ferdinand

CEA, LIST, Laboratoire de Mesures Optiques
Boîte courrier 94
GIF-SUR-YVETTE CEDEX, F-91191, France
Contacts : laurent.maurin@cea.fr – pierre.ferdinand@cea.fr
Tél. : +33 (0)1 69 08 83 39 – Fax : +33 (0)1 69 08 83 95

Mots clefs : Fibre Optique, Capteur à Fibres Optiques (CFO), Réseau de Capteurs à Fibres Optiques (RCFO), Réseau de Bragg (RdB), pantographe, ligne de contact, mesure temps réel, Train à Grande Vitesse (TGV), laser en anneau.

Résumé

La prise en compte de la saturation progressive de l'infrastructure européenne des transports est devenue, au fil des ans, une des priorités des Programmes Cadres de R&D européens. Ainsi, lors du 5ième PCRD, le projet SMITS (*Smart Monitoring In Train Systems*) a eu pour objectif d'adresser la problématique des perturbations du trafic ferroviaire causées par les chutes de pantographe du fait de leur usure excessive, entrainant de ce fait l'arrêt du train, par la mise en place d'un outil de contrôle des paramètres d'interface avec la ligne de contact (force de contact, température) afin de pouvoir, *in fine*, mettre en place une maintenance préventive.

Dans le cadre de ce consortium[1] dont l'objectif était la mesure à haute cadence afin de satisfaire les besoins de la très grande vitesse (320 km/h sur les lignes TGV actuelles), le CEA LIST a développé un système de mesure innovant multivoies pour Capteurs à Fibres Optiques (CFO) à réseaux de Bragg, fondé en particulier sur une source laser accordable de type laser en anneau, permettant simultanément l'acquisition des longueurs d'onde de Bragg des transducteurs positionnés dans les bandes de contact d'un pantographe, et leur transformation, en temps réel sur sorties analogiques, en des grandeurs physiquement significatives pour les besoins des essais de qualification.

Contrairement aux technologies traditionnelles reposant sur l'utilisation des jauges électriques de déformations positionnées aux points d'appui de la tête de pantographe et dont le principe de mesure repose sur un équilibre de forces et de moments, le choix du consortium, tirant parti de l'isolation galvanique intrinsèque des fibres optiques, s'est porté sur l'équipement de jauges à réseaux de Bragg des bandes de contact portées au potentiel de la ligne de contact (jusqu'à 25 kV), les transformant chacune en des capteurs de mesure en flexion 3 points "au plus près" du point de contact.

La chaîne de mesure complète a ainsi été testée pendant 1 semaine, sur plus de 5000 km, entre Paris et Vendôme courant mars 2005 à bord d'un TGV Duplex spécialement affrété pour l'occasion. Ont ainsi pu être mesurés, à une cadence de 500 Hz et sur 16 points de mesure simultanés, les efforts de contact verticaux, la position du fil de contact, les températures et leurs gradients régnant au sein des bandes de contact.

L'intérêt d'une telle cadence de mesure provient de fait qu'à 300 km/h, un TGV parcourt chaque 500e de seconde un peu moins de 20 cm ; en cas de détection d'un défaut sur la ligne, le couplage avec un GPS permet de localiser le secteur correspondant. La résolution spectrale du système, meilleure que le picomètre, a permis d'évaluer les variations de la force de contact à quelques newtons près.

La présentation s'attachera à rappeler les concepts de l'instrumentation mis en œuvre, mais également de relater les essais à grande vitesse, tout en replaçant la démarche en perspective avec les besoins des utilisateurs finaux de ce secteur.

---

[1] Projet piloté par Siemens [D], et dont le consortium regroupe : la SNCF-AEF [F] et BLS [CH] deux opérateurs ferroviaires, l'IPHT [D] un institut de recherche, Morganite Electrical Carbon Ltd. [UK] fabricant des patins de carbone, en plus du CEA LIST [F].

1. Introduction

Engagée il y a plusieurs années, la politique de déréglementation du réseau ferroviaire est désormais en marche en Europe. Dans ce schéma, le pantographe au contact de sa ligne devient la nouvelle interface séparant les opérateurs ferroviaires de l'infrastructure : la surveillance de cette interface devient donc critique pour assurer une meilleure interopérabilité entre les compagnies ferroviaires dont les taux moyens de défaillance pouvant être attribués au pantographe sont de l'ordre de 4 à 5 pannes/(100 km.an) [1].

Dans ce cadre, le consortium européen SMITS, constitué de plusieurs acteurs européens incluant des opérateurs ferroviaires, des industriels et des laboratoires de R&D [2], a eu pour objectif de satisfaire ces nouveaux besoins par la mise au point et la qualification d'une solution complète à base de Capteurs à Fibres Optiques à réseaux de Bragg (CFO) permettant la mesure en temps réel des contraintes thermomécaniques créées, au passage d'un train, par un pantographe sur sa ligne de contact, ceci incluant :

- un système de mesure en temps réel pour réseaux de Bragg compatible avec les équipements ferroviaires existants ;
- des collecteurs de courant **"**intelligents", instrumentés par CFO ;
- et des modèles dédiés au calcul des températures et des forces de contact entre le pantographe et la ligne de contact.

2. Etat de l'art – Faiblesses des solutions actuelles et apport du projet SMITS

Jusqu'à présent, les techniques traditionnelles de mesure de force de contact entre la ligne de contact et le collecteur de courant ont consisté à employer des jauges de déformations électriques calibrées, positionnées à l'intérieur des suspensions de la tête de pantographe [3, 4, 5, 6, 7].
Bien que ces techniques reposant sur des modèles d'équilibres de forces et de moments aient démontré jusqu'à présent leur robustesse dans des applications courantes, leur application au cadre ferroviaire pour la mesure des forces de contact doit faire face à de nouvelles difficultés dues en particulier :

- à la présence des tensions élevées (jusqu'à 25 kV sur la ligne de contact), ce qui demande une isolation galvanique complète de la chaîne de mesure traditionnelle ;
- à la rigidité du pantographe, qui se déforme peu, conduisant à un niveau maximal de déformations mécaniques mesurables proche du bruit de mesure des instrumentations traditionnelles,
- à la distance séparant les capteurs traditionnels de la ligne de contact, rendant périlleux la compensation des forces d'inertie de chacune des pièces suspendues.

A contrario, la stratégie du projet SMITS consiste à utiliser des CFO à réseaux de Bragg incorporés à même le collecteur de courant, au plus près du point de contact, afin d'en tirer les avantages significatifs suivants :

- une sensibilité amoindrie aux effets d'inertie puisque le nombre d'éléments intermédiaires entre les capteurs et le point de contact est réduit par rapport à des capteurs positionnés dans les boites ressorts de la tête de pantographe ;
- un modèle simple de calcul de la force de contact, du fait que les bandes de contact du pantographe peuvent, en première approche, être considérées comme des poutres en flexion 3 points ;
- une chaîne de mesure sécurisée grâce à l'immunité électromagnétique apportée par la fibre optique, qui permet de réaliser des mesures au potentiel, sans isolation galvanique particulière.

Malgré ceci, quelques difficultés demeurent du strict point de vue de la mesure :

- les déformations maximales en flexion des bandes de contact restant, en fonctionnement normal, inférieures à 100 µm/m, ceci impose – simulation numérique à l'appui – de disposer d'un système de mesure dont la résolution et la précision sont meilleures que 0,6 pm pour résoudre 1 N en force ;
- la localisation des défauts présents sur la ligne de contact avec une précision de 20 cm requiert, pour le TGV dont la vitesse commerciale atteint 320 km/h, une cadence de mesure élevée (500 Hz) ;
- et ceci, pour chacune des lignes optiques équipant chacune des deux bandes de contact de la tête de pantographe, ce qui impose d'effectuer des mesures en parallèle sur chacune des voies optiques.

Le rôle particulier du CEA LIST dans le projet SMITS a été de :

- mettre au point un système de mesure pour réseaux de Bragg capable de mesures rapides en temps réel, sur 4 lignes optiques en parallèle, avec une précision et une résolution meilleures que 0,6 pm@1550 nm ;

- et d'intégrer ce système dans la boucle de mesure SNCF existante pour les essais de qualification en ligne à très grande vitesse d'un TGV Duplex entre Paris et Vendôme ;

ceci, à des fins de comparaison en temps réel des mesures de forces verticales de contact et de températures à des mesures de référence effectuées à l'aide de jauges de déformations et de thermocouples électriques.

3. Topologie d'implémentation des lignes optiques et système de mesure du CEA LIST

Comme annoncé plus haut, le principe de la mesure de force repose sur un modèle de flexion en 3 points d'une poutre : le collecteur de courant est ainsi équipé de plusieurs réseaux de Bragg {S–T} situés à différentes positions afin d'être sensible à la fois aux forces de contact verticale et horizontale (fig. 1) :

- 2 capteurs de déformations et de température sont positionnés au milieu du collecteur de courant ;
- 2 capteurs de déformations et de température sont quant à eux positionnés de façon symétrique de chaque côté du collecteur de courant ;

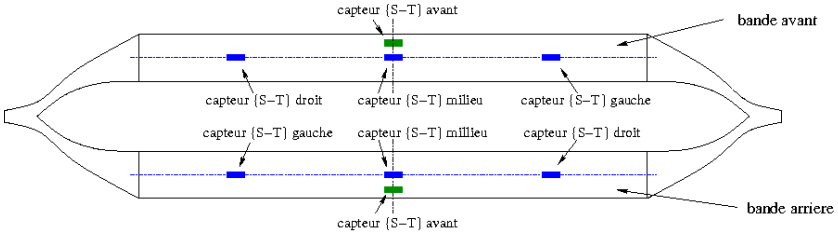


Figure 1. Position des capteurs à réseaux de Bragg dans la tête de pantographe modèle CX25 (vue de dessous)

.

transformant celui-ci en un capteur de force et de température puisque la longueur d'onde caractéristique λ_B d'un réseau de Bragg est sensible à la fois aux variations de déformations $\Delta\varepsilon$ et de température ΔT selon la relation, valide pour une fibre librement tendue entre deux points :

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = a\,\frac{\Delta T}{T} + b\,\Delta\varepsilon + c\,\frac{\Delta P}{P} \qquad \text{avec} \qquad \begin{cases} a \approx 2.3\times10^{-3} \\ b \approx 0.78 \\ c \approx -2.94\times10^{-6} \end{cases} \qquad (1)$$

P étant la pression hydrostatique appliquée au réseau de Bragg, a, b et c pouvant localement être considérés comme des constantes.

Dans la plupart des applications où la sensibilité en pression hydrostatique ΔP peut être négligée, il suffit de seulement deux réseaux de Bragg pour extraire les informations de variation de déformations $\Delta\varepsilon$ et de variation de température ΔT ; dans notre cas (fig. 1) :

- les capteurs de type *S* sont sensibles à la fois aux variations de déformations $\Delta\varepsilon$ et de température ΔT ;
- tandis que les capteurs de type *T* ne sont sensibles qu'aux variations de température ΔT.

Par mesure de sécurité en cas de casse d'une fibre optique empêchant celle-ci d'être interrogée, l'ensemble des capteurs a été réparti de façon symétrique sur un total de 4 fibres optiques.

4. Principe des mesures de températures et des efforts de contact verticaux

Comme annoncé ci-dessus, le principe de la mesure de force repose sur un modèle de flexion en 3 points. Une description du modèle a été fournie à dessein par l'IPHT, partenaire du projet :

- les efforts verticaux *F* sont donnés par :

$$\begin{cases} F = \dfrac{\varepsilon_{right} - \varepsilon_{middle}\cdot\left(\dfrac{2\cdot xn}{L} - 1\right)}{\dfrac{L^2}{2} - xn\cdot L}\cdot\dfrac{1}{C1} \\ F = \dfrac{\varepsilon_{left} - \varepsilon_{middle}\cdot\left(\dfrac{2\cdot xn}{L} - 1\right)}{\dfrac{L^2}{2} - xn\cdot L}\cdot\dfrac{1}{C1} \end{cases} \qquad (C1, xn, \text{ et } L \text{ constantes}) \quad (2)$$

- et la position de contact *x* est donnée par :

$$x = C \cdot xn \cdot \frac{K \cdot \varepsilon_{right} - \varepsilon_{left}}{K \cdot \varepsilon_{right} + \varepsilon_{left}} \qquad (C, xn \text{ et } K \text{ constantes}) \quad (3)$$

Les températures T régnant au sein des bandes de contact sont quant à elles données par un modèle linéaire en longueur d'onde :

$$T(\lambda) = m \cdot \lambda + b \qquad (m \text{ et } b \text{ constantes}) \quad (4)$$

Les différents coefficients de calibrage sont obtenus :

- pour la mesure de la température T, à l'aide de mesures de calibrage dans une enceinte thermique calibrée ;
- pour les mesures de position x et de force verticale F, par des mesures de calibrage en force et position à l'aide de différents poids calibrés.

Une analyse en régression de chacune des séries de calibrage permet alors d'obtenir les coefficients de calibrage décrits dans les équations (2), (3) et (4).

Une fois ces coefficients obtenus, on vérifie que le modèle permet de calculer des grandeurs réalistes de forces, positions et températures. Des mesures de contrôle en position ont ainsi permis de mettre en évidence l'insuffisance du modèle de flexion 3 points pour le calcul de la position du point de contact sur le collecteur de courant, en particulier, lorsque celui-ci se situe à proximité des capteurs d'extrémités intégrés dans les bandes de contact (fig. 2).

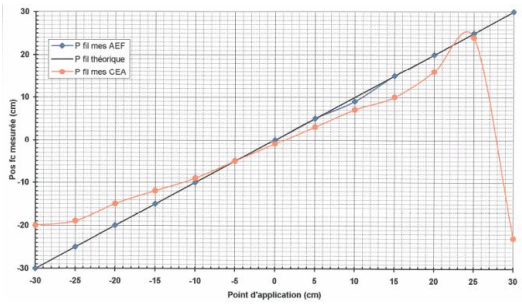


Figure 2. Procédure de contrôle de la position du point de contact : position calculée *vs.* position réelle.

5. Le système de mesure du CEA LIST mis au point pour le projet SMITS

Afin de satisfaire les spécifications des opérateurs ferroviaires, utilisateurs en final de la chaîne de mesure, le CEA LIST a mis au point un système d'interrogation pour les 4 lignes de CFO à réseaux de Bragg intégrées dans les 2 bandes de contact du pantographe CX25 du TGV, prêt à être intégré dans la chaîne de mesure SNCF existante.

Du point de vue de sa chaîne optique, le système mis au point au sein de notre laboratoire repose sur une source laser en anneau accordable [8, 9, 10] dont les principales caractéristiques sont un très bon rapport signal sur bruit, une grande puissance d'émission (4 mW) avec une très fine raie d'émission (dont la largeur à mi-hauteur est plus faible que 0,5 pm) obtenue par filtrage en cascade du pic central d'absorption d'un réseau à saut de phase à l'aide d'un réseau apodisé (fig. 3).

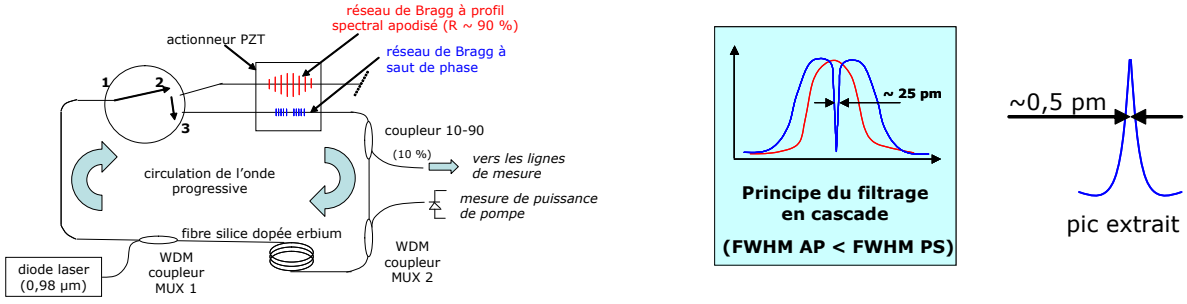


Figure 3. Principe du laser en anneau accordable développé par le CEA LIST.

La longueur d'onde d'émission du laser en anneau est accordable jusqu'à une fréquence de 500 Hz par ajustement simultané de la déformation mécanique du réseau à saut de phase et du réseau apodisé, tous deux montés solidaires et en précontrainte de traction sur un actionneur piézo-électrique.

La référence en longueur d'onde du système de mesure se fait en continu à l'aide d'un étalon interne raccordé au NIST[(2)], assurant de fait une précision de mesure dans le temps et une dérive conformes aux spécifications, et contrôlées meilleures que 0,6 pm à 500 Hz (sans moyennage).

6. Essais TGV en ligne entre Paris et Vendôme

Les essais de qualification de la boucle de mesure se sont déroulés sur une semaine complète à bord d'une rame TGV Duplex entre Paris et Vendôme. Ils ont consisté à réaliser plus de 5000 km d'essais pendant lesquels ont été enregistrés simultanément les températures, forces de contact et positions du fil par chacun des deux systèmes de mesure : celui de la SNCF-AEF (Agence d'Essai Ferroviaire de Vitry-sur-Seine) reposant sur une technologie électrique classique, et le système optique mis au point dans le projet SMITS (fig. 4).

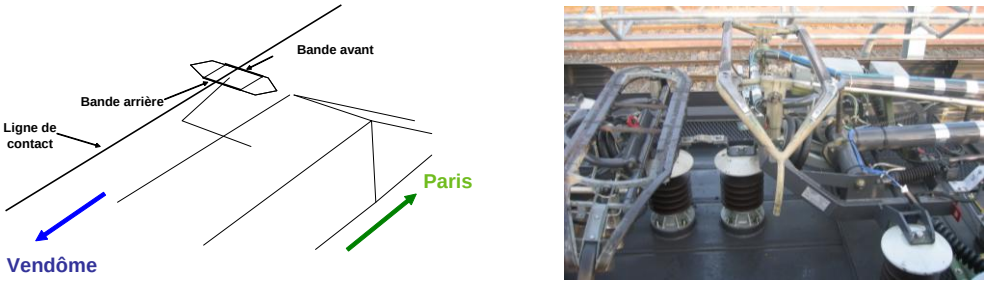


Figure 4. Configuration du pantographe pour les essais TGV Duplex entre Paris et Vendôme.

Cette instrumentation constituée d'un système maître agissant en tant que "boite noire" pour le calcul des longueurs d'onde de Bragg de chacune des 4 lignes optiques de capteurs, et au sein duquel était embarquée toute l'optoélectronique, a eu pour rôle de distribuer en temps réel l'ensemble des longueurs d'onde de Bragg sur un réseau LAN privé à un PC client dont le rôle était de générer, à partir des modèles physiques, les grandeurs de température, force et positions, à la fois sous une forme numérique pour un enregistrement sur fichiers, mais aussi sous forme analogique au format 0-10V aux bornes de connecteurs BNC pour leur acquisition et comparaison par le système de référence de la SNCF-AEF (fig. 5).

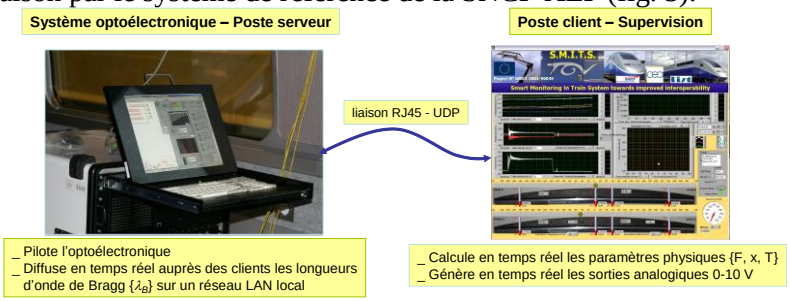


Figure 5. Configuration du système optoélectronique agissant en tant que serveur et son poste client en supervision.

7. Résultats des essais

Cette semaine d'essais en ligne a donc permis :

- de réaliser des mesures de température avec des résultats démontrant la présence de gradients thermiques élevés dans les bande de contact, pouvant atteindre 160°C/m ;
- de démontrer que la position du point de contact était observable, avec la mise en évidence du mouvement de zig-zag du fil sur la tête de pantographe ;
- que la mesure de la force verticale de contact était réalisable, mais nécessitait une compensation en température améliorée du fait des forts gradients thermiques ;

[2] NIST : National Institute of Standards and Technology – http://www.nist.gov/.

- et de démontrer que la technologie adoptée pour le système de mesure du CEA LIST était fiable, aucune panne ou défaillance n'ayant été constatée pendant ces essais en ligne.

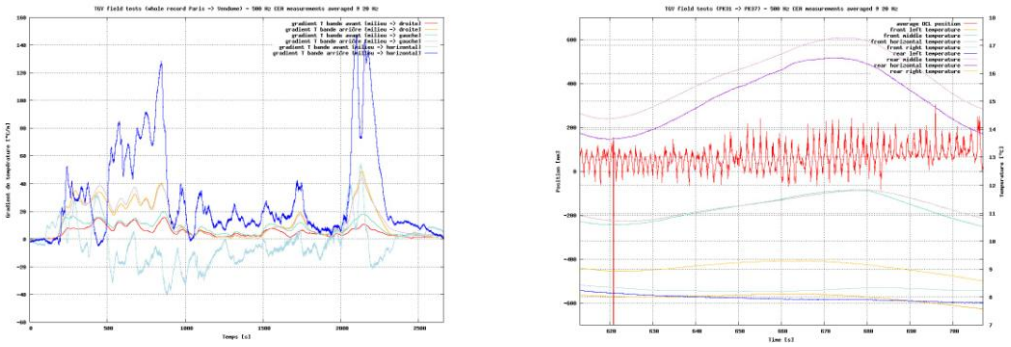


Figure 6. Gradients de température (gauche) et position du point de contact sur le pantographe (droite).

8. Conclusion

Les capteurs à réseaux de Bragg ont à nouveau su démonter leur potentiel pour la mesure de paramètres physiques en environnement industriel difficile. Tout comme le projet *SMITS*, de nombreuses applications demandent désormais un nombre de lignes de mesures croissant, avec des fréquences de mesure de plus en plus grandes, et des précisions de mesure toujours plus contraignantes. Le *Laboratoire de Mesures Optiques* a su démontrer sa capacité à innover en fournissant à temps un système de mesure conforme aux spécifications clients : ces travaux continuent dans ce sens aujourd'hui, en particulier dans le cadre du projet européen *Catiemon* avec le développement d'un système toujours plus performant et plus compact.

9. Références

1. Livre blanc : "*La politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix*" http://ec.europa.eu/transport/white_paper/documents/doc/lb_texte_complet_fr.pdf, Commission Européenne, 2001
2. Siemens Corporate Technology [D], Morganite Electrical Carbon Limited [UK], SNCF [F], Inst. F. Phys. Techn. IPHT [D], CEA LIST [F], BLS Lötschbergbahn [CH]
3. Antoine Gagnebin et Pierre Wilch, "*Captage de courant : rétrospective et développements futurs*", Chemins de fer, n°505, August 2007, http://afac.asso.fr/larevue.htm, ISSN 1252-9907
4. Alexis Guegan et Nicolas Servolle, "*Pantograph for railway traction vehicle and collector for controlling the quality of the collection of current by the pantograph*", Brevet EP 1 707 427 A1, SNCF, 2006
5. Friedrich Kießling, Rainer Puschmann et Axel Schmieder, "*Contact lines for electric railways, planning, design, implementation*", Siemens Aktiengesellschaft, 2001, ISBN 3-89578-152-5
6. Thomas Bosselmann et Nils Michael Theune, "*Verfahren und Einrichtung zur Messung der Kontaktkraft eines Stromabnehmers*", Brevet DE 102 49 896 A1, Siemens, 2002
7. Martin Craig, Peter Joseph et Simon Willett; "*Monitoring system for electrical vehicles drawing current from collectors*", Brevet WO 2005/044614 A1, Morganite Electrical Carbon Limited., 2003
8. Christophe Martinez, Sylvain Magne et Pierre Ferdinand, "*Device for optical spectral analysis*", Brevet WO 03/083417, le 3 avril 2002
9. Christophe Martinez, Sylvain Magne et Pierre Ferdinand, "*Optical filtering device*", Brevet WO 03/083527, le 3 avril 2002
10. Guillaume Laffont, Nicolas Roussel, Laurent Maurin, Jonathan Boussoir, Brendan Clogenson, Laureline Auger, Sylvain Magne et Pierre Ferdinand, "*Wavelength tunable fiber ring laser for high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors*", 17th International Conference on Optical Fibre Sensors, 23-27 mai 2005, Bruges, Belgique
11. Laurent Maurin, Pierre Ferdinand, Guillaume Laffont, Nicolas Roussel, Jonathan Boussoir et Stéphane 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, Volume 2, pp 1808-1815, édité par Fu-Kuo Chang, DESTech publication, http://www.destechpub.com/, ISBN 978-1-932078-71-8